

Polysaccharide-Based Hydrogels in Water Treatment: Mechanisms, Applications, and Future Perspectives (A Review)

A.R. Radkhah^{1*}, S. Eagderi², S. Atash Afrazah³

1, 2- Ph.D. Graduate and Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 3- Environmental Expert, Faculty of Natural Resources, Birjand University, Birjand, Iran.

* Corresponding Author Email: Alirezaradkhah@ut.ac.ir

Received 16-07-2025
Revised 11-12-2025
Accepted 13-12-2025
Available online 16-12-2025

هیدروژل‌های مبتنی بر پلی ساکارید در تصفیه آب: مکانیسم‌ها، کاربردها و چشم‌اندازهای آینده (یک مطالعه مروری)

علیرضا رادخواه^۱، سهیل ایگدري^۲، صدیقه آتش‌افرازه^۳

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ۳- کارشناس محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

* رایانامه نویسنده مسئول: Alirezaradkhah@ut.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۴/۲۵
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۹/۲۰
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۹/۲۲
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

Abstract

This review study was conducted to investigate the structure, properties, and diverse applications of hydrogels derived from natural polysaccharides—such as cellulose, chitosan, alginate, starch, and pectin—in water purification. The research discusses the primary pollutant removal mechanisms employed by these hydrogels, including adsorption, ion exchange, filtration, and catalytic degradation, which effectively eliminate a wide range of contaminants such as heavy metal ions and dyes. Analysis of various studies indicates that chitosan, due to its amino groups and inherent cationic charge, is an ideal candidate for adsorbing heavy metals and anionic dyes. On the other hand, alginate-based hydrogels are suitable for the encapsulation and selective absorption of certain pollutants, owing to their ease of gel formation with calcium ions and porous structure. Cellulose and its derivatives also show significant potential for developing cost-effective hydrogels, thanks to their abundance, low cost, and presence of active hydroxyl groups. However, the low solubility and limited reactivity of raw cellulose necessitate complex chemical modifications to enhance its performance. Additionally, pectin, as an anionic polysaccharide capable of gelling in the presence of calcium ions, is suitable for absorbing cationic heavy metals. From an economic perspective, starch and cellulose are suitable options for large-scale applications due to their low cost and abundance, whereas chitosan and alginate, despite their better performance, come with higher production costs. According to the findings, among the various types of hydrogels used globally, those based on cellulose, starch, chitosan, and alginate are far more prevalent in scientific research. Given the potential of these hydrogels—including cost-effectiveness, ease of use, facile modifiability, and biodegradability—they can be utilized to remove various pollutants, especially heavy metals and dyes, from aquatic systems.

Keywords: Chitosan-Based Hydrogels, Emerging Contaminants, Adsorption, Heavy Metals, Sustainable Water Treatment.

چکیده

این مطالعه مروری، به منظور بررسی ساختار، خواص و کاربردهای متنوع هیدروژل‌های مشتق شده از پلی ساکاریدهای طبیعی مانند سلولز، کیتوزان، آلژینات، نشاسته و پکتین در تصفیه آب به اجرا درآمد. در این تحقیق، مکانیسم‌های اصلی حذف آلاینده‌ها، از جمله جذب سطحی، تبادل یونی، فیلتراسیون و تخریب کاتالیزوری که توسط این هیدروژل‌ها برای حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها شامل یون‌های فلزات سنگین، رنگ‌ها و غیره انجام می‌شود، مورد بحث قرار گرفت. بررسی تحقیقات مختلف نشان داد که کیتوزان به دلیل دارا بودن گروه‌های آمینو و بار کاتیونی ذاتی، گزینه‌ای ایده‌آل برای جذب فلزات سنگین و رنگ‌های آنیونی محسوب می‌شود. از سوی دیگر، هیدروژل‌های مبتنی بر آلژینات به دلیل سهولت تشکیل ژل با یون‌های کلسیم و ساختار متخلخل، برای انکپسوله‌سازی و جذب انتخابی برخی آلاینده‌ها مناسب هستند. سلولز و مشتقات آن نیز به دلیل فراوانی، هزینه پایین و وجود گروه‌های هیدروکسیل فعال، پتانسیل بالایی در توسعه هیدروژل‌های مقرون به صرفه دارند. با این وجود، حلالیت پایین و واکنش‌پذیری محدود سلولز خام، نیازمند انجام اصلاحات شیمیایی پیچیده برای بهبود عملکرد است. همچنین، پکتین به عنوان یک پلی ساکارید آنیونی با قابلیت تشکیل ژل در حضور یون‌های کلسیم، برای جذب فلزات سنگین کاتیونی مناسب است. از دیدگاه اقتصادی، نشاسته و سلولز به دلیل هزینه پایین و فراوانی، گزینه‌های مناسبی برای کاربرد در مقیاس بزرگ هستند، در حالی که کیتوزان و آلژینات با وجود عملکرد بهتر، هزینه تولید بالاتری دارند. بر طبق نتایج، در بین انواع هیدروژل‌های مورد استفاده در سطح جهان، کاربرد هیدروژل‌های مبتنی بر سلولز، نشاسته، کیتوزان و آلژینات در تحقیقات علمی به مراتب بیشتر است. با توجه به پتانسیل‌های بالقوه این نوع از هیدروژل‌ها که شامل مقرون به صرفه بودن، کاربرد ساده، قابلیت اصلاح‌پذیری آسان و زیست‌تخریب‌پذیر بودن می‌باشد، می‌توان از این مواد برای حذف آلاینده‌های مختلف به ویژه فلزات سنگین و مواد رنگی از سیستم‌های آبی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: هیدروژل‌های مبتنی بر کیتوزان، آلاینده‌های نوظهور، جذب سطحی، فلزات سنگین، تصفیه پایدار آب.

How to cite this article:

Radkhah, A.R., Eagderi, S., & Atash Afrazah, S. (2025). Polysaccharide-Based Hydrogels in Water Treatment: Mechanisms, Applications, and Future Perspectives (A Review). Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 181- 205. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2507-1441>

پلی ساکاریدها از قبیل سلولز، کیتوزان، آلژینات، نشاسته و پکتین برای کاربردهای محیط زیستی، به ویژه تصفیه آب، مورد ارزیابی قرار می گیرند. با توجه به این موضوع، برای کشوری مانند ایران که به دنبال راه حل های پایدار و کاهش وابستگی به مواد شیمیایی وارداتی است، توسعه این مواد تجدیدپذیر از اهمیت ویژه ای برخوردار است ([Dowbysz و همکاران، ۲۰۲۲](#)).

هیدروژل ها، به عنوان شبکه های سه بعدی پلیمری و آبدوست که قادر به جذب مقادیر زیادی آب در ساختار خود بدون از دست دادن یکپارچگی ساختاری هستند، جایگاه ویژه ای پیدا کرده اند. ویژگی کلیدی هیدروژل ها، وجود گروه های عاملی آبدوست (مانند هیدروکسیل، کربوکسیل، آمین، آمید) در ساختار آن ها است که امکان برهم کنش قوی با مولکول های آب و همچنین آلاینده های یونی یا قطبی را فراهم می آورد ([Thang و همکاران، ۲۰۲۳](#)). هنگامی که این هیدروژل ها از پلی ساکاریدهای طبیعی ساخته می شوند، مزایای ذاتی پلیمرهای طبیعی (مانند فراوانی، ارزان، تجدیدپذیری و دوستدار محیط زیست بودن) با خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد هیدروژل ها (مانند ظرفیت جذب بالا، سطح ویژه قابل دسترس، تخلخل کنترل شده و انعطاف پذیری مکانیکی) ترکیب شده و موادی با پتانسیل بالا برای کاربردهای تصفیه آب ایجاد می کنند ([Thang و همکاران، ۲۰۲۳](#)).

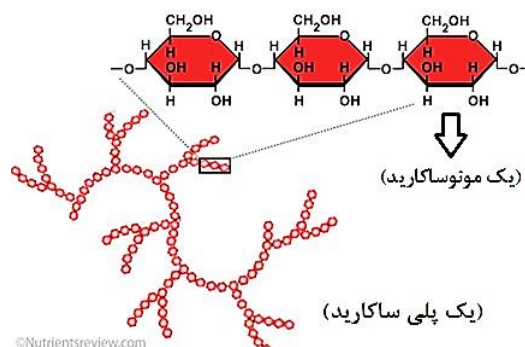
با توجه به پتانسیل بالقوه ایران در برخورداری از منابع غنی پلی ساکاریدها از جمله بیومس ها و پسماندهای کشاورزی، صنایع چوب و غیره، مطالعه مروری حاضر با هدف ارائه یک دیدگاه کامل و به روز از آخرین پیشرفت ها در زمینه کاربرد هیدروژل های مبتنی بر پلی ساکارید در تصفیه آب تدوین شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی انواع مختلف پلی ساکاریدهای مورد استفاده (با تأکید بر پتانسیل بومی سازی)، روش های سنتز و اصلاح هیدروژل های مشتق شده از آن ها و مکانیزم های اصلی درگیر در حذف طیف وسیعی از آلاینده ها از جمله فلزات سنگین، رنگ ها، ترکیبات آلی نوظهور و میکروارگانیسم ها است ([Berradi و همکاران، ۲۰۲۳](#)). علاوه بر این، این مطالعه مروری به چالش های موجود و چشم اندازهای آینده در توسعه و تجاری سازی این مواد دوستدار محیط زیست، می پردازد و بر اهمیت تحقیقات هدفمند و کاربردی برای بومی سازی فناوری و پاسخ به نیازهای خاص کشور ایران در زمینه مدیریت منابع آب و محیط زیست تأکید خواهد کرد.

۱. پلی ساکاریدها: ساختار، خواص و منابع بنیادین هیدروژل های تصفیه آب
پلی ساکاریدها [کلمه یونانی پلی به معنی زیاد؛ ساکار به معنی قند] کربوهیدرات های پیچیده ای هستند که از ۱۰ تا چند هزار مونوساکارید که به صورت زنجیره ای مرتب شده اند، تشکیل شده اند (شکل ۱). پلی ساکاریدها، به عنوان

ایران، به عنوان کشوری در منطقه خشک و نیمه خشک، همواره با چالش کمبود آب مواجه بوده است. آلودگی آب ناشی از تخلیه پساب های صنعتی حاوی فلزات سنگین سمی، رنگ های پایدار و تجزیه ناپذیر، ترکیبات آلی فرار و نیمه فرار، مواد دارویی فعال و محصولات مراقبت شخصی و میکروارگانیسم های بیماری زا، نه تنها اکوسیستم های آبی ارزشمند کشور را به شدت تخریب می کند، بلکه به طور مستقیم سلامت عمومی را نیز به خطر می اندازد ([Nikpey و همکاران، ۲۰۲۵](#)). این وضعیت، لزوم توسعه و پیاده سازی فناوری های نوین تصفیه آب را که هم کارآمد، هم اقتصادی، هم پایدار و هم بومی سازی شده باشند، بیش از پیش برجسته می سازد ([Omotayo و Omotayo، ۲۰۲۴](#)). این امر نه تنها بر دسترسی به آب آشامیدنی سالم تأثیر گذاشته، بلکه امنیت غذایی و سلامت زیست بوم های آبی کشور را نیز تهدید می کند. روش های سنتی تصفیه آب، اگرچه تا حدودی کارآمد بوده اند، اما اغلب با محدودیت هایی نظیر هزینه های عملیاتی بالا، مصرف انرژی زیاد، تولید حجم زیادی از لجن سمی و عدم توانایی در حذف مؤثر طیف گسترده ای از آلاینده های نوظهور و مقاوم همراه هستند که برای شرایط خاص ایران، چالش برانگیزتر می شوند ([رادخواه و همکاران، ۱۴۰۱](#)). به عنوان مثال، در مناطقی با منابع آب محدود، نیاز به فناوری هایی هست که آب را با بالاترین کیفیت ممکن برای استفاده مجدد آماده کنند ([Cagno و همکاران، ۲۰۲۲](#)). در مواجهه با این چالش ها، تحقیقات گسترده ای در سطح جهانی و ملی در زمینه مواد فرآیندهای پیشرفته برای غلبه بر این محدودیت ها در حال انجام است. در میان رویکردهای نوین، استفاده از مواد جاذب^۱ به دلیل سادگی عملکرد، انعطاف پذیری، کارایی بالا در غلظت های پایین آلاینده ([رادخواه و همکاران، ۱۴۰۳](#)) و مهم تر از همه، امکان بازیابی و استفاده مجدد از مواد جاذب، توجه زیادی را به خود جلب کرده است ([Ahmadian و همکاران، ۲۰۲۳](#)). به طور خاص، مواد مبتنی بر پلیمرهای طبیعی در سال های اخیر به عنوان جایگزین های زیست دوست و پایدار برای جاذب های رایج شیمیایی و سنتتیک مطرح شده اند. از جمله این مواد که از منابع تجدیدپذیر و اغلب بومی به دست می آیند، می توان به پلی ساکاریدها اشاره کرد که خواص منحصربه فردی نظیر زیست سازگاری، زیست تخریب پذیری و عدم سمیت دارند. پلی ساکاریدها، به عنوان بیوپلیمرهای کربوهیدراتی متشکل از واحدهای مونوساکاریدی متصل به هم، فراوان ترین پلیمرهای طبیعی روی زمین هستند. ایران دارای منابع غنی از بیومس ها و پسماندهای کشاورزی است که می توانند به عنوان منابع ارزان و فراوان برای استخراج پلی ساکاریدها به کار روند ([Bilal و همکاران، ۲۰۲۱](#)). امروزه، انواع مختلفی از

ستون فقرات بیومولکولی طبیعت، جایگاه ویژه‌ای در میان بیوماکرومولکول‌ها دارند و از فراوان‌ترین پلیمرهای طبیعی روی کره زمین محسوب می‌شوند. این ترکیبات پیچیده کربوهیدراتی از زنجیره‌های طولانی واحدهای مونوساکارید (قندهای ساده) تشکیل شده‌اند که از طریق پیوندهای کووالانسی به نام پیوندهای گلیکوزیدی به یکدیگر متصل شده‌اند (Sarraf و همکاران، ۲۰۲۱). تنوع بی‌نظیری در ساختار پلی‌ساکاریدها وجود دارد که از عوامل متعددی نظیر نوع مونوساکاریدهای سازنده، پیکربندی فضایی این واحدها (آلفا یا بتا)، محل و نوع پیوندهای گلیکوزیدی (به عنوان مثال، پیوندهای (۴→۱) یا (۶→۱)) و الگوی زنجیره‌های پلیمری نشأت می‌گیرد. این تنوع ساختاری، به پلی‌ساکاریدها خواص فیزیکوشیمیایی بسیار متفاوتی می‌بخشد که آن‌ها را برای کاربردهای گسترده‌ای از جمله در پزشکی، صنایع غذایی و به خصوص، فناوری‌های تصفیه آب، ایده‌آل می‌سازد (Seeberger، ۲۰۲۲؛ Murphy و همکاران، ۲۰۲۳).

به‌طور کلی، پلی‌ساکاریدها را می‌توان بر اساس ترکیب مونوساکاریدی به دو دسته اصلی تقسیم کرد: هموپلی‌ساکاریدها که تنها از یک نوع واحد مونوساکاریدی تکراری ساخته شده‌اند (مانند سلولز و نشاسته که هر دو از واحدهای گلوکز تشکیل شده‌اند اما با پیوندهای گلیکوزیدی متفاوت) و هتروپلی‌ساکاریدها که از دو یا چند نوع مختلف مونوساکارید (نظیر پکتین و آلژینات) تشکیل شده‌اند



شکل ۱- ساختار پلی‌ساکاریدها (Balducci و همکاران، ۲۰۲۳)

(Murphy و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، منشأ استخراج نیز می‌تواند مبنای دیگری برای طبقه‌بندی باشد، شامل پلی‌ساکاریدهای گیاهی، حیوانی، میکروبی و جلبکی. فارغ از منشأ و طبقه‌بندی دقیق، ویژگی بارز و مشترک بسیاری از پلی‌ساکاریدهای طبیعی، حضور تعداد زیادی گروه هیدروکسیل (OH^-) در ساختار هر واحد مونوساکاریدی است (Carpena و همکاران، ۲۰۲۲). این گروه‌های هیدروکسیل نه تنها قابلیت تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی با مولکول‌های آب را دارند، بلکه منجر به خاصیت آبدوستی برجسته و ظرفیت تورم بالای هیدروژل‌های مشتق شده از آن‌ها نیز می‌شوند. علاوه بر این، لازم به ذکر است که گروه‌های هیدروکسیل به‌عنوان نقاط واکنش‌پذیر ایده‌آل برای اصلاح شیمیایی پلی‌ساکاریدها عمل می‌کنند (Zheng و همکاران، ۲۰۱۷). این اصلاحات امکان معرفی گروه‌های عاملی جدید و هدفمند را فراهم آورده و خواص جذبی و سایر ویژگی‌های عملکردی را به طرز چشمگیری بهبود می‌بخشند. لازم به ذکر است که برخی پلی‌ساکاریدها به طور طبیعی حاوی گروه‌های کربوکسیل (COOH^-) (مانند آلژینات و پکتین) یا گروه‌های آمین (NH_2) (مانند کیتوزان) هستند که به ترتیب بار منفی یا مثبت به ساختار پلیمر می‌بخشند و آن‌ها را به موادی عالی برای تبادل یونی و جذب الکترواستاتیکی آلاینده‌های باردار تبدیل می‌کنند (Bosacka و همکاران، ۲۰۲۲).

نواحی بلوری (کریستالی) و بی‌نظم (آمورف) می‌شود (شکل ۲). این ساختار نیمه‌کریستالی، به سلولز استحکام مکانیکی بالا و عدم حلالیت در آب و اکثر حلال‌های آلی می‌بخشد که آن را به ماده‌ای مقاوم و پایدار تبدیل می‌کند (McNamara و همکاران، ۲۰۱۵). پتانسیل ایران در بهره‌برداری از سلولز بسیار بالاست؛ پسماندهای کشاورزی وسیعی نظیر کاه گندم و برنج، ساقه ذرت و نیشکر، بقایای پنبه و انواع ضایعات لیگنوسلولزی از صنایع چوب و کاغذسازی، منابع ارزان و تجدیدپذیری از سلولز را فراهم می‌آورند (Ojo، ۲۰۲۳). این منابع عظیم می‌توانند به عنوان ماده اولیه برای تولید هیدروژل‌های سلولزی، به ویژه در قالب

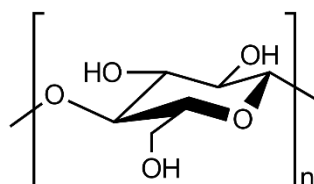
در ادامه به بررسی دقیق‌تر مهم‌ترین پلی‌ساکاریدهای پرداخته می‌شود که به طور گسترده در سنتز هیدروژل‌ها برای کاربردهای تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۱. پلی‌ساکاریدهای محوری در تصفیه آب با تمرکز بر پتانسیل ملی

سلولز به عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی روی کره زمین و جزء اصلی دیواره سلولی گیاهان، از واحدهای تکرارشونده بتا-D-گلوکوپیرانوز تشکیل شده که توسط پیوندهای گلیکوزیدی ($\beta(4\rightarrow1)$) به یکدیگر متصل شده‌اند. ساختار خطی و آرایش زنجیره‌های پلیمری سلولز از طریق پیوندهای هیدروژنی درون و بین مولکولی قوی، منجر به تشکیل

نانوسلولزها «نانوفیبریل‌های سلولزی و نانوبلورهای سلولزی» که به دلیل نسبت سطح به حجم فوق‌العاده بالا، مدول الاستیک عالی و گروه‌های هیدروکسیل فعال‌تر، کارایی بی‌نظیری در تصفیه آب دارند، مورد استفاده قرار گیرند (Magalhães و همکاران، ۲۰۲۳). قابلیت اصلاح شیمیایی

گسترده گروه‌های هیدروکسیل سلولز، امکان معرفی گروه‌های عاملی متنوعی نظیر آمین، کربوکسیل و سولفونیک را فراهم می‌آورد که ظرفیت جذب فلزات سنگین، رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲).



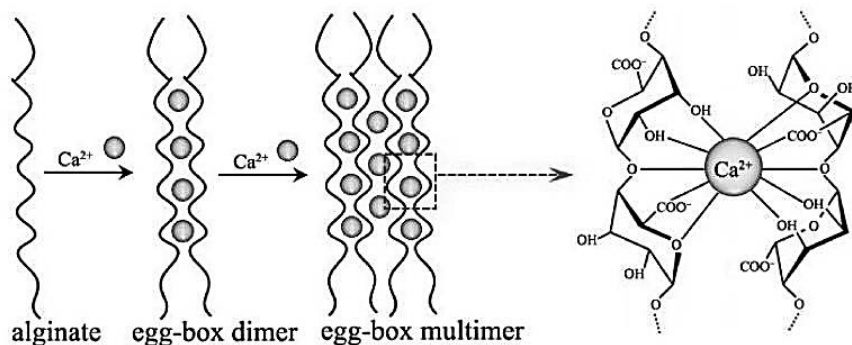
شکل ۲- ساختار شیمیایی سلولز

کیتوزان، که پس از سلولز دومین پلیمر طبیعی فراوان است، از طریق فرآیند دزستیل‌اسیون کیتین (پلیمر اصلی اسکلت بیرونی سخت‌پوستان، حشرات و دیواره سلولی قارچ‌ها) به دست می‌آید. این پلی‌ساکارید خطی از واحدهای تکرارشونده D-گلوکز آمین (و درصدی کمتر از N-استیل-D-گلوکز آمین) که توسط پیوندهای گلیکوزیدی ($\beta(1\rightarrow4)$) به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است. آنچه کیتوزان را در میان سایر پلی‌ساکاریدها منحصر به فرد می‌سازد، وجود گروه‌های آمین (NH_2) آزاد در ساختار آن است (Aranaz و همکاران، ۲۰۲۱). این گروه‌های آمین در محیط‌های اسیدی پروتونه شده و بار مثبت پیدا می‌کنند، که به کیتوزان خاصیت کاتیونی می‌بخشد و آن را برای جذب مؤثر آلاینده‌های با بار منفی، نظیر رنگ‌های آنیونی، آنیون‌های فلزی و کمپلکس‌سازی با یون‌های فلزات سنگین، بی‌نظیر می‌سازد (Pérez-Pacheco و همکاران، ۲۰۲۵). ایران با داشتن سواحل طولانی در خلیج فارس و دریای خزر و صنایع شیلات فعال، دارای منابع عظیمی از پوست میگو و خرچنگ است که به عنوان پسماند تولید می‌شوند. بهره‌برداری از این پسماندها برای تولید کیتوزان، نه تنها یک رویکرد دوستدار محیط زیست و پایدار است، بلکه می‌تواند ارزش افزوده قابل توجهی برای صنایع شیلات کشور ایجاد کند. علاوه بر ظرفیت جذب بالا، خواص ضد میکروبی ذاتی کیتوزان نیز آن را برای حذف میکروارگانیسم‌ها و ضدعفونی آب مناسب می‌سازد (Farajzadeh و Pak، ۲۰۰۷).

استرانسیم (Sr^{2+}) و باریم (Ba^{2+}) است. این فرآیند شبکه‌ای شدن یونی از طریق مکانیسم "جعبه تخم‌مرغی" رخ می‌دهد (شکل ۳) که در آن یون‌های فلزی بین زنجیره‌های پلیمری بلوک‌های G قرار گرفته و یک ساختار سه بعدی پایدار ایجاد می‌کنند (Abka-khajouei و همکاران، ۲۰۲۲).

سواحل گسترده ایران در خلیج فارس و دریای عمان، بستر مناسبی برای رشد جلبک‌های قهوه‌ای فراهم می‌آورند. توسعه مزارع پرورش جلبک و فرآوری آن‌ها برای استخراج آلژینات، می‌تواند منبع مهمی برای تولید این پلیمر ارزشمند در کشور باشد. وجود گروه‌های کربوکسیل ($COOH$) فراوان در آلژینات، به آن بار منفی می‌بخشد و آن را به جاذبی عالی برای یون‌های فلزات سنگین کاتیونی و رنگ‌های کاتیونی از طریق تبادل یونی و کمپلکس‌سازی تبدیل می‌کند. سهولت تشکیل ژل در شرایط ملایم و پایداری مکانیکی مناسب، آلژینات را برای تولید هیدروژل‌های تصفیه آب بسیار کاربردی می‌سازد (Saji و همکاران، ۲۰۲۲). نشاسته نیز یک هموپلی‌ساکارید ارزان و فراوان است که از گیاهان (به ویژه غلات مانند گندم و ذرت و محصولات ریشه‌ای مانند سیب‌زمینی) به دست می‌آید. این پلیمر از واحدهای تکرارشونده آلفا-D-گلوکوپیرانوز تشکیل شده و دو جزء اصلی این ماده، آمیلوز (بخش خطی) و آمیلوپکتین (بخش شاخه‌دار)، هستند (شکل ۴). نسبت این دو جزء بسته به منبع گیاهی متفاوت است (Benalaya و همکاران، ۲۰۲۴). نشاسته اگرچه به دلیل گروه‌های هیدروکسیل آبدوست است، اما حلالیت محدودی در آب سرد دارد و با حرارت دادن می‌تواند به ژل تبدیل شود. ایران با تولید انبوه غلاتی نظیر گندم و ذرت و همچنین سیب‌زمینی، دارای منابع فراوانی از نشاسته است که می‌تواند به عنوان ماده اولیه ارزان‌قیمت برای سنتز هیدروژل‌ها استفاده شود. قابلیت ژلاتینه شدن، گروه‌های هیدروکسیل واکنش‌پذیر و امکان ایجاد ساختارهای متخلخل با استفاده از نشاسته، آن را به گزینه‌ای اقتصادی و دوستدار محیط زیست برای کاربردهای جذب سطحی تبدیل کرده است (Yazid و همکاران، ۲۰۱۸).

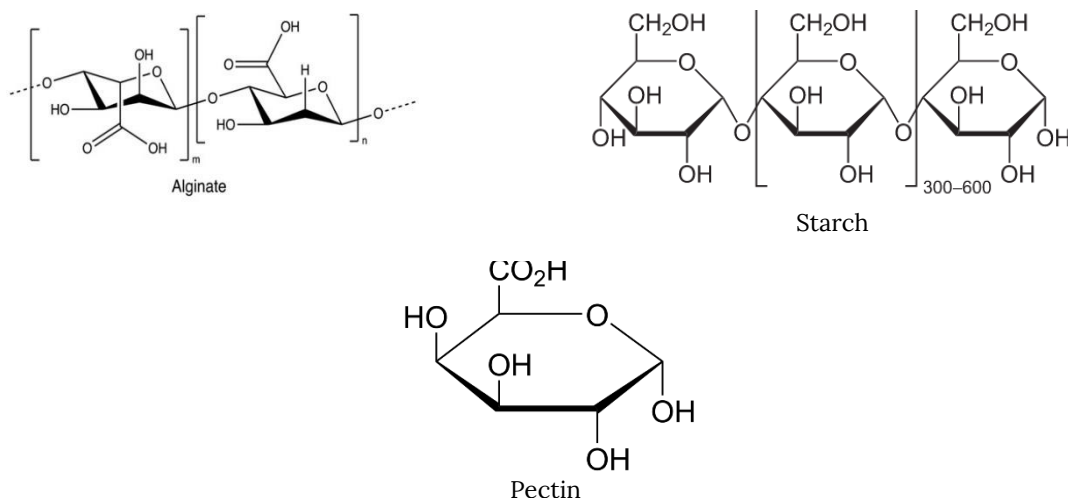
آلژینات یک پلی‌ساکارید خطی و آنیونی است که از دیواره سلولی جلبک‌های قهوه‌ای و برخی گونه‌های باکتریایی استخراج می‌شود (شکل ۴). این پلیمر از واحدهای مونوساکاریدی اسیدی بتا-D-مانورونیک اسید (M) و آلفا-L-گولورونیک اسید (G) تشکیل شده که به صورت بلوک‌های هموپلیمری (مثلاً بلوک‌های GGG یا MMM) یا هتروپلیمری (بلوک‌های MG) به هم متصل شده‌اند (Abka-khajouei و همکاران، ۲۰۲۲). برجسته‌ترین ویژگی آلژینات، توانایی آن در تشکیل ژل‌های پایدار در حضور یون‌های فلزات دوظرفیتی یا چندظرفیتی مانند کلسیم (Ca^{2+}),



شکل ۳- نمایش شماتیکی از مدل جعبه تخم مرغی (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲).

به طور خلاصه، استفاده از پلی ساکاریدها به عنوان بلوک های سازنده هیدروژل ها برای تصفیه آب، مزایای چندجانبه ای را ارائه می دهد. این مزایا شامل پایداری زیست محیطی (تجدیدپذیری، زیست تخریب پذیری کامل و کاهش رد پای کربن)، صرفه جویی اقتصادی (بهره برداری از پسماندها و کاهش وابستگی به مواد سنتتیک گران قیمت وارداتی)، ایمنی و زیست سازگاری (ذاتاً غیرسمی بودن) و به ویژه قابلیت اصلاح پذیری بالا و انعطاف پذیری طراحی است (Sandu و همکاران، ۲۰۲۵). این انعطاف پذیری به محققان اجازه می دهد تا با مهندسی سطح مولکولی و طراحی ساختارهای متخلخل، هیدروژل هایی با کارایی بهینه برای حذف انواع خاصی از آلاینده ها و در شرایط مختلف محیطی، تولید کنند (Pellá و همکاران، ۲۰۱۸). با در نظر گرفتن این ویژگی های منحصربه فرد و پتانسیل های عظیم بومی سازی در ایران، پلی ساکاریدها بستر مناسبی را برای توسعه نسل جدیدی از جاذب ها و فیلترهای پایدار و بومی برای مقابله با چالش های آلودگی آب کشور فراهم می آورند. بخش های آتی این مطالعه به تفصیل به چگونگی سنتز این هیدروژل ها و مکانیسم های دقیق عمل آن ها در حذف آلاینده های مختلف خواهد پرداخت.

در نهایت، پکتین، یک هتروپلی ساکارید پیچیده و آنیونی است که به وفور در دیواره سلولی گیاهان عالی، به ویژه در میوه ها (نظیر مرکبات و سیب) یافت می شود. ساختار اصلی آن از یک ستون فقرات پلی گالاکتورونیک اسید تشکیل شده که شامل واحدهای آلفا-1,4-D-گالاکتورونیک اسید است و بخش قابل توجهی از گروه های کربوکسیل آن، ممکن است متیله شده باشند (Lara-Espinoza و همکاران، ۲۰۱۸). وجود گروه های کربوکسیل آزاد به پکتین بار منفی می دهد و آن را برای جذب مؤثر فلزات سنگین و رنگ های کاتیونی مناسب می سازد. همانند آلژینات، پکتین نیز می تواند در حضور یون های فلزات دوظرفیتی ژل تشکیل دهد (Gorgieva و Ojstršek، ۲۰۲۴). کشور ایران به عنوان یکی از بزرگترین تولیدکنندگان میوه ها و مرکبات در جهان، دارای پسماندهای عظیم کشاورزی از صنایع آب میوه سازی، کنسانتره و کمپوت سازی (پوست و تفاله میوه ها) است. این پسماندها در حال حاضر اغلب به عنوان ضایعات دور ریخته می شوند، در حالی که می توانند به عنوان منابع غنی و ارزان قیمتی برای استخراج پکتین مورد بهره برداری قرار گیرند و به توسعه هیدروژل های پکتینی بومی کمک شایانی کنند (Kamali و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۴- ساختار شیمیایی آلژینات، نشاسته و پکتین (Lin و همکاران، ۲۰۲۲)

۲. هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید: سنتز، خصوصیات و مکانیسم‌های جذب آلاینده

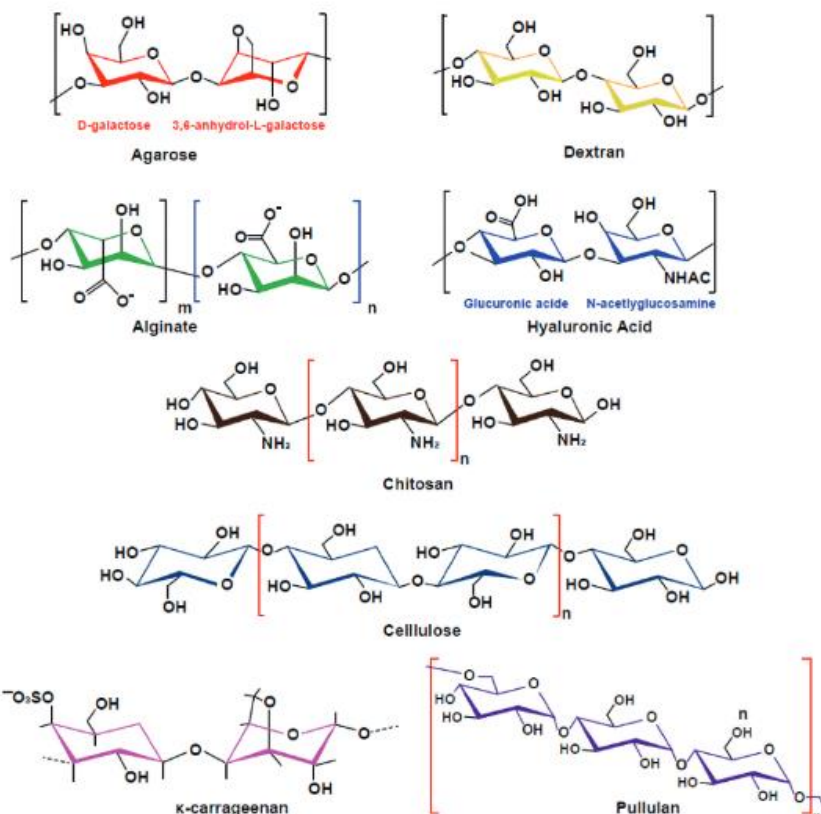
هیدروژل‌ها به عنوان شاهکار مهندسی مواد، شبکه‌های پلیمری سه‌بعدی و آبدوستی هستند که قابلیت بی‌نظیری در جذب مقادیر قابل توجهی از آب یا سیالات بیولوژیکی در ساختار خود دارند (شکل ۵)، بدون اینکه انسجام و یکپارچگی ساختاری خود را از دست بدهند (El-Sherbiny و Yacoub، ۲۰۱۳). این توانایی شگفت‌انگیز به دلیل وجود پرشمار گروه‌های آبدوست (نظیر هیدروکسیل، کربوکسیل، آمین و آمید) در زنجیره‌های پلیمری آن‌ها است که امکان تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی با مولکول‌های آب را فراهم می‌آورد (Ho و همکاران، ۲۰۲۲). هنگامی که این شبکه‌های ژلی از پلی‌ساکاریدهای طبیعی استخراج و سنتز می‌شوند، محصول نهایی نه تنها خواص برجسته هیدروژل‌ها را به ارث می‌برد، بلکه مزایای ذاتی و اکولوژیکی پلیمرهای طبیعی نظیر زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری کامل و منشأ تجدیدپذیر را نیز به همراه دارد (Peera و Byun، ۲۰۲۵). در جدول (۱) طبقه‌بندی و ویژگی‌های اصلی هیدروژل‌ها بر

اساس پارامترهای مختلف نشان داده شده است که از نظر علمی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

این بخش به طور جامع به بررسی روش‌های مختلف سنتز این هیدروژل‌ها، خصوصیات فیزیکوشیمیایی حیاتی آن‌ها که بر عملکردشان تأثیر می‌گذارد و مهم‌تر از همه، مکانیسم‌های پیچیده و چندان‌درگیر در حذف مؤثر آلاینده‌ها از محیط‌های آبی می‌پردازد.

۲-۱. روش‌های سنتز هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید: مهندسی یک شبکه هوشمند

تولید هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی عمدتاً بر پایه ایجاد اتصالات متقابل پایدار بین زنجیره‌های پلیمری انجام می‌شود تا یک شبکه سه‌بعدی متراکم و در عین حال قابل تورم شکل گیرد. این اتصالات می‌توانند از طریق رویکردهای فیزیکی یا شیمیایی برقرار شوند و انتخاب روش به نوع خاص پلی‌ساکارید مورد استفاده، ویژگی‌های مطلوب هیدروژل نهایی و ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی بستگی دارد (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ۵- ساختار شیمیایی هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید. آگاروز از- (3p6) (1-4)- β دهیدراته-L-گالاکتوز (چپ) و- (1-3)-D- α -گالاکتوز (راست) تشکیل شده است. اسید هیالورونیک (HA) از بقایای متناوب β -D-(1-3) اسید گلوکورونیک (چپ) و- (1-4)-N-D- β استیل گلوکزآمین (راست) تشکیل شده است. آلژینات از یک کوپلیمر خطی از واحدهای اسید- α -گلوکورونیک متصل به β -(1-4) و بقایای اسید-L- α -گلوکورونیک تشکیل شده است (Huang و همکاران، ۲۰۲۳).

جدول ۱- طبقه‌بندی و ویژگی‌های اصلی هیدروژل‌ها بر اساس پارامترهای مختلف (Dattilo و همکاران، ۲۰۲۳)

ویژگی‌ها	طبقه‌بندی	معیارها
پیوند عرضی	شیمیایی	پلیمرها به صورت کووالانسی توسط اتصالات دائمی پیوند عرضی می‌شوند. این کار می‌تواند با افزودن مولکول‌های پیوند عرضی، اتصال پلیمر-پلیمر یا آغازگرهای نوری انجام شود.
	پلیمرهای فیزیکی	به واسطه پیوندهای زنجیره‌ای و یا پیوندهای هیدروژنی یا برهمکنش‌های آبگریز یا یونی در کنار هم نگه داشته می‌شوند.
	هموپلیمر	هیدروژل مشتق شده از یک گونه مونومر.
	کوپلیمر	هیدروژل از دو یا چند مونومر مختلف با حداقل یک جزء آبدوست تشکیل شده است.
ترکیب پلیمری	شبکه نیمه‌درهم‌تنیده	هیدروژل از یک مونومر شبکه‌ای شده و یک جزء غیرشبکه‌ای شده تشکیل شده است.
	شبکه درهم‌تنیده	هیدروژل‌ها از دو زنجیره پلیمری مستقل با اتصالات عرضی ساخته شده‌اند که به شکل شبکه‌ای قرار گرفته‌اند.
	طبیعی	پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها نمونه‌هایی از پلیمرهای هیدروژل‌های طبیعی هستند. آن‌ها زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر هستند.
منبع	مصنوعی	هیدروژل‌های مصنوعی استحکام بالاتری دارند و می‌توانند طوری طراحی شوند که خواص مکانیکی و شیمیایی خاصی داشته باشند.
	هیبرید	هیدروژل‌ها ترکیبی از پلیمرهای مصنوعی و طبیعی هستند.
	آمورف	آنها حاوی زنجیره‌های ماکرومولکولی هستند که به صورت تصادفی چیده شده‌اند.
ساختار فیزیکی	کریستالی	آنها دارای نواحی متراکم از زنجیره‌های ماکرومولکولی منظم هستند.
	نیمه بلوری	مخلوطی از فازهای آمورف و بلوری.
	غیریونی	آنها هیچ گروه باری ندارند و اتصالات فوق‌العاده بادوام و دائمی دارند.
بار الکتریکی شبکه‌ای	یونی	آنها می‌توانند مثبت یا منفی باشند و بسته به pH رفتارهای متفاوتی دارند.
	آمفوتریک	هیدروژل‌ها حاوی هر دو گروه اسیدی و بازی هستند.
	زویتریونیک (Zwitterionic) - بارهای منفی و مثبت هم توان	آنها مقدار مساوی بار مثبت و منفی را نشان می‌دهند.

پیوندهای استری با گروه‌های هیدروکسیل پلی‌ساکاریدها، شبکه‌های کووالانسی قوی و پایدار ایجاد می‌کنند که برای کاربردهای زیست‌محیطی ارجحیت دارند. علاوه بر این، در مورد پلی‌ساکاریدهای حاوی گروه‌های کربوکسیل نظیر آلزینات و پکتین، استفاده از یون‌های فلزی دوظرفیتی یا چندظرفیتی مانند کلسیم (Ca^{2+})، باریم (Ba^{2+}) یا آهن (Fe^{3+}) یک روش بسیار متداول و مؤثر برای شبکه‌ای شدن است (Maiz-Fernández و همکاران، ۲۰۲۰). در این فرآیند، این یون‌ها با گروه‌های کربوکسیل پلی‌ساکاریدها کمپلکس تشکیل داده و از طریق برهم‌کنش‌های یونی، یک ساختار سه‌بعدی شبیه «جعبه تخم‌مرغی»^۳ را ایجاد می‌کنند که منجر به ژل شدن سریع و آسان می‌شود. این رویکرد به دلیل سادگی، سرعت و عدم نیاز به مواد شیمیایی سمی، برای تولید هیدروژل‌های زیست‌سازگار بسیار جذاب است (Makarova و همکاران، ۲۰۲۳).

در مقابل، روش‌های شبکه‌ای شدن فیزیکی بر اساس تشکیل پیوندهای برگشت‌پذیر و غیرکووالانسی بین زنجیره‌های پلیمری استوار هستند. این پیوندها شامل

روش‌های شبکه‌ای شدن شیمیایی از طریق تشکیل پیوندهای کووالانسی دائمی بین زنجیره‌های پلیمر صورت می‌پذیرد که معمولاً با استفاده از عوامل شبکه‌ای‌کننده^۲ انجام می‌شود. این عوامل، مولکول‌های دو یا چندعاملی هستند که با گروه‌های عاملی فعال موجود در پلی‌ساکاریدها (نظیر گروه‌های هیدروکسیل در سلولز و نشاسته، یا گروه‌های آمین در کیتوزان) واکنش می‌دهند (Campiglio و همکاران، ۲۰۱۹؛ Fancy و Kodadek، ۱۹۹۹). برای مثال، گلوکارآلدئید به دلیل قیمت مناسب و واکنش‌پذیری بالا، به طور سنتی برای شبکه‌ای کردن کیتوزان و سایر پلی‌ساکاریدها استفاده می‌شد، اما نگرانی‌ها در مورد سمیت آن، پژوهشگران را به سمت جایگزین‌های ایمن‌تر سوق داده است (Campiglio و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا، اسیدهای چندکربوکسیلیک مانند سیتریک اسید و ادئیدروکسی پروپان تری کربوکسیلیک اسید (BTGA)، به عنوان عوامل شبکه‌ای‌کننده زیست‌سازگار و غیرسمی برای پلی‌ساکاریدهایی نظیر سلولز و نشاسته، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند (NCBI، ۲۰۲۵). این اسیدها از طریق تشکیل

پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های یونی (بدون تشکیل کووالانسی)، نیروهای واندروالسی یا درهم‌تنیدگی فیزیکی زنجیره‌ها می‌شوند (Yammine و همکاران، ۲۰۲۵). تکنیک‌هایی مانند چرخه‌های انجماد-ذوب^۴ به‌طور گسترده‌ای برای سنتز هیدروژل‌های سلولز و نشاسته به کار می‌روند. در این فرآیند، با انجماد آب، زنجیره‌های پلیمری به هم نزدیک‌تر شده و پیوندهای هیدروژنی قوی‌تری بین آن‌ها تشکیل می‌شود؛ سپس با ذوب شدن مجدد، یک شبکه ژلی پایدار با تخلخل بالا شکل می‌گیرد (Ribeiro و همکاران، ۲۰۲۵). برهم‌کنش‌های یونی نیز می‌توانند منجر به شبکه‌ای شدن فیزیکی شوند، نظیر ژل شدن آلزینات در حضور یون‌های کلسیم، یا تشکیل ذرات ژلی از کیتوزان در حضور پلی‌آنیون‌هایی نظیر تری‌پلی‌فسفات^۵ که از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی عمل می‌کنند. این روش‌ها اغلب برای تولید هیدروژل‌هایی با خواص خودترمیم‌شونده یا پاسخگو به محرک‌ها مناسب‌ترند، هرچند ممکن است پایداری مکانیکی کمتری نسبت به هیدروژل‌های شبکه‌ای شده شیمیایی داشته باشند (Wang و همکاران، ۲۰۲۵).

۲-۲. خصوصیات فیزیکی شیمیایی هیدروژل‌ها؛ عوامل کلیدی در عملکرد تصفیه آب

برای طراحی و بهینه‌سازی هیدروژل‌ها برای کاربردهای تصفیه آب، درک و کنترل دقیق خصوصیات فیزیکی شیمیایی آن‌ها ضروری است. یکی از مهم‌ترین پارامترها، درجه تورم^۶ است که نشان‌دهنده ظرفیت هیدروژل برای جذب آب و متورم شدن است (Alsaka و همکاران، ۲۰۲۵). هیدروژل‌های با درجه تورم بالا، معمولاً فضای بیشتری برای نفوذ آلاینده‌ها و برهم‌کنش با آن‌ها فراهم می‌کنند که می‌تواند منجر به ظرفیت جذب بالاتری شود. این خاصیت به شدت تحت تأثیر ترکیب شیمیایی پلیمر، چگالی شبکه‌ای شدن (هرچه چگالی بیشتر باشد، تورم کمتر است) و شرایط محیطی نظیر pH و دما قرار دارد (Park و Quazi، ۲۰۲۲).

پایداری مکانیکی^۷ از اهمیت حیاتی برای کاربردهای عملیاتی، به ویژه در سیستم‌های جریان‌ی یا ستون‌های جذب، برخوردار است (Rajiman و همکاران، ۲۰۲۲). هیدروژل باید بتواند نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جریان آب را بدون فروپاشی، شکستگی یا تخریب ساختاری تحمل کند. اصلاحات شیمیایی، افزایش چگالی شبکه‌ای شدن و به خصوص، کامپوزیت کردن با نانومواد تقویت‌کننده نظیر نانوسلولز (که به دلیل استحکام کششی فوق‌العاده بالا و نسبت ابعاد بزرگ عمل می‌کند) یا نانومواد کربنی (مانند اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی)، می‌توانند به طور قابل توجهی پایداری مکانیکی هیدروژل‌ها را بهبود بخشند (Lavrentev و همکاران، ۲۰۲۳).

تخلخل و ساختار حفره‌ای نیز نقش محوری ایفا می‌کند. هیدروژل‌ها ذاتاً دارای شبکه‌ای از حفره‌ها و کانال‌ها هستند که نفوذپذیری آلاینده‌ها به درون ماتریس پلیمری را تسهیل کرده و سطح ویژه قابل دسترس برای جذب را افزایش می‌دهند. اندازه و توزیع حفره‌ها بر سرعت نفوذ آلاینده‌ها و در نتیجه بر سینتیک جذب^۸ تأثیر می‌گذارد. تکنیک‌های سنتز (مانند استفاده از پورژن‌ها یا تکنیک‌های انجماد-خشک کردن) می‌توانند برای کنترل دقیق ساختار متخلخل و بهینه‌سازی آن برای انواع خاصی از آلاینده‌ها به کار روند (Annabi و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین، فعالیت سطحی و حضور گروه‌های عاملی^۹ خاص در سطح و درون ساختار هیدروژل، عامل اصلی برهم‌کنش با آلاینده‌ها است (Alsaka و همکاران، ۲۰۲۵). گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و آمین، نقاط فعال برای پیوندهای هیدروژنی، تبادل یونی و کمپلکس‌سازی با مولکول‌ها و یون‌های آلاینده هستند. در نهایت، پایداری شیمیایی و حرارتی هیدروژل در برابر تغییرات pH، دما و حضور مواد شیمیایی مختلف در محیط آبی، برای حفظ عملکرد طولانی مدت آن بسیار مهم است. پایداری خوب تضمین می‌کند که هیدروژل در شرایط واقعی تصفیه‌خانه یا محیط طبیعی تجزیه نشده یا خواص خود را از دست ندهد (Yang و همکاران، ۲۰۲۴).

۲-۳. مکانیسم‌های حذف آلاینده‌ها

کارایی بالای هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در حذف آلاینده‌ها از آب، به فعال بودن چندین مکانیسم همزمان یا متوالی بستگی دارد که به طور هماهنگ عمل می‌کنند. این مکانیسم‌ها که در شکل (۶) نیز نشان داده شده‌اند، عبارت‌اند از:

الف) جذب سطحی: این مکانیسم بنیادی‌ترین و پرکاربردترین روش حذف آلاینده‌ها توسط هیدروژل‌ها است. در این فرآیند، مولکول‌های آلاینده از فاز مایع به سطح جامد جاذب منتقل شده و در آنجا از طریق برهم‌کنش‌های فیزیکی یا شیمیایی تثبیت می‌شوند (Ahmadian و همکاران، ۲۰۲۳).

پیوندهای هیدروژنی: گروه‌های هیدروکسیل فراوان در ساختار پلی‌ساکاریدها (سلولز، نشاسته، پکتین، آلزینات و کیتوزان) می‌توانند پیوندهای هیدروژنی قوی با گروه‌های قطبی موجود در مولکول‌های آلاینده (مانند گروه‌های آمین، کربوکسیل، سولفونیک در رنگ‌ها یا ترکیبات دارویی) تشکیل دهند. این پیوندها نیروی محرکه اصلی برای جذب بسیاری از آلاینده‌های آلی قطبی هستند (Dohendou و همکاران، ۲۰۲۱).

برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی: این نوع جذب به ویژه برای هیدروژل‌های دارای گروه‌های عاملی یونی، مانند گروه‌های آمین پروتونه شده (NH_3^+) در کیتوزان (که در pH پایین بار مثبت دارند) یا گروه‌های کربوکسیل (COOH) در آلزینات و پکتین (که در pH بالاتر بار منفی دارند)، بسیار حیاتی است

(Araque و همکاران، ۲۰۲۴). این گروه‌ها می‌توانند آلاینده‌های با بار مخالف را از طریق نیروهای جاذبه کولمبی (الکترواستاتیکی) به شدت جذب کنند. به عنوان مثال، کیتوزان به دلیل بار مثبت خود، در جذب رنگ‌های آنیونی (مانند قرمز کنگو) و آنیون‌های فلزی (مانند کرومات) بسیار مؤثر است، در حالی که آلزینات و پکتین به دلیل بار منفی، کاتیون‌های فلزات سنگین (مانند سرب، کادمیوم، مس) و رنگ‌های کاتیونی (مانند متیلن بلو) را جذب می‌کنند (Alsaka و همکاران، ۲۰۲۵).

کمپلکس‌سازی و کیلاته شدن^{۱۰}: گروه‌های عاملی موجود در زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی (به ویژه گروه‌های آمین، هیدروکسیل و کربوکسیل) دارای جفت الکترون‌های غیرمشترک هستند که می‌توانند به عنوان لیگاند‌های لوئیس عمل کرده و با یون‌های فلزات سنگین (مانند Pb^{2+} ، Cd^{2+} و Cr^{3+}) کمپلکس‌های پایدار یا ساختارهای کیلیت تشکیل دهند. این مکانیسم منجر به حذف بسیار مؤثر و گزینشی فلزات سنگین می‌شود (Alwasel و Gulcin، ۲۰۲۲).

نیروهای واندروالسی و برهم‌کنش‌های هیدروفوبیک: برای آلاینده‌های آلی غیرقطبی یا با قطبیت کم (مانند برخی ترکیبات فنولی یا داروها)، نیروهای واندروالسی (شامل نیروهای پراکندگی لاندن، نیروهای دوقطبی-دوقطبی) و برهم‌کنش‌های هیدروفوبیک می‌توانند نقش مهمی ایفا کنند، به ویژه اگر هیدروژل با بخش‌های آب‌گریز اصلاح شده باشد. این برهم‌کنش‌ها به چسبیدن مولکول‌های آلاینده به سطح هیدروژل کمک می‌کنند (Otálora و همکاران، ۲۰۲۱).
(ب) تبادل یونی^{۱۱}: این مکانیسم، نوع خاصی از جذب است که در آن یون‌های موجود در ساختار هیدروژل با یون‌های آلاینده هم‌بار در محلول مبادله می‌شوند. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی با گروه‌های عاملی یونی (نظیر کیتوزان با گروه‌های آمین پروتونه شده و آلزینات/پکتین با گروه‌های کربوکسیل) از طریق این مکانیسم عمل می‌کنند (Dharmapriya و همکاران، ۲۰۲۲).
برای مثال، گروه‌های آمین پروتونه شده کیتوزان (NH_3^+) می‌تواند با آنیون‌های فلزی (مانند دی‌کرومات و آرسنات^{۱۲}) یا رنگ‌های آنیونی (مانند قرمز کنگو) در محلول مبادله شوند. به طور مشابه، گروه‌های کربوکسیل آلزینات می‌توانند یون‌های فلزات سنگین کاتیونی (مانند Ni^{2+} یا Cd^{2+}) را با یون‌های کاتیونی موجود در ساختار (مانند Na^+ یا H^+) مبادله کنند (Darban و همکاران، ۲۰۲۲).

(ج) فیلتراسیون فیزیکی^{۱۳}: ساختار متخلخل و شبکه‌ای هیدروژل‌ها به آن‌ها امکان می‌دهد تا ذرات بزرگتر از اندازه منافذ خود را به صورت مکانیکی به دام اندازند. این مکانیسم در حذف ذرات معلق، کلوئیدها، قطرات روغن، میکروپلاستیک‌ها و حتی میکروآرگانیسم‌ها (نظیر باکتری‌ها و ویروس‌ها) از آب مؤثر است. آلاینده‌ها به سادگی در منافذ شبکه هیدروژل به دام افتاده افتاده و از جریان آب جدا

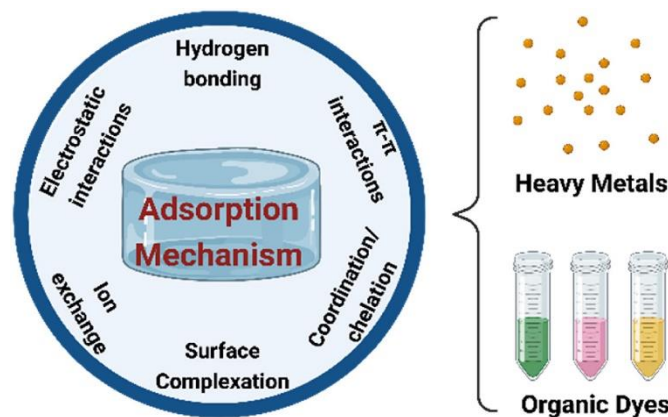
می‌شوند. این مکانیسم اغلب با جذب سطحی ترکیب می‌شود و به خصوص در مراحل اولیه تصفیه یا برای حذف آلاینده‌های جامد کاربرد دارد (Vasil'kov و همکاران، ۲۰۲۱).
(د) تخریب کاتالیزوری^{۱۴}: در هیدروژل‌های پیشرفته که با نانوذرات کاتالیزوری، مانند نانوذرات اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید روی (ZnO)، نانوذرات فلزی نظیر نقره (رادخواه و اینگدري، ۱۴۰۲) یا کامپوزیت‌های گرافن، عامل‌دار شده‌اند، آلاینده‌های آلی (مانند رنگ‌ها، ترکیبات دارویی یا فنل‌ها) می‌توانند از طریق واکنش‌های ردوکس (کاهش-اکسیداسیون) یا فتوشیمیایی (در حضور نور) به ترکیبات کمتر سمی یا کاملاً بی‌ضرر (نظیر CO_2 و H_2O) تجزیه شوند. در این حالت، هیدروژل نه تنها به عنوان یک جاذب برای متمرکز کردن آلاینده‌ها در نزدیکی سایت‌های کاتالیزوری عمل می‌کند، بلکه به عنوان یک بستر پایدار برای نانوکاتالیست‌ها نیز ایفای نقش می‌نماید و فرآیند تجزیه را تسهیل و تسریع می‌بخشد (AlMohamadi و همکاران، ۲۰۲۴).

(ه) خواص ضد میکروبی^{۱۵}: برخی پلی‌ساکاریدها مانند کیتوزان، به دلیل ماهیت کاتیونی خود، دارای خواص ضد میکروبی ذاتی هستند. گروه‌های آمین پروتونه شده کیتوزان (NH_3^+) می‌تواند با غشای سلولی میکروب‌ها (که دارای بار منفی هستند) برهم‌کنش کرده، یکپارچگی آن‌ها را بر هم زده، نفوذپذیری غشا را افزایش داده و منجر به مرگ سلول شوند (Yan و همکاران، ۲۰۲۱). این ویژگی، هیدروژل‌های مبتنی بر کیتوزان را برای ضدعفونی آب، حذف پاتوژن‌ها و جلوگیری از تشکیل بیوفیلم در سیستم‌های تصفیه بسیار مناسب می‌سازد. علاوه بر این، هیدروژل‌ها را می‌توان با عوامل ضد میکروبی دیگر مانند نانوذرات نقره یا مس، یا آنتی‌بیوتیک‌ها عامل‌دار کرد تا خاصیت ضد میکروبی آن‌ها تقویت شده و طیف وسیع‌تری از میکروآرگانیسم‌ها را هدف قرار دهند (Aranaz و همکاران، ۲۰۲۱).

در مجموع، هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکاریدها به دلیل ترکیب منحصربه‌فرد از ساختار قابل تنظیم، گروه‌های عاملی فعال و توانایی عمل از طریق مکانیسم‌های جذب چندگانه، پتانسیل عظیمی در توسعه راهکارهای نوین و پایدار برای تصفیه آب دارند (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳). درک عمیق و دقیق این مکانیسم‌ها، گامی ضروری در طراحی و بهینه‌سازی هیدروژل‌های نسل بعدی با کارایی، گزینش‌پذیری و پایداری بالاتر خواهد بود.

۳. کاربرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید در حذف انواع آلاینده‌ها از آب
هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید، به دلیل ترکیب منحصربه‌فردی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی ممتاز، شامل فراوانی گروه‌های عاملی فعال، ساختار متخلخل با سطح ویژه بالا و قابلیت سفارشی‌سازی برای برهم‌کنش‌های خاص، خود را به عنوان موادی با پتانسیل بی‌نظیر در حوزه تصفیه آب مطرح کرده‌اند (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳؛ Zhou

و همکاران، ۲۰۲۵). این ویژگی‌ها به آن‌ها اجازه می‌دهد تا به طور مؤثری طیف وسیعی از آلاینده‌های زیست‌محیطی را که تهدیدی جدی برای منابع آبی و سلامت عمومی محسوب می‌شوند، از جمله یون‌های فلزات سنگین سمی، رنگ‌های صنعتی پایدار، آلاینده‌های آلی نوظهور^{۱۶} و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، حذف کنند (Manzoor و



شکل ۶- مکانیسم‌های جذب فلزات سنگین و رنگ‌ها توسط هیدروژل‌ها (Zhu و همکاران، ۲۰۲۳)

همکاران، ۲۰۲۲). در این بخش، به بررسی جامع و تحلیلی کاربردهای متنوع این هیدروژل‌ها در مقابله با هر یک از این دسته‌های آلاینده خواهیم پرداخت و مکانیسم‌های پیچیده و چندوجهی درگیر در فرآیندهای حذف را تشریح خواهیم کرد.

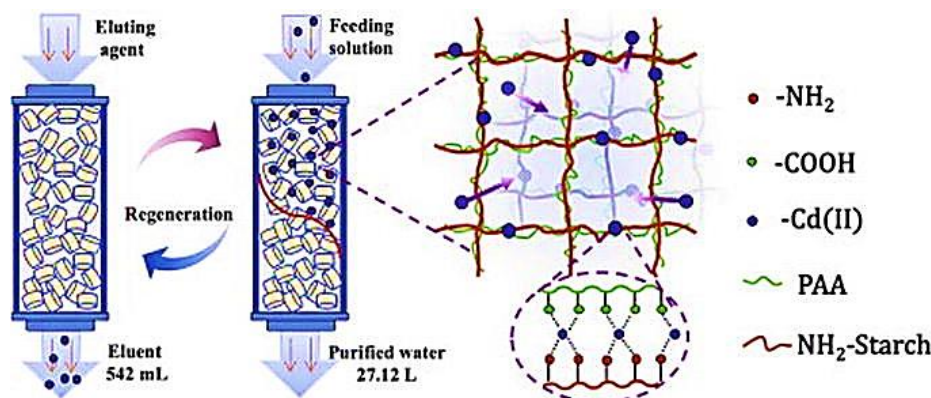
۳-۱. حذف فلزات سنگین

فلزات سنگین نظیر سرب (Pb^{2+})، کادمیوم (Cd^{2+})، کروم (Cr^{3+} و Cr^{6+})، جیوه (Hg^{2+})، مس (Cu^{2+})، نیکل (Ni^{2+}) و آرسنیک (As^{3+} و As^{5+}) از جمله خطرناک‌ترین آلاینده‌ها در محیط‌های آبی به شمار می‌روند (Tchounwou و همکاران، ۲۰۱۲). این عناصر، غیرقابل تجزیه زیستی بوده و به دلیل تجمع زیستی^{۱۷} در زنجیره غذایی و سمیت مزمن خود، خطرات جبران‌ناپذیری برای سلامت انسان، از جمله آسیب‌های عصبی، کلیوی و سرطان و همچنین تخریب گسترده اکوسیستم‌های آبی ایجاد می‌کنند (Balali-Mood و همکاران، ۲۰۲۱). هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید به دلیل وجود فراوان گروه‌های عاملی غنی از الکترون مانند هیدروکسیل (OH^-) و کربوکسیل ($COOH^-$) و یا نیتروژن مانند آمین (NH_2^- و NH_3^+)، به عنوان جاذب‌های عالی و گزینه‌ای برای یون‌های فلزات سنگین عمل می‌کنند (Mone و همکاران، ۲۰۲۰).

در ادامه، مکانیسم‌های اصلی حذف فلزات سنگین توسط این هیدروژل‌ها توضیح داده می‌شود. اولاً، کمپلکس‌سازی و کیلاته شدن مهم‌ترین و غالب‌ترین مکانیسم است. گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و آمین موجود در زنجیره‌های پلیمری، دارای جفت الکترون‌های ناپیوندی هستند که می‌توانند به عنوان لیگاندهای لوئیس عمل کرده و با یون‌های فلزات سنگین (که به عنوان اسید لوئیس عمل می‌کنند) کمپلکس‌های پایدار تشکیل دهند (Rahman و همکاران، ۲۰۲۰). به عنوان مثال، گروه‌های آمین کیتوزان و گروه‌های هیدروکسیل سلولز قادرند با یون‌های مس (Cu^{2+}) یا کادمیوم (Cd^{2+}) پیوندهای کوئوردیناسیونی قوی برقرار کرده

و آن‌ها را از محلول جدا کنند (El-Bourachdi و همکاران، ۲۰۲۵). در مورد پلی‌ساکاریدهای آنیونی مانند آلژینات و پکتین، گروه‌های کربوکسیل با ظرفیت بالا می‌توانند یون‌های فلزی را به شکل کیلت به خود جذب کنند. ثانیاً، تبادل یونی نیز نقش مهمی ایفا می‌کند، به ویژه برای پلی‌ساکاریدهای با خاصیت یونی ذاتی. کیتوزان، که در pH پایین پروتونه شده و بار کاتیونی پیدا می‌کند، می‌تواند یون‌های H^+ یا دیگر کاتیون‌های ضعیف متصل به گروه‌های آمین خود را با یون‌های فلزات سنگین کاتیونی قوی‌تر (نظیر Pb^{2+} و Cd^{2+}) مبادله کند (iddrisu و همکاران، ۲۰۲۴). به همین ترتیب، آلژینات و پکتین که دارای گروه‌های کربوکسیل با بار منفی هستند، می‌توانند یون‌های فلزات سنگین کاتیونی را با یون‌های سدیم یا کلسیم موجود در ساختار خود تبادل کنند. ثالثاً، جذب سطحی فیزیکی از طریق نیروهای واندروالسی و پیوندهای هیدروژنی نیز ممکن است در فرآیند جذب فلزات سنگین نقش فرعی داشته باشد، اگرچه قدرت و گزینش‌پذیری آن به اندازه کمپلکس‌سازی و تبادل یونی نیست (Upadhyay و همکاران، ۲۰۲۲).

دو فرآیند اصلی دخیل در حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب توسط هیدروژل‌ها، انتشار و جاذبه‌های الکترواستاتیکی هستند. فرآیند انتشار باعث نفوذ یون‌ها به داخل شبکه هیدروژل از طریق گرادیان غلظت می‌شود، در حالی‌که گروه‌های یونیزه شونده، همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، یک جاذبه الکترواستاتیکی با یون‌های فلزات سنگین ایجاد می‌کنند و آن‌ها را از محیط آبی با مکانیسم جاذبه حذف می‌کنند (Zhou و همکاران، ۲۰۱۶؛ Rehman و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۷- مکانیسم جذب، برهمکنش و بازسازی شبکه هیدروژل با یون‌های فلزات سنگین و فرآیند حذف (Zhou و همکاران، ۲۰۱۶؛ Rehman و همکاران، ۲۰۲۱)

بالایی داشته‌اند. این در حالی است که اگرچه آلزینات قابلیت بازیابی خوبی داشته است، اما پایداری مکانیکی/شیمیایی آن در pH پایین، متوسط ارزیابی شده است. با توجه به این شرایط، آلزینات ظرفیت جذب خوبی در حذف فلزاتی مانند مس و کادمیوم داشته است. در مورد نشاسته نیز تقریباً همین موضوع صادق است، به‌طوری‌که پایداری مکانیکی/شیمیایی این پلی‌ساکارید، متوسط ارزیابی شده است، اما ظرفیت جذب خوبی در حذف فلزات سرب و روی نشان داده است. در بین پلی‌ساکاریدهای مورد بررسی، پکتین قابلیت بازیابی ضعیف و پایداری مکانیکی/شیمیایی پایینی در دماهای بالا داشته است و علاوه بر این، ظرفیت جذب آن در حذف مس در مقایسه با سایر پلی‌ساکاریدها پایین بوده است.

در جدول (۳) ظرفیت جذب فلزات سنگین توسط هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی مختلف در شرایط متفاوت مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت آلزینات-سیلیکا با ظرفیت جذب ۳۸۹/۸ میلی‌گرم بر گرم برای سرب بهترین عملکرد را دارد و مدل لانگمویر به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تمامی هیدروژل‌ها شناخته شده است.

۳-۲. حذف رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی نوظهور

پساب‌های حاوی رنگ‌های صنعتی از صنایع نساجی، چرم‌سازی، کاغذسازی و پلاستیک، به دلیل ساختار پیچیده، مقاومت بالا در برابر تجزیه زیستی و زیبایی‌شناسی ناخوشایند، از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی آب هستند (Al-Tohamy و همکاران، ۲۰۲۲). در شکل (۸) طبقه‌بندی رنگ‌های مصنوعی بر اساس بار الکتریکی آن‌ها نشان داده شده است که بیانگر ساختار پیچیده آن‌ها می‌باشد. علاوه بر این، ظهور و شناسایی آلاینده‌های آلی نوظهور نظیر ترکیبات دارویی فعال (مانند آنتی‌بیوتیک‌ها، داروهای ضد التهاب)، محصولات مراقبت شخصی، آفت‌کش‌ها، بیسفنول-A و فنل‌ها، حتی در غلظت‌های پایین، نگرانی‌های جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها ایجاد کرده است (Masanga و

تحقیقات اخیر نشان داده است که هیدروژل‌های کیتوزان و مشتقات آن، به دلیل ظرفیت بالای گروه‌های آمین برای کمپلکس‌سازی، برای حذف فلزاتی مانند Cu^{2+} ، Ni^{2+} و Pb^{2+} و Cd^{2+} بسیار مؤثر بوده‌اند (Zhang و همکاران، ۲۰۲۱). با اصلاح کیتوزان با گروه‌های عاملی نظیر تیول (SH-) که میل ترکیبی بالایی با فلزات نرم (مانند جیوه و سرب) دارند، یا گروه‌های کربوکسیل، می‌توان گزینش‌پذیری و ظرفیت جذب برای فلزات خاص را به طرز چشمگیری افزایش داد. به طور مشابه، هیدروژل‌های آلزینات و پکتین به دلیل گروه‌های کربوکسیل فراوان، برای جذب کاتیون‌های فلزات سنگین از جمله Pb^{2+} ، Cd^{2+} و Co^{2+} کارایی بالایی از خود نشان داده‌اند. به عنوان مثال، آلزینات کلسیم به طور خاص برای حذف یون‌های سرب و کادمیوم از محلول‌های آبی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است (Grant و همکاران، ۱۹۷۳؛ Martínez-Sabando و همکاران، ۲۰۲۳). حتی هیدروژل‌های مبتنی بر سلولز و نانوسلولز نیز، با عامل‌دار کردن گروه‌های هیدروکسیل فراوان آن‌ها با گروه‌های آمین، کربوکسیل یا سولفونیک، می‌توانند به جاذب‌های قدرتمندی برای فلزات سنگین تبدیل شوند. نانوسلولزها، به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا و تعداد بیشتر سایت‌های فعال، ظرفیت جذب بالاتری نسبت به سلولز خام یا میکروکریستالی دارند (Si و همکاران، ۲۰۲۲). ترکیب پلی‌ساکاریدها با نانوذرات مغناطیسی (مانند Fe_3O_4) نیز منجر به تولید هیدروژل‌های کامپوزیتی مغناطیسی می‌شود که پس از جذب فلزات سنگین، به راحتی توسط یک میدان مغناطیسی خارجی از محلول جدا شده و بازیابی می‌شوند، که این امر به شدت کارایی و اقتصاد فرآیند تصفیه را بهبود می‌بخشد (Si و همکاران، ۲۰۲۲). در جدول (۲) مقایسه عملکرد هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی مختلف در جذب فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. بر طبق نتایج حاصل از این جدول، پایداری مکانیکی/شیمیایی کیتوزان و سلولز در حذف فلزاتی مانند کروم، آرسنیک، سرب، جیوه، مس و نیکل، عالی بوده است. از طرف دیگر، پلی‌ساکاریدهای مذکور قابلیت بازیابی بسیار خوب و ظرفیت جذب بسیار

[همکاران، ۲۰۲۴؛ Rauseo و همکاران، ۲۰۲۵](#)). این ترکیبات می‌توانند مختل‌کننده غدد درون‌ریز باشند و اثرات مزمن بر سلامت موجودات زنده داشته باشند. هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی به دلیل داشتن گروه‌های عاملی فعال متنوع،

ساختار متخلخل و قابلیت اصلاح‌پذیری، جاذب‌های مؤثری برای این دسته از آلاینده‌ها هستند ([Al-Tohamy و همکاران، ۲۰۲۲](#)).

جدول ۲- مقایسه عملکرد هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی مختلف در جذب فلزات سنگین (Ghiorghita و همکاران، ۲۰۲۲؛ Wu و همکاران، ۲۰۲۵)

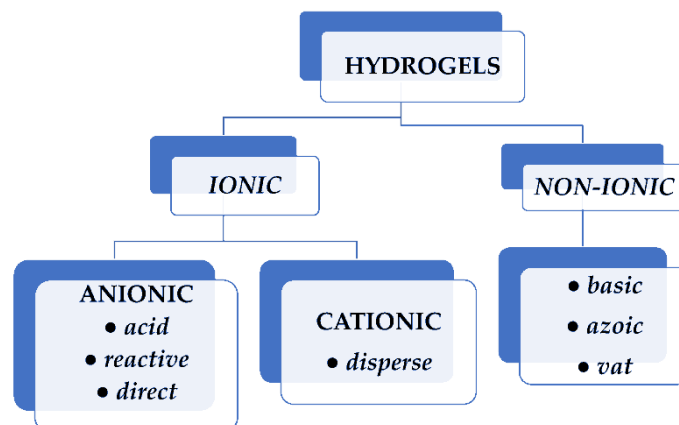
ملاحظات و کاربردهای کلیدی	قابلیت بازیابی و استفاده مجدد	پایداری مکانیکی/شیمیایی	زمان تعادل (تقریبی)	فلز هدف (ظرفیت جذب تقریبی- (mg/g)	ترکیب/مواد اصلاحی	پلی‌ساکارید پایه
جذب مغناطیسی: جداسازی آسان، زیست‌سازگاری بالا.	عالی (با اسید رقیق)	خوب (در pH مختلف)	۶۰-۹۰ دقیقه	سرب (Pb^{2+}) ۱۲۰~	نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4)	آگاروز
ارزان و در دسترس: برای تصفیه آب در مقیاس بزرگ مناسب است.	خوب (با اسید رقیق)، تا ۴ چرخه با کارایی مناسب	متوسط (در pH پایین تجزیه می‌شود)	۳۰-۶۰ دقیقه	مس (Cu^{2+}) ۱۵۰ کادمیم (Cd^{2+}) ۱۳۰~	کلسیم کلرید (ژلاسیون)، نانوذرات	آلژینات
ذاتاً کاتیونی: برای آنیون‌ها (مانند کرومات) عالی است. ضد میکروب.	بسیار خوب (با NaOH رقیق)، تا ۵ چرخه یا بیشتر	عالی (پایداری حرارتی خوب)	۶۰-۱۲۰ دقیقه	کروم (Cr^{6+}) ۱۸۰~ آرسنیک (As^{5+}) ۱۰۰~	بیوپلیمر (کاتیونی)	کیتوزان
ظرفیت بسیار بالا: ترکیب با نانومواد، سطح ویژه و مکان‌های فعال را افزایش می‌دهد.	عالی (با اسید رقیق)	بسیار عالی (استحکام مکانیکی بالا)	۴۰-۸۰ دقیقه	سرب (Pb^{2+}) ۳۵۰~ جیوه (Hg^{2+}) ۳۰۰~	گرافن اکساید (GO)	کیتوزان
پایدار و ارزان: پایداری عالی در محیط‌های مختلف. زیست‌تخریب‌پذیر.	خوب (با EDTA یا اسید)، اما ممکن است متورم شود	عالی (بسیار پایدار)	۹۰-۱۵۰ دقیقه	مس (Cu^{2+}) ۸۰~ نیکل (Ni^{2+}) ۷۰~	مشتقات (مثلاً) کربوکسی متیل سلولز	سلولز
کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر: بسیار ارزان. اما پایداری مکانیکی پایین‌تری دارد.	متوسط (با اسید)، ممکن است پس از چند چرخه تخریب شود	متوسط به خوب	۵۰-۱۰۰ دقیقه	سرب (Pb^{2+}) ۲۰۰~ روی ۱۵۰ (Zn^{2+}) ~	آکریل آمید (گرافت کوپلیمر)	نشاسته
توانایی تشکیل ژل با یون‌های کلسیم، زیست‌تخریب‌پذیری	ضعیف تا متوسط	ضعیف (در دماهای بالا)	۳۰-۶۰ دقیقه	مس (Cu^{2+}) ~ ۸۵	هیدروژل پکتین- پلی(وینیل الکل)	پکتین

جدول ۳- مقایسه ظرفیت جذب فلزات سنگین توسط هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی مختلف در شرایط متفاوت (Zhao و همکاران، ۲۰۲۳)

پلی‌ساکارید	نوع هیدروژل/اصلاح‌شده	فلز سنگین هدف	ظرفیت جذب (mg/g)	شرایط بهینه	مدل ایزوترم برتر
کیتوزان	نانوکامپوزیت کیتوزان-مگه‌مایت	Cr(VI)	۲۵۰	pH=۳	لانگمویر
کیتوزان	هیدروژل کیتوزان-خاکستر بادی	Cr(VI)	۳۵/۲	pH=۲	لانگمویر
کیتوزان	نانوذرات کیتوزان-PMMA	Cd(II)	۹۲/۶	pH=۶	لانگمویر
کیتوزان	میکروسفرهای کیتوزان	Cu(II)	۸۱/۲	-	لانگمویر
آلژینات	هیدروژل آلژینات کلسیم	Cu(II)	۸۸/۹	-	لانگمویر
آلژینات	نانوکامپوزیت آلژینات-سیلیکا	Pb(II)	۳۸۹/۸	-	لانگمویر
آلژینات	نانوذرات آلژینات	Cd(II)	۱۲۷/۵	pH=۶	لانگمویر
سلولز	نانوالیاف سلولز	Pb(II)	۲۸۸/۵	-	لانگمویر
سلولز	نانوبلورهای سلولز	Cu(II)	۸۰/۱	-	لانگمویر
نشاسته	هیدروژل نشاسته-اکریلیک اسید	Pb(II)	۱۵۶/۸	pH=۵	لانگمویر

در مکانیسم‌های اصلی حذف رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی نوظهور، در درجه اول جذب سطحی الکترواستاتیکی برای رنگ‌های یونی (آنیونی یا کاتیونی) نقش اساسی دارد ([Arfi و همکاران، ۲۰۱۷](#)). در جدول‌های (۴)، (۵) و (۶) به ترتیب

عملکرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکاریدهای سلولز، نشاسته و کیتوزان در جذب رنگ‌ها از محلول‌های آبی نشان داده شده است.



شکل ۸- طبقه‌بندی رنگ‌های مصنوعی بر اساس بار الکتریکی آن‌ها (Teacă و Stanciu, ۲۰۲۴)

کامپوزیت‌ها، سطح ویژه بالا و وجود سیستم‌های الکترونی π ، جذب آلاینده‌های آروماتیک را به شدت تقویت می‌کند (Ramakrishnan و همکاران، ۲۰۲۱).

علاوه بر جذب، در برخی موارد تخریب کاتالیزوری نیز می‌تواند اتفاق بیفتد. این حالت عمدتاً در هیدروژل‌های کامپوزیتی که با نانوذرات کاتالیزوری (مانند ZnO ، TiO_2)، نانوذرات فلزی نظیر Ag یا Au ، یا کامپوزیت‌های $\text{Ag/Fe}_3\text{O}_4$ عامل‌دار شده‌اند، مشاهده می‌شود. این نانوکاتالیست‌ها می‌توانند آلاینده‌های آلی را از طریق فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته یا واکنش‌های فتوکاتالیزوری (در حضور نور) به ترکیبات غیرسمی یا کاملاً معدنی (نظیر CO_2 و H_2O) تجزیه کنند. در این سیستم‌ها، هیدروژل به عنوان یک بستر پایدار عمل می‌کند که نانوکاتالیست‌ها را لنگر انداخته و به متمرکز کردن آلاینده‌ها در نزدیکی سایت‌های فعال کاتالیزوری کمک می‌کند. هیدروژل‌های کامپوزیتی پلی‌ساکارید/اکسید گرافن، به دلیل سطح ویژه بالا و برهم‌کنش‌های قوی، کارایی فوق‌العاده‌ای در حذف آلاینده‌های آلی نوظهور نظیر بیسفنول-A، داروهای ضد التهاب و آنتی‌بیوتیک‌ها از خود نشان داده‌اند (Ramírez و همکاران، ۲۰۲۴).

بر طبق نتایج به‌دست آمده از این جدول‌ها، کیتوزان، با گروه‌های آمین پروتونه شده و بار مثبت خود، به طور استثنایی در جذب رنگ‌های آنیونی (مانند قرمز کنگو، متیل اورنج، اورنج G) کارآمد است (جدول ۶). در مقابل، سلولز و نشاسته جاذب‌های عالی برای رنگ‌های کاتیونی (نظیر متیلن بلو، بنفش کریستالی، رودامین B) به شمار می‌روند (Shen و Zhao، ۲۰۲۳). این در حالی است که در مورد سایر هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکاریدهایی مانند آلژینات و پکتین که دارای گروه‌های کربوکسیل منفی می‌باشند، نیز همین مسئله صادق است. علاوه بر این، پیوندهای هیدروژنی نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند، چرا که بسیاری از رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی نوظهور دارای گروه‌های عاملی قطبی (OH ، NH_2 ، COOH ، SO_3H) هستند که می‌توانند با گروه‌های هیدروکسیل و آمین در هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی پیوندهای هیدروژنی برقرار کرده و جذب شوند. ثالثاً، برای مولکول‌های آلی بزرگ و آروماتیک (که بسیاری از رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی نوظهور جزو این دسته هستند)، نیروهای واندروالسی و برهم‌کنش‌های پی-پی^{۱۸} می‌توانند نقش مهمی در جذب ایفا کنند، به خصوص اگر هیدروژل با مواد کربنی (مانند اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی یا کربن فعال) ترکیب شده باشد. در این

جدول ۴- عملکرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید سلولز در جذب رنگ‌ها از محلول‌های آبی (Teacă و Stanciu، ۲۰۲۴)

توانایی حذف رنگ	رنگ	جاذب
۷۳۴/۸ میلی‌گرم بر گرم	متیلن بلو (MB)	cellulose-g-PAM
۸۲ درصد	متیلن اورنج (MO)	CMC-g-PAA
۳۰۰۳ میلی‌گرم بر گرم	متیلن بلو (MB)	acryloyl cellulose-g-PAA
۱۲ میلی‌گرم بر گرم	متیلن اورنج (MO)	cellulose-g-CDNMA
۱۰۵۳/۸ میلی‌گرم بر گرم	قرمز کنگو (CR)	CS/CMC-PEG
۹۶/۴۳ میلی‌گرم بر گرم	بنفش متیل (MV)	CMC/g-C ₃ H ₄ /ZnO
۷۶ درصد	بنفش کریستالی (CV)	HPMC-g-PAM/NaMMT
۱۳۷ میلی‌گرم بر گرم	رودامین B (RhB)	CdS/QDs
۳۱۴ میلی‌گرم بر گرم	سبز مالاکیت (MG)	cellulose/Sep
۱۸۵/۵ میلی‌گرم بر گرم	آبی اسیدی ۱۳۳ (AB 133)	CMC/AM/GO
۱۷۲/۱۴ میلی‌گرم بر گرم	متیلن بلو (MB)	PVA/CMC/GO/BNTN
۱۸۰/۳۲ میلی‌گرم بر گرم	متیلن بلو (MB)	CMC/c-GO

جدول ۵- عملکرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید نشاسته (ST) در جذب رنگ‌ها از محلول‌های آبی (Teacă و Stanciu، ۲۰۲۴)

جاذب	رنگ	توانایی حذف رنگ
(CMST-g-PVIm/PVA/Fe ₃ O ₄)	بنفش کریستالی (CV)	۹۱/۵۸ میلی‌گرم بر گرم
Fe ₃ O ₄ /ST-g-PAA	بنفش متیل (MV)	۳۱/۸۴ میلی‌گرم بر گرم
ST phosphate	بنفش کریستالی (CV)	۹۹ درصد
Succinylated ST	متیل اورنج (MO)	۲۰ درصد
ST@PAA	قرمز کنگو (CR)	۶۴/۷۳ میلی‌گرم بر گرم
ST/HA	متیلن بلو (MB)	۱۱۱/۱۰ میلی‌گرم بر گرم
ST-g-P(AMPS-co-DMAEMA)/benzyl chloride	بنفش پایه ۷ (BV 7)	۶۰۰ میلی‌گرم بر گرم
MST	متیلن بلو (MB)	۷۰ میلی‌گرم بر گرم
VST	متیلن بلو (MB)	۸۱ میلی‌گرم بر گرم
ST-g-PAM/GO/HAp	سبز مالاکیت (MG)	۲۹۷ میلی‌گرم بر گرم
ST-g-P(AA-co-AMPS)/GO	متیلن بلو (MB)	۷۶۹ میلی‌گرم بر گرم
succinylated ST	متیلن بلو (MB)	۸۴ میلی‌گرم بر گرم
GST	متیلن بلو (MB)	۷۵ میلی‌گرم بر گرم
(CMST-g-PVIm/PVA/Fe ₃ O ₄)	قرمز کنگو (CR)	۸۳/۶۶ میلی‌گرم بر گرم

جدول ۶- عملکرد حذف رنگ برخی از هیدروژل‌های مبتنی بر کیتوزان (CS) و کیتین در جذب رنگ‌ها از محلول‌های آبی (Teacă و Stanciu، ۲۰۲۴)

جاذب	رنگ	توانایی حذف رنگ
(AA-co-CS/P (AM	متیل اورنج (MO)	۹۰ درصد کارایی
Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ /CS-g-PAMPS	متیلن بلو (MB)	۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر
CS-g-EDA/CS-g-MA	قرمز کنگو (CR)	۱۶۰۷ میلی‌گرم بر گرم
CS-g-P(AM-co-NaMA)	فوکسین (Fuchsin)	۹۷ درصد کارایی
CS/MMT	قرمز واکنشی ۱۳۶ (RR 136)	۴۷۳ میلی‌گرم بر گرم
Fe ₃ O ₄ @CS/P(AAM/NVIm)	متیلن بلو (MB)	۸۶۰ میلی‌گرم بر گرم
CS/Ag-HAp	رودامین B (RhB)	۱۲۷ میلی‌گرم بر گرم
CS-gelatin/ZnO	قرمز کنگو (CR)	۹۰/۸ درصد کارایی
CS/PVA/PAA	متیلن بلو (MB)	۵۹۶ میلی‌گرم بر گرم
CS/nano-ZnO	مشکی واکنشی ۵ (RB 5)	۱۸۹/۴۵ میلی‌گرم بر گرم
CS/TETA-GO	آبی واکنشی ۲۲۱ (RB 221)	۵۴/۲ میلی‌گرم بر گرم
chitin-TRGO	قرمز کنگو (CR)	۲۳۰/۵ میلی‌گرم بر گرم
CS/PA/GO	زرد خوراکی ۳ (FY 3)	۲۹۶/۵ میلی‌گرم بر گرم

۳-۳. حذف میکروارگانیسم‌ها و خواص ضد میکروبی

حضور میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا نظیر باکتری‌ها (مانند جنس سالمونلا^{۱۹} و *Escherichia coli*)، ویروس‌ها و پروتوزوآها در آب، یکی از مهم‌ترین و فوری‌ترین نگرانی‌ها برای سلامت عمومی است. هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی، به ویژه آن‌هایی که از کیتوزان مشتق شده‌اند، به دلیل خواص ضد میکروبی ذاتی خود و یا با عامل‌دار کردن با ترکیبات ضد میکروبی، می‌توانند نقش حیاتی در ضد عفونی آب و حذف بیوپاتوژن‌ها ایفا کنند (Cabral، ۲۰۱۰).

در مکانیسم‌های اصلی حذف میکروارگانیسم‌ها، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی به خصوص برای کیتوزان بسیار مهم است. کیتوزان، با گروه‌های آمین پروتونه شده خود، دارای بار مثبت است که می‌تواند با غشای سلولی میکروب‌ها (که معمولاً دارای بار منفی هستند) برهم‌کنش الکترواستاتیکی ایجاد کند. این برهم‌کنش منجر به اختلال در یکپارچگی غشای سلولی، افزایش نفوذپذیری آن و در نهایت نشت محتویات درون سلولی و مرگ باکتری می‌شود.

(Ke و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، کیتوزان می‌تواند فرآیندهای متابولیکی درون سلولی را نیز مختل کند. مکانیسم دیگر، چسبندگی و به دام انداختن فیزیکی است. ساختار متخلخل هیدروژل قادر است میکروارگانیسم‌های بزرگتر از اندازه منافذ خود را به صورت مکانیکی به دام اندازد و از جریان آب جدا کند. این مکانیسم مکمل خواص ضد میکروبی شیمیایی است (Desai و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، هیدروژل‌ها می‌توانند به عنوان حامل‌های هوشمند برای آزادسازی کنترل‌شده عوامل ضد میکروبی عمل کنند. نانوذرات فلزی به ویژه نانوذرات نقره و مس، به دلیل خواص ضد میکروبی گسترده و توانایی آسیب رساندن به دیواره سلولی و DNA باکتری‌ها (زادخواه و صادقی‌نژاد، ۱۴۰۰)، به طور فزاینده‌ای با هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی ترکیب می‌شوند. این نانوذرات به تدریج در آب آزاد شده و میکروارگانیسم‌ها را از بین می‌برند و به پایداری خواص ضد میکروبی هیدروژل کمک می‌کنند (Ahmad و همکاران، ۲۰۲۴). هیدروژل‌های کامپوزیتی

شفافیت آب را افزایش دهند. این کاربرد به ویژه در مراحل پیش تصفیه آب یا برای تصفیه آب‌های سطحی با بار ذرات بالا مفید است (Maldonado و Ochoa-Amo, ۲۰۲۱).

ج) جذب روغن و چربی: با اصلاح سطح پلی ساکاریدها به گونه‌ای که بخش‌های آبگریز^{۲۲} به آن‌ها اضافه شود، می‌توان هیدروژل‌هایی تولید کرد که قادر به جذب انتخابی روغن و چربی از پساب‌های صنعتی یا در موارد آلودگی‌های نفتی باشند. این هیدروژل‌ها می‌توانند به عنوان جاذب‌های انتخابی برای تفکیک فاز روغن از آب عمل کنند (Sharma و همکاران, ۲۰۲۴).

د) جداسازی گازها: در برخی موارد خاص، هیدروژل‌های پلی ساکاریدی می‌توانند در جداسازی گازهای محلول در آب نیز کاربرد داشته باشند (Nath و همکاران, ۲۰۲۴).

ه) سنجش و تشخیص: برخی هیدروژل‌های هوشمند می‌توانند به عنوان حسگرهای زیستی یا شیمیایی عمل کرده و در حضور آلاینده‌های خاص، تغییرات قابل اندازه‌گیری (نظیر تغییر رنگ، حجم یا خواص الکتریکی) از خود نشان دهند که امکان تشخیص سریع آلاینده‌ها را فراهم می‌کند (Liu و همکاران, ۲۰۲۳).

به طور خلاصه، هیدروژل‌های پلی ساکاریدی به دلیل تطبیق‌پذیری بی‌نظیرشان، ناشی از توانایی در سنتز با خواص متنوع، اصلاح‌پذیری شیمیایی گسترده و فعال بودن مکانیسم‌های حذف چندگانه، به عنوان موادی ایده‌آل و پایدار برای کاربردهای چندگانه در تصفیه آب مطرح شده‌اند (Sharma و همکاران, ۲۰۲۴). تحقیقات آتی در این حوزه بر توسعه هیدروژل‌های با گزینش‌پذیری بالاتر برای آلاینده‌های خاص، ظرفیت جذب بیشتر، قابلیت استفاده مجدد آسان‌تر، پایداری درازمدت در شرایط عملیاتی سخت و کاهش هزینه‌های تولید متمرکز خواهد بود تا پتانسیل کامل این مواد زیست‌دوست در مقیاس صنعتی محقق شود.

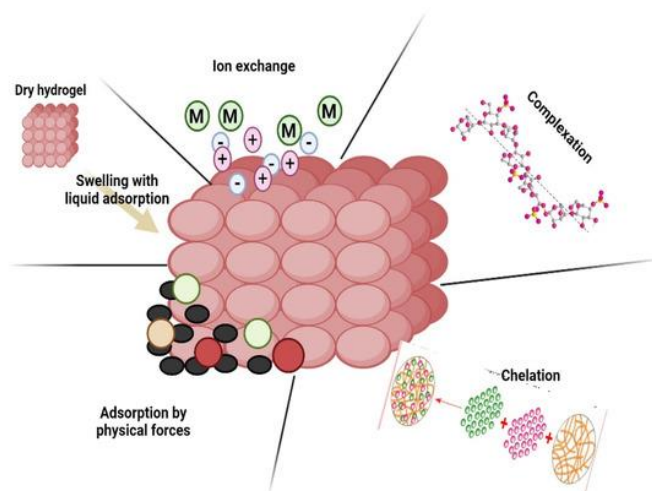
کیتوزان/نانوذرات نقره، کارایی بسیار بالایی در حذف طیف وسیعی از باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی (مانند *E. coli* و *Staphylococcus aureus*) از خود نشان داده‌اند و پتانسیل کاربرد در فیلترهای آب آشامیدنی را دارند (Akdasci و همکاران, ۲۰۲۵). عامل‌دار کردن پلی ساکاریدها با گروه‌های آمونیوم چهار ظرفیتی^{۲۰} که دارای بار مثبت دائمی هستند، نیز می‌تواند خاصیت ضد میکروبی آن‌ها را حتی در pH خنثی و بالاتر تقویت کند (Ahmad و همکاران, ۲۰۲۴).

۳-۴. حذف سایر آلاینده‌ها و کاربردهای چندگانه

تطبیق‌پذیری هیدروژل‌های پلی ساکاریدی فراتر از حذف فلزات سنگین، رنگ‌ها و میکروارگانیسم‌ها است و شامل قابلیت حذف سایر آلاینده‌ها و کاربردهای چندگانه می‌شود. لازم به ذکر است که مکانیسم‌های مختلفی برای حذف آلاینده‌ها توسط هیدروژل‌ها وجود دارد که در شکل (۹) به طور خلاصه نشان داده شده است. از طریق این مکانیسم‌ها، امکان حذف مواد مختلف مانند آنیون‌ها، ذرات معلق، حذف روغن و چربی، جداسازی گازها و غیره امکان‌پذیر است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود:

الف) حذف آنیون‌ها: آلاینده‌هایی نظیر فسفات، نترات و فلوئورید، که اغلب از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی ناشی می‌شوند، می‌توانند منجر به پدیده‌هایی مانند یوتروفیکاسیون^{۲۱} و خطرات سلامتی شوند. هیدروژل‌های مبتنی بر کیتوزان یا هیدروژل‌های پلی ساکاریدی اصلاح شده با گروه‌های بار مثبت (مانند آمین‌های چهارتایی) می‌توانند این آنیون‌ها را از طریق تبادل یونی یا برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی جذب کنند (Li و همکاران, ۲۰۲۵).

ب) حذف ذرات معلق و کاهش کدورت: ساختار متخلخل هیدروژل‌ها، آن‌ها را به فیلترهای فیزیکی مؤثری تبدیل می‌کند. این هیدروژل‌ها می‌توانند به طور کارآمدی ذرات معلق، کلوئیدها و مواد مولد کدورت را به دام اندازند و



شکل ۹- مکانیسم‌های دخیل در حذف آلاینده‌ها با هیدروژل‌ها (Alsaka و همکاران, ۲۰۲۵)

۵-۳. تحلیل انتقادی و مقایسه عملکرد پلی ساکاریدهای مختلف

در تحلیل انتقادی عملکرد پلی ساکاریدهای مختلف در هیدروژل‌های تصفیه آب، باید به بررسی مقایسه‌ای ویژگی‌های کلیدی هر پلی ساکارید پرداخت. کیتوزان به دلیل دارا بودن گروه‌های آمینو و بار کاتیونی ذاتی، گزینه‌ای ایده‌آل برای جذب فلزات سنگین و رنگ‌های آنیونی محسوب می‌شود. با این حال، این پلی ساکارید در محیط‌های اسیدی مقاومت کمتری داشته و ممکن است دچار تخریب شود. از سوی دیگر، هیدروژل‌های مبتنی بر آلژینات به دلیل سهولت تشکیل ژل با یون‌های کلسیم و ساختار متخلخل، برای انکپسوله‌سازی و جذب انتخابی برخی آلاینده‌ها مناسب هستند، اما استحکام مکانیکی پایین آن‌ها از محدودیت‌های اصلی محسوب می‌شود (Zhang و همکاران، ۲۰۲۰، ۲۰۲۲).

سلولز و مشتقات آن به دلیل فراوانی، هزینه پایین و وجود گروه‌های هیدروکسیل فعال، پتانسیل بالایی در توسعه هیدروژل‌های مقرون به صرفه دارند. با این وجود، حلالیت پایین و واکنش‌پذیری محدود سلولز خام، نیازمند انجام اصلاحات شیمیایی پیچیده برای بهبود عملکرد است. پکتین به عنوان یک پلی ساکارید آنیونی با قابلیت تشکیل ژل در حضور یون‌های کلسیم، برای جذب فلزات سنگین کاتیونی مناسب است، اما حساسیت بالا به pH محیط و پایداری کم در شرایط قلیایی از موانع استفاده گسترده از آن می‌باشد (Dohendou و همکاران، ۲۰۲۱).

صمغ زانتان با داشتن گروه‌های کربوکسیل و استال پیرووات، می‌تواند کمپلکس‌های پایدار با فلزات سنگین تشکیل دهد، اما ویسکوزیته بالای محلول‌های آن، فرآیند تولید هیدروژل را با چالش مواجه می‌کند. نشاسته نیز به عنوان یک پلی ساکارید کم‌هزینه و زیست‌تخریب‌پذیر، قابلیت بالایی در اصلاح شیمیایی دارد، اما تورم محدود آن در آب، پایداری فیزیکی هیدروژل‌های نشاسته‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مقایسه عملکرد این پلی ساکاریدها می‌توان گفت که کیتوزان و آلژینات به طور معمول بالاترین ظرفیت جذب را برای فلزات سنگین نشان می‌دهند، در حالی که سلولز اصلاح‌شده به دلیل سطح ویژه بالا برای جذب رنگ‌ها و ترکیبات آلی مناسب‌تر است. از نظر پایداری فیزیکی و مکانیکی، هیدروژل‌های مبتنی بر سلولز و صمغ زانتان عملکرد بهتری دارند، در حالی که هیدروژل‌های کیتوزان و آلژینات از انعطاف‌پذیری ساختاری بالاتری برخوردار هستند (Huang و همکاران، ۲۰۲۳).

از دیدگاه اقتصادی، نشاسته و سلولز به دلیل هزینه پایین و فراوانی، گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای مقیاس بزرگ هستند، در حالی که کیتوزان و آلژینات با وجود عملکرد بهتر، هزینه تولید بالاتری دارند. همچنین از نظر سهولت فرآیند تولید، آلژینات و کیتوزان به دلیل حلالیت بهتر در آب، فرآیند تولید ساده‌تری دارند، در حالی که سلولز و

نشاسته معمولاً نیازمند مراحل اصلاح شیمیایی پیچیده‌تری هستند (Zhao و همکاران، ۲۰۲۳).

در نهایت، انتخاب بهینه پلی ساکارید برای کاربردهای تصفیه آب باید بر اساس نوع آلاینده هدف، شرایط عملیاتی و ملاحظات اقتصادی صورت پذیرد. توسعه هیدروژل‌های کامپوزیتی با ترکیب چند پلی ساکارید مختلف، می‌تواند راهکاری برای غلبه بر محدودیت‌های هر ماده و دستیابی به عملکرد برتر باشد. چنین رویکردی می‌تواند مزایای هر پلی ساکارید را ترکیب کرده و هیدروژل‌هایی با خواص بهبودیافته تولید نماید.

۴. جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی توسعه هیدروژل‌های پلی ساکاریدی

توسعه و به کارگیری فناوری‌های نوین در هر حوزه‌ای، از جمله تصفیه آب، تنها زمانی به یک راه حل جامع و پایدار تبدیل می‌شود که علاوه بر نوآوری‌های فنی و پیشرفت‌های علمی، جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی آن نیز به دقت مورد ارزیابی و تأیید قرار گیرد. یک راهکار پایدار، باید هم از منظر اقتصادی توجیه‌پذیر بوده و مزایایی ملموس برای ذی‌نفعان داشته باشد و هم از دیدگاه زیست‌محیطی، برتری‌های فاحشی نسبت به روش‌های موجود از خود نشان دهد (Ramakrishnan و همکاران، ۲۰۲۱). برای کشوری مانند ایران، که همواره با چالش‌های مضاعف کم‌آبی، خشکسالی‌های پیایی و آلودگی فزاینده منابع آبی دست و پنجه نرم می‌کند، تحلیل دقیق و همه‌جانبه این ابعاد، نقش کلیدی در هموار ساختن مسیر برای سرمایه‌گذاری‌های آتی، تدوین سیاست‌گذاری‌های دولتی مؤثر و پذیرش گسترده صنعتی ایفا می‌کند. این بخش به تفصیل به بررسی این جنبه‌های حیاتی می‌پردازد تا تصویر کاملی از پتانسیل هیدروژل‌های مبتنی بر پلی ساکارید در حرکت به سوی آینده‌ای با آب پاک و فراوان ترسیم شود.

۴-۱. مزایای اقتصادی

یکی از قانع‌کننده‌ترین و مهم‌ترین مزایای اقتصادی توسعه و به کارگیری هیدروژل‌های پلی ساکاریدی در ایران، کاهش چشمگیر و قابل توجه هزینه‌های تأمین مواد اولیه است (Ali و همکاران، ۲۰۲۴). این پلیمرهای زیستی، برخلاف بسیاری از مواد شیمیایی سنتتیک و جاذب‌های وارداتی که قیمت بالایی دارند، عمدتاً از پسماندهای کشاورزی و صنایع شایلات کشورمان استخراج می‌شوند. تصور کنید: سالانه میلیون‌ها تن پسماند کشاورزی نظیر کاه گندم و برنج، ساقه و برگ ذرت، تفاله میوه‌ها (مانند سیب، پرتقال و خرما) و همچنین ضایعات حجیم صنایع شایلات (به‌ویژه پوست میگو و خرچنگ غنی از کیتین) تولید می‌شود. بخش عمده‌ای از این پسماندها در حال حاضر یا بدون استفاده

۲-۴. مزایای محیط زیستی

برتری‌های زیست‌محیطی هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی، وجه تمایز اصلی و دلیل اساسی گرایش فزاینده جهانی به سمت این مواد در مقایسه با بسیاری از مواد تصفیه آب سنتی و پلیمرهای سنتتیک است (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳). در رأس این مزایا، منشأ کاملاً تجدیدپذیر و زیست‌تخریب‌پذیری کامل و بی‌خطر آن‌ها قرار دارد. برخلاف بسیاری از پلیمرهای سنتتیک که در حال حاضر در سیستم‌های تصفیه آب استفاده می‌شوند (مانند پلی‌اکریل آمیدها) و سال‌ها در محیط باقی می‌مانند و مشکلات جدی آلودگی میکروپلاستیک ایجاد می‌کنند، هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی پس از پایان عمر مفید خود، به طور کامل و بدون به جا گذاشتن اثرات مخرب، در محیط زیست تجزیه شده و به ترکیبات طبیعی و غیرسمی (نظیر آب، دی‌اکسید کربن و زیست‌توده) باز می‌گردند. این ویژگی، به طور مستقیم به کاهش قابل توجه پسماندهای جامد، جلوگیری از آلودگی ثانویه و حفظ سلامت اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی کمک می‌کند (Dallaev و همکاران، ۲۰۲۵). علاوه بر این، استفاده از پلی‌ساکاریدها به عنوان ماده اولیه، به معنای کاهش مصرف منابع فسیلی محدود و غیرتجدیدپذیر (مانند نفت و گاز) است که برای تولید پلیمرهای سنتتیک مورد نیاز است. این تغییر رویکرد نه تنها به کاهش ردپای کربن و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با فرآیندهای استخراج و پالایش سوخت‌های فسیلی و تولید پلیمرهای پتروشیمیایی کمک می‌کند، بلکه به کاهش آلاینده‌های هوای ناشی از سوزاندن پسماندهای کشاورزی نیز منجر می‌شود. این امر به ویژه در چارچوب تلاش‌های جهانی برای کاهش تغییرات اقلیمی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار و کربن‌زدایی، از اهمیت استراتژیک و حیاتی برخوردار است. خود فرآیند تصفیه نیز با استفاده از این هیدروژل‌ها می‌تواند به مراتب «سبزتر» باشد (Dhalsamant و همکاران، ۲۰۲۵). حذف آلاینده‌ها از طریق مکانیسم‌های جذب، تبادل یونی و کمپلکس‌سازی، معمولاً نیاز به فرآیندهای شیمیایی پیچیده، انرژی‌بر و گاهی اوقات تولید محصولات جانبی سمی (نظیر لجن‌های شیمیایی) را کاهش می‌دهد که خود رویکردی پاک‌تر و ایمن‌تر محسوب می‌شود. همچنین، قابلیت استحصال و بازیابی فلزات سنگین جذب شده از هیدروژل، می‌تواند به کاهش دفع پسماندهای خطرناک و حتی بازیافت منابع ارزشمند فلزی کمک کند که منجر به کاهش نیاز به استخراج از معادن و اثرات زیست‌محیطی مخرب آن می‌شود. در مجموع، تمامی این جنبه‌ها، هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی را به یک فناوری پاک، پایدار و دوستدار محیط زیست برای حفاظت از منابع آبی و اکوسیستم‌های طبیعی تبدیل می‌کنند و آن‌ها را در خط مقدم راه‌حل‌های تصفیه آب سبز قرار می‌دهند (Akhtar و همکاران، ۲۰۲۴).

رها شده، یا به عنوان زباله دفع می‌شوند که خود هزینه‌های گزافی را برای جمع‌آوری و دفع به سیستم مدیریت پسماند تحمیل می‌کند (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳). حتی سوزاندن برخی از این پسماندها نظیر کاه، منجر به آلودگی شدید هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. با به‌کارگیری فناوری‌های نوین، می‌توان این پسماندهای «بی‌ارزش» را به مواد اولیه ارزشمند و فراوان برای تولید پلی‌ساکاریدها و سپس هیدروژل‌ها تبدیل کرد. این رویکرد نه تنها هزینه تأمین ماده اولیه را به حداقل می‌رساند و وابستگی کشور به واردات مواد گران‌قیمت را قطع می‌کند، بلکه می‌تواند یک جریان درآمدی جدید و پایدار برای کشاورزان، دامداران و صنایع شیلات ایجاد کرده و به توسعه اقتصادی مناطق روستایی و ساحلی کمک شایانی نماید. این پتانسیل عظیم بیوپلیمرهای بومی، فرصت‌های بی‌نظیری را برای توسعه صنایع پایین‌دستی بیوپلیمرها و بیومواد در ایران فراهم می‌آورد (Burinskiene و همکاران، ۲۰۲۵).

علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های مواد اولیه، فرآیندهای سنتز بسیاری از هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی اغلب می‌توانند در شرایط عملیاتی ملایم‌تر، مانند دمای اتاق و فشار اتمسفریک و با مصرف انرژی به مراتب کمتر نسبت به سنتز پلیمرهای سنتتیک انجام شوند (Sayed، ۲۰۲۳). این کاهش نیاز به انرژی و شرایط سخت عملیاتی دارد و به طور مستقیم به کاهش هزینه‌های عملیاتی تولید و در نتیجه، کاهش قیمت تمام‌شده محصول نهایی منجر می‌شود که رقابت‌پذیری آن را در بازار افزایش می‌دهد. نکته حیاتی دیگر از منظر اقتصادی، قابلیت بازیابی و استفاده مجدد جاذب‌ها است، در حالی که این جنبه هنوز نیازمند تحقیقات و توسعه روش‌های بازسازی کارآمدتر است، اما با افزایش موفقیت آمیز چرخه عمر هیدروژل‌ها، می‌توان نیاز به تولید مداوم جاذب جدید را به میزان قابل توجهی کاهش داد که به طور مستقیم بر کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سیستم‌های تصفیه آب تأثیر می‌گذارد (Pytel و همکاران، ۲۰۲۵). یک هیدروژل که بتواند برای ده‌ها چرخه جذب و بازسازی، کارایی خود را حفظ کند، از لحاظ اقتصادی به مراتب جذاب‌تر خواهد بود. در نهایت، توسعه و بومی‌سازی این فناوری پیشرفته در ایران می‌تواند به کاهش وابستگی کشور به مواد شیمیایی و تجهیزات تصفیه آب وارداتی منجر شود که در شرایط تلاطم اقتصادی و تحریم‌ها، از اهمیت استراتژیک بالایی برخوردار است. این امر همچنین به ایجاد شغل‌های جدید و پایدار در تمام مراحل زنجیره ارزش، از جمع‌آوری پسماند و استخراج پلی‌ساکاریدها تا تولید هیدروژل و به‌کارگیری آن در صنایع مختلف تصفیه آب، کمک شایانی خواهد کرد (Revette و همکاران، ۲۰۲۲).

۳-۴. تحلیل چرخه حیات (LCA): ابزاری برای ارزیابی جامع پایداری

برای ارزیابی جامع‌تر، دقیق‌تر و علمی‌تر مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی یک فناوری در مقایسه با سایر گزینه‌ها، انجام تحلیل چرخه حیات یک ابزار ضروری و استاندارد بین‌المللی است. در واقع، چرخه حیات یک ارزیابی سیستماتیک و داده‌محور است که تأثیرات زیست‌محیطی و منابعی یک محصول، فرآیند یا خدمت را در تمام مراحل چرخه عمر آن، از مرحله «استخراج و تولید مواد اولیه تا مرحله استفاده، بازیافت و دفع نهایی» مورد بررسی قرار می‌دهد (Goel و همکاران، ۲۰۲۴). یک چرخه حیات جامع برای هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در کاربرد تصفیه آب باید شامل ارزیابی دقیق مراحل زیر باشد:

الف) مرحله استخراج و فرآوری مواد اولیه: این مرحله شامل ارزیابی دقیق انرژی مصرفی (مانند برق، سوخت)، مصرف آب و همچنین تمامی آلاینده‌های هوا و پساب مرتبط با جمع‌آوری پسماندهای کشاورزی و شیلاتی، فرآیندهای مکانیکی و شیمیایی استخراج و خالص‌سازی پلی‌ساکاریدها از این منابع است. این ارزیابی باید شامل حمل و نقل مواد اولیه به محل تولید نیز باشد.

ب) مرحله سنتز و تولید هیدروژل: در این مرحله، تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های مرتبط با فرآیند شبکه‌ای شدن و تشکیل هیدروژل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این امر شامل مصرف انرژی برای واکنش‌ها و خشک کردن هیدروژل، مصرف آب و حلال‌های شیمیایی (در صورت استفاده) و تولید هرگونه پسماند یا انتشار آلاینده در طی فرآیند تولید است. انتخاب روش شبکه‌ای شدن (فیزیکی یا شیمیایی) و نوع عوامل شبکه‌ای‌کننده در این مرحله، تأثیر بسزایی در نتایج چرخه حیات خواهد داشت.

ج) مرحله کاربرد و عملکرد در تصفیه آب: این بخش به ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی و منابعی مرتبط با استفاده عملی از هیدروژل در سیستم‌های تصفیه آب می‌پردازد. این شامل انرژی مورد نیاز برای پمپاژ آب از طریق ستون‌های جاذب حاوی هیدروژل، مصرف مواد و انرژی برای فرآیندهای بازسازی (احیا) هیدروژل در صورت استفاده مجدد و هرگونه انتشار یا آلودگی احتمالی در طول فرآیند تصفیه است (Rashid و همکاران، ۲۰۲۳).

د) مرحله پایان عمر: در این مرحله، سرنوشت نهایی هیدروژل پس از پایان عمر مفید آن (نظیر تجزیه زیستی در محیط طبیعی، دفن در محل دفن زباله، یا امکان بازیافت اجزای آن) و همچنین نحوه مدیریت و دفع ایمن آلاینده‌های جذب شده (مانند فلزات سنگین) یا امکان بازیافت آن‌ها ارزیابی می‌شود.

نتایج حاصل از یک چرخه حیات دقیق و شفاف می‌تواند به طور کمی نقاط قوت و ضعف زیست‌محیطی و اقتصادی هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی را در مقایسه با فناوری‌های تصفیه آب موجود (مانند استفاده از کربن فعال، رزین‌های تبادل یونی سنتتیک، یا فرآیندهای شیمیایی پیچیده)

شناسایی کند. این اطلاعات برای محققان، صنعتگران و سیاست‌گذاران بسیار ارزشمند است تا بتوانند فرآیندهای تولید و استفاده از این مواد را برای دستیابی به حداکثر پایداری و حداقل اثرات منفی زیست‌محیطی بهینه‌سازی کنند (Patel و Shen، ۲۰۰۸). با توجه به ماهیت بیوپلیمری این هیدروژل‌ها و منشأ تجدیدپذیر آن‌ها، انتظار می‌رود که آن‌ها در اکثر شاخص‌های زیست‌محیطی (مانند ردپای کربن، مصرف آب شیرین، تولید پسماند خطرناک و غیره) نسبت به جاذب‌های سنتتیک یا فرآیندهای تصفیه انرژی‌بر و شیمیایی، برتری قابل توجهی داشته باشند و به عنوان یک گزینه پایدارتر معرفی شوند (Reverte و همکاران، ۲۰۲۲؛ Das و همکاران، ۲۰۲۳).

۵. چالش‌ها و محدودیت‌ها با تمرکز بر مشکلات عملی و صنعتی

با وجود پتانسیل بالای هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در تصفیه آب، چالش‌های عملی و صنعتی متعددی مانع از تجاری‌سازی گسترده و کاربرد صنعتی آن‌ها در مقیاس بزرگ شده است. در ادامه، اصلی‌ترین موانعی که در این زمینه وجود دارند، ذکر می‌شوند:

الف) محدودیت‌های مکانیکی و ساختاری: هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی عموماً از استحکام مکانیکی پایین و مقاومت کششی محدودی برخوردارند. این ضعف ساختاری باعث می‌شود در برابر نیروهای برشی و فشارهای هیدرودینامیکی در سیستم‌های تصفیه صنعتی (مانند راکتورهای بستر سیال یا سیستم‌های دارای همزن مکانیکی) دچار تخریب فیزیکی شده و کارایی خود را از دست بدهند. این مسئله به ویژه در کاربردهای پیوسته که نیاز به شارژ مجدد مکرر بستر جاذب وجود دارد، به یک چالش جدی تبدیل می‌شود (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲).

ب) مشکلات مربوط به ظرفیت و سرعت جذب: اگرچه هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در شرایط آزمایشگاهی ظرفیت جذب قابل قبولی نشان می‌دهند، اما در مقیاس صنعتی و در مواجهه با پساب‌های واقعی، اغلب با کاهش محسوس ظرفیت جذب مواجه می‌شوند. سرعت کند نفوذ آلاینده‌ها به درون شبکه پلیمری هیدروژل، زمان تماس مورد نیاز را افزایش داده و موجب بزرگ شدن ابعاد تجهیزات و افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود (Lin و همکاران، ۲۰۲۲).

ج) چالش انتخاب‌پذیری در محیط‌های پیچیده: در پساب‌های صنعتی واقعی، معمولاً مخلوط پیچیده‌ای از آلاینده‌های مختلف وجود دارد. هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی غالباً فاقد انتخاب‌پذیری کافی برای جداسازی هدفمند آلاینده‌های خاص هستند. حضور یون‌های رقیب، مواد آلی طبیعی و سایر ترکیبات مزاحم می‌تواند به شدت بر کارایی این هیدروژل‌ها تأثیر منفی بگذارد و راندمان فرآیند تصفیه را کاهش دهد (Ghiorghita و همکاران، ۲۰۲۲).

د) مشکلات تولید در مقیاس صنعتی: فرآیند سنتز این هیدروژل‌ها اغلب نیاز به کنترل دقیق پارامترهای مختلفی

مانند دما، pH و زمان دارد که در مقیاس آزمایشگاهی به راحتی قابل مدیریت است، اما در مقیاس صنعتی با چالش‌های فنی و هزینه‌های زیادی همراه می‌باشد. یکنواختی خواص در دسته‌های مختلف تولید نیز از دیگر مشکلات پیشروی صنعتی‌سازی این فناوری است (Zhao و همکاران، ۲۰۲۳).

ه) محدودیت‌های پایداری و طول عمر: این هیدروژل‌ها در معرض تخریب میکروبی و شیمیایی در محیط‌های آلی پیچیده قرار دارند. ناپایداری در برابر تغییرات pH و شوری، همراه با حساسیت به اکسیداسیون، از طول عمر عملیاتی آن‌ها می‌کاهد. این مسئله به ویژه در تصفیه پساب‌های صنعتی با شرایط شیمیایی متغیر (مانند پساب صنایع نفت و گاز و معادن) به یک چالش اساسی تبدیل شده است (Ghiorghita و همکاران، ۲۰۲۲).

و) مشکلات بازیافت و مسائل اقتصادی: فرآیند احیاء و بازیافت این هیدروژل‌ها اغلب نیازمند استفاده از محلول‌های شیمیایی خاص و مصرف مقادیر قابل توجهی آب و انرژی است. پس از چندین سیکل استفاده، ظرفیت جذب آن‌ها به طور محسوسی کاهش یافته و در نهایت نیاز به جایگزینی دارند. هزینه‌های مربوط به بازیافت و دفع نهایی هیدروژل‌های مستعمل، توجیه اقتصادی استفاده از آن‌ها را در مقایسه با جاذب‌های متعارف با مشکل مواجه می‌سازد (Huang و همکاران، ۲۰۲۳).

نهایتاً، فقدان استانداردها و پروتکل‌های صنعتی برای به کارگیری این مواد در سیستم‌های تصفیه آب موجود، یک مانع ساختاری مهم است. صنایع برای پذیرش یک فناوری جدید به داده‌های مطمئن و استاندارد در مورد عملکرد، ایمنی و دوام آن در درازمدت نیاز دارند که در حال حاضر برای بسیاری از هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی این داده‌ها به ویژه در شرایط واقعی ایران (مانند پساب‌های صنایع نفت و معادن) محدود است. این عدم قطعیت‌ها در کنار مشکلات فنی و اقتصادی، باعث شده تا صنعت در به کارگیری این فناوری نوظهور، محتاط عمل کند.

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

در مواجهه با بحران فزاینده جهانی آب و تشدید آلودگی منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران، نیاز به توسعه و به‌کارگیری راهکارهای نوآورانه و پایدار برای تصفیه آب به ضرورتی انکارناپذیر تبدیل شده است. در این زمینه، هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید به دلیل مجموعه‌ای از ویژگی‌های برجسته و منحصر به فردشان، از جمله زیست‌سازگاری کامل، زیست‌تخریب‌پذیری طبیعی، فراوانی منابع اولیه و قابلیت اصلاح‌پذیری شیمیایی بالا، به عنوان جایگزین‌های بسیار امیدبخش و کارآمد برای مواد تصفیه آب سنتی و اغلب شیمیایی مطرح شده‌اند. این مواد، با تکیه بر ساختار پلیمری سه‌بعدی و آبدوست خود که از پلی‌ساکاریدهای متداول و در دسترس نظیر سلولز،

کیتوزان، آلژینات، نشاسته و پکتین مشتق می‌شوند، توانایی شگفت‌انگیزی در حذف طیف وسیعی از آلاینده‌های خطرناک و پایدار از محیط‌های آبی از خود نشان داده‌اند (Morante-Carballo و همکاران، ۲۰۲۲).

مرور جامع و تحلیلی که در بخش‌های پیشین این مطالعه صورت گرفت، به وضوح نشان داد که پلی‌ساکاریدها، با وجود گروه‌های عاملی فراوان و واکنش‌پذیر (مانند هیدروکسیل، کربوکسیل و آمین)، بستری ایده‌آل و قابل تنظیم برای سنتز هیدروژل‌هایی با قابلیت‌های جذب بالا و گزینش‌پذیری قابل توجه فراهم می‌کنند. این هیدروژل‌ها قادرند از طریق فعال‌سازی مکانیسم‌های پیچیده و چندوجهی نظیر کمپلکس‌سازی و کیلاته شدن مؤثر یون‌های فلزی، تبادل یونی کارآمد، جذب سطحی قوی از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و تشکیل پیوندهای هیدروژنی مستحکم، طیف وسیعی از آلاینده‌ها شامل فلزات سنگین سمی و خطرناک، رنگ‌های صنعتی مقاوم و تجزیه‌ناپذیر و آلاینده‌های آلی نوظهور (مانند داروها و محصولات مراقبت شخصی) را به طور مؤثری از آب حذف کنند. فراتر از حذف شیمیایی، برخی از این هیدروژل‌ها، به‌ویژه آن‌هایی که از کیتوزان مشتق شده‌اند یا با نانوذرات ضد میکروبی (مانند نانوذرات نقره) عامل‌دار شده‌اند، خواص ضد میکروبی ذاتی و یا القایی از خود نشان می‌دهند که آن‌ها را برای ضدعفونی آب و حذف بیوپاتوژن‌ها (مانند باکتری‌ها و ویروس‌ها) نیز بسیار مناسب می‌سازد. علاوه بر این، قابلیت مهندسی دقیق ساختار هیدروژل‌ها به منظور کنترل اندازه و توزیع منافذ، تنظیم سطح ویژه و معرفی گروه‌های عاملی خاص و هدفمند، امکان بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها را برای حذف گزینشی و کارآمد انواع مختلف آلاینده‌ها فراهم آورده است (Khandwal و همکاران، ۲۰۲۵).

یکی از برجسته‌ترین ابعاد این فناوری برای ایران، پتانسیل‌های عظیم بومی‌سازی در زمینه تولید و کاربرد هیدروژل‌ها است. کشور ما دارای منابع غنی و تجدیدپذیری از بیومس کشاورزی (مانند کاه گندم و برنج، ساقه ذرت، تفاله میوه‌ها و مرکبات) و ضایعات صنایع شیلالت (به‌ویژه پوست میگو و خرچنگ) است که در حال حاضر اغلب به عنوان زباله دور ریخته می‌شوند. این پسماندها می‌توانند به عنوان مواد اولیه ارزان، فراوان و بومی برای استخراج و خالص‌سازی پلی‌ساکاریدهایی نظیر سلولز، نشاسته، پکتین و کیتوزان به کار گرفته شوند. این رویکرد نه تنها به کاهش چشمگیر وابستگی کشور به مواد اولیه و فناوری‌های وارداتی کمک می‌کند، بلکه با تبدیل پسماندها به محصولات ارزش افزوده بالا، به توسعه اقتصاد چرخشی، ایجاد اشتغال و تحقق اهداف توسعه پایدار در کشور یاری شایانی می‌رساند (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، برای تحقق کامل پتانسیل هیدروژل‌های پلی‌ساکارید در مقیاس صنعتی و گسترده، غلبه بر چالش‌های موجود حیاتی است. پایداری مکانیکی ناکافی بسیاری از این مواد در برابر

فشارهای عملیاتی در سیستم‌های جریان، حساسیت عملکرد آن‌ها به تغییرات pH محیط، سرعت جذب نسبتاً پایین در مقایسه با برخی جاذب‌های رایج و مسائل پیچیده مربوط به بازیابی و بازسازی کارآمد جاذب‌های اشباع‌شده بدون تخریب ساختار آن‌ها، از جمله مهم‌ترین موانعی هستند که نیازمند تحقیقات فشرده و نوآوری‌های فنی هستند (Lu و همکاران، ۲۰۲۴). برای رفع این چالش‌ها، تحقیقات آینده باید به طور استراتژیک بر توسعه هیدروژل‌های هیبریدی و کامپوزیتی پیشرفته (با تلفیق پلی‌ساکاریدها و نانومواد تقویت‌کننده مانند نانوسلولزهای با استحکام بالا یا اکسید گرافن)، سنتز هیدروژل‌های هوشمند و پاسخگو به محرک‌ها (مانند میدان مغناطیسی برای جداسازی آسان و کنترل‌شده، یا تغییرات دما و pH برای بازسازی کارآمد) و مهندسی دقیق گروه‌های عاملی در سطح مولکولی برای افزایش چشمگیر گزینش‌پذیری و ظرفیت جذب در برابر آلاینده‌های خاص متمرکز شود. همچنین، بهبود فرآیندهای بازیابی و بازسازی به منظور افزایش چرخه عمر مفید جاذب و کاهش هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی و انتقال موفقیت‌آمیز فناوری از مقیاس آزمایشگاهی به صنعتی از طریق پایلوت‌تست‌ها و ارزیابی‌های جامع زیست‌محیطی-اقتصادی از گام‌های اساسی و ضروری در این مسیر خواهد بود (Choudhary و همکاران، ۲۰۲۴).

با توجه به شرایط خاص ایران و چالش‌های پیش‌روی صنایع اصلی کشور مانند معدن و نفت و گاز، توسعه هدفمند این هیدروژل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مقابله با آلاینده‌های این صنایع، از جمله پساب‌های حاوی فلزات سنگین در معادن و هیدروکربن‌ها و ترکیبات روغنی در صنایع نفت و گاز، نیاز به طراحی هیدروژل‌های هوشمند و مهندسی‌شده با گزینش‌پذیری و پایداری بالا در شرایط سخت عملیاتی وجود دارد. تحقق این امر مستلزم تمرکز بر پژوهش‌های کاربردی، انجام مطالعات پایلوت نیمه‌صنعتی و تعامل نزدیک بین مراکز آکادمیک و صنایع مرتبط است. چشم‌انداز آینده این فناوری در ایران، بر توسعه هیدروژل‌های هوشمند، تلفیق آن‌ها با دیگر فناوری‌های تصفیه در قالب سیستم‌های هیبریدی و همچنین تمرکز بر بازیافت و چرخه اقتصاد استوار است. نمونه‌های موفق داخلی مانند توسعه هیدروژل‌های شبکه دوتایی با قابلیت خود-ترمیمی، گواهی بر پتانسیل بالای کشور در رسیدن به خودکفایی در این عرصه است. دستیابی به این چشم‌انداز نه تنها گامی بزرگ در حل معضلات زیست‌محیطی خواهد بود، بلکه می‌تواند منجر به ایجاد فناوری‌های بومی و ایجاد ارزش اقتصادی از طریق بازیافت مواد شود.

در جمع‌بندی نهایی، هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید نه تنها یک راه‌حل سبز، پایدار و دوستدار محیط زیست برای چالش‌های فزاینده آلودگی آب در جهان و به‌ویژه در ایران ارائه می‌دهند، بلکه با تکیه بر منابع بومی فراوان و قابل

دسترس در کشور، می‌توانند به عنوان یک فناوری استراتژیک و بومی در مدیریت جامع و پایدار منابع آب کشور مطرح شوند. سرمایه‌گذاری هدفمند در تحقیق و توسعه این مواد پیشرفته، تشویق همکاری‌های نزدیک مؤثر بین صنعت و دانشگاه و حمایت قاطع از شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در این حوزه، می‌تواند ایران را در مسیر دستیابی به امنیت آبی پایدار، توسعه اقتصادی سبز و حفاظت بلندمدت از محیط زیست، یاری رساند. امید است که این پژوهش‌ها و کاربردهای نوآورانه، به دسترسی نسل‌های آینده به آب پاک و سالم و حفاظت از اکوسیستم‌های ارزشمند آبی کشورمان کمک شایانی کند و آینده‌ای روشن‌تر برای منابع حیاتی آب ترسیم نماید.

منابع

- رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۱). مروری بر فناوری‌های مورد استفاده جهت پالایش آب در سیستم‌های آبی‌پروری با تأکید بر الگوی توسعه پایدار در ایران. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۹(۳)، ۱۲۷-۱۴۰. doi: 10.22067/jwsd.v9i3.2205.1150
- رادخواه، علیرضا، و ایگدری، سهیل. (۱۴۰۲). کاربرد نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروبی‌زدایی آب در سیستم‌های پرورش آبزیان و اثرات ناشی از رهایش آن در محیط. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۰(۲)، ۱۰۹-۱۲۶. doi: 10.22067/jwsd.v10i2.2301-1209
- رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و آتش افرازه، صدیقه. (۱۴۰۳). کارایی جاذب‌های مختلف در حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری (مطالعه مروری). فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۱(۴)، ۸۲-۶۳. doi: 10.22067/jwsd.v11i4.2407-1346
- رادخواه، علیرضا، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر عوامل فیزیکوشیمیایی آب بر زیست‌فراهمی، میزان سمیت و سطح اثرگذاری نانو ذرات فلزی در اکوسیستم‌های آبی. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۸(۲)، ۷۱-۹۰. doi: 10.22067/jwsd.v8i2.1019
- Abka-Khajouei, R., Tounsi, L., Shahabi, N., Patel, A.K., Abdelkafi, S., & Michaud, P. (2022). Structures, properties and applications of alginates. *Marine Drugs*, 20(6), 364-378. doi: 10.3390/md20060364
- Ahmad, N., Bukhari, S.N.A., Hussain, M.A., Ejaz, H., Munir, M.U., & Amjad, M.W. (2024). Nanoparticles incorporated hydrogels for delivery of antimicrobial agents: Developments and trends. *RSC Advances*, 14(19), 13535-13564. doi: 10.1039/d4ra00631c
- Ahmadian, M., Derakhshankhah, H., & Jaymand, M. (2023). Recent advances in adsorption of environmental pollutants using metal-organic frameworks-based hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231, 5-23. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123333
- Akdaşçi, E., Duman, H., Eker, F., Bechelany, M., & Karav, S. (2025). Chitosan and its nanoparticles: A multifaceted approach to antibacterial applications.

- biomaterials. *Polymers*, 15(13), 2908. doi: [10.3390/polym15132908](https://doi.org/10.3390/polym15132908)
- Bilal, M., Gul, I., Basharat, A., & Qamar, S. A. (2021). Polysaccharides-based bio-nanostructures and their potential food applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 176, 540–557. doi: [10.1016/j.ijbiomac.2021.02.107](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.107)
- Bosacka, A., Zienkiewicz-Strzałka, M., Deryło-Marczewska, A., & Chrzanowska, A. (2022). Physicochemical, structural, and adsorption properties of chemically and thermally modified activated carbons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 647, 10–31. doi: [10.1016/j.colsurfa.2022.129130](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129130)
- Burinskiene, A., Lingaitienė, O., & Byčenkaitė, G. (2025). Dynamics of trade of recycled raw materials and the connection with the circular economy. *Discover Sustainability*, 6, 680. doi: [10.1007/s43621-025-01502-4](https://doi.org/10.1007/s43621-025-01502-4)
- Cabral, J.P. (2010). Water microbiology: Bacterial pathogens and water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7 (10), 3657–3703. doi: [10.3390/ijerph7103657](https://doi.org/10.3390/ijerph7103657)
- Cagno, E., Garrone, P., Negri, M., & Rizzuni, A. (2022). Adoption of water reuse technologies: An assessment under different regulatory and operational scenarios. *Journal of Environmental Management*, 317, 115389. doi: [10.1016/j.jenvman.2022.115389](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115389)
- Campiglio, C.E., Contessi Negrini, N., Farè, S., & Draghi, L. (2019). Cross-linking strategies for electrospun gelatin scaffolds. *Materials*, 12(15), 3–18. doi: [10.3390/ma12152476](https://doi.org/10.3390/ma12152476)
- Carpena, M., Garcia-Perez, P., Garcia-Oliveira, P., Chamorro, F., Otero, P., Lourenço-Lopes, C., Cao, H., Simal-Gandara, J., & Prieto, M.A. (2022). Biological properties and potential of compounds extracted from red seaweeds. *Phytochemistry Reviews*. Advance online publication. pp. 1509–1540. doi: [10.1007/s11101-022-09826-z](https://doi.org/10.1007/s11101-022-09826-z)
- Choudhary, A., Sharma, A., Singh, A., & Han, S.S. (2024). Strategy and advancement in hybrid hydrogel and their applications: Recent progress and trends. *Advanced Engineering Materials*, 26(21), 1–20. doi: [10.1002/adem.202400944](https://doi.org/10.1002/adem.202400944)
- Dallaev, R., Papež, N., Allaham, M.M., & Holcman, V. (2025). Biodegradable polymers: Properties, applications, and environmental impact. *Polymers (Basel)*, 17(14), 1981. doi: [10.3390/polym17141981](https://doi.org/10.3390/polym17141981)
- Darban, Z., Shahabuddin, S., Gaur, R., Ahmad, I., & Sridewi, N. (2022). Hydrogel-based adsorbent material for the effective removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review. *Gels*, 8(5), 263. doi: [10.3390/gels8050263](https://doi.org/10.3390/gels8050263)
- Das, A., Ringu, T., Ghosh, S., & Pramanik, N. (2023). A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin*, 80, 7247–7312. doi: [10.1007/s00289-022-04443-4](https://doi.org/10.1007/s00289-022-04443-4)
- Dattilo, M., Patitucci, F., Prete, S., Parisi, O.I., & Puoci, F. (2023). Polysaccharide-based hydrogels and their application as drug delivery systems in cancer treatment: A review. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(2), 55. doi: [10.3390/jfb14020055](https://doi.org/10.3390/jfb14020055)
- Desai, N., Rana, D., Salave, S., Gupta, R., Patel, P., Karunakaran, B., Sharma, A., Giri, J., Benival, D., & Kommineni, N. (2023). Chitosan: A potential biopolymer in drug delivery and biomedical applications. *Pharmaceutics*, 15(4), 1313. doi: [10.3390/pharmaceutics15041313](https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15041313)
- Nanomaterials*, 15(2), 126–140. doi: [10.3390/nano15020126](https://doi.org/10.3390/nano15020126)
- Akhtar, M. S., Ali, S., & Zaman, W. (2024). Innovative adsorbents for pollutant removal: Exploring the latest research and applications. *Molecules*, 29(18), 10–32. doi: [10.3390/molecules29184317](https://doi.org/10.3390/molecules29184317)
- Ali, K., Asad, Z., Agbna, G.H.D., Saud, A., Khan, A., & Zaidi, S.J. (2024). Progress and innovations in hydrogels for sustainable agriculture. *Agronomy*, 14(12), 1–24. doi: [10.3390/agronomy14122815](https://doi.org/10.3390/agronomy14122815)
- AlMohamadi, H., Awad, S.A., Sharma, A.K., Fayzullaev, N., Távara-Aponte, A., Chiguala-Contreras, L., Amari, A., Rodriguez-Benites, C., Tahoon, M.A., & Esmaeili, H. (2024). Photocatalytic activity of metal- and non-metal-anchored ZnO and TiO₂ nanocatalysts for advanced photocatalysis: Comparative study. *Catalysts*, 14(7), 420–438. doi: [10.3390/catal14070420](https://doi.org/10.3390/catal14070420)
- Alsaka, L., Altaee, A., Zaidi, S.J., Zhou, J., & Kazwini, T. (2025). A review of hydrogel application in wastewater purification. *Separations*, 12(2), 51–63. doi: [10.3390/separations12020051](https://doi.org/10.3390/separations12020051)
- Al-Tohamy, R., Ali, S.S., Li, F., Okasha, K.M., Mahmoud, Y.A., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. doi: [10.1016/j.ecoenv.2021.113160](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160)
- Annabi, N., Nichol, J. W., Zhong, X., Ji, C., Koshy, S., Khademhosseini, A., & Dehghani, F. (2010). Controlling the porosity and microarchitecture of hydrogels for tissue engineering. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 16(4), 371–383. doi: [10.1089/ten.teb.2009.0639](https://doi.org/10.1089/ten.teb.2009.0639)
- Arfi, R., Karoui, S., Mougin, K., & Ghorbal, A. (2017). Adsorptive removal of cationic and anionic dyes from aqueous solution by utilizing almond shell as bioadsorbent. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2, 4–25. doi: [10.1007/s41207-017-0032-y](https://doi.org/10.1007/s41207-017-0032-y)
- Aranaz, I., Alcántara, A.R., Civera, M.C., Arias, C., Elorza, B., Heras Caballero, A., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers*, 13(19), 2–21. doi: [10.3390/polym13193256](https://doi.org/10.3390/polym13193256)
- Araque, L.M., Infantes-Molina, A., Rodríguez-Castellón, E., Garro-Linck, Y., Franzoni, B., Pérez, C.J., Copello, G.J., & Lázaro-Martínez, J.M. (2024). Ionic crosslinking of linear polyethyleneimine hydrogels with tripolyphosphate. *Gels*, 10(12), 790–805. doi: [10.3390/gels10120790](https://doi.org/10.3390/gels10120790)
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M.R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: Mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 3–35. doi: [10.3389/fphar.2021.643972](https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972)
- Balducci, E., Papi, F., Capialbi, D.E., & Del Bino, L. (2023). Polysaccharides' structures and functions in biofilm architecture of antimicrobial-resistant (AMR) pathogens. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 4030. doi: [10.3390/ijms24044030](https://doi.org/10.3390/ijms24044030)
- Benalaya, I., Alves, G., Lopes, J., & Silva, L.R. (2024). A review of natural polysaccharides: sources, characteristics, properties, food, and pharmaceutical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), 1322. doi: [10.3390/ijms25021322](https://doi.org/10.3390/ijms25021322)
- Berradi, A., Aziz, F., Achaby, M. E., Ouazzani, N., & Mandi, L. (2023). A comprehensive review of polysaccharide-based hydrogels as promising

- Polymers*, 26(1), 258–272. doi: [10.1080/15685551.2023.2284482](https://doi.org/10.1080/15685551.2023.2284482)
- Iddrisu, L., Danso, F., Cheong, K.-L., Fang, Z., & Zhong, S. (2024). Polysaccharides as protective agents against heavy metal toxicity. *Foods*, 13(6), 853. doi: [10.3390/foods13060853](https://doi.org/10.3390/foods13060853)
- Kamali, A., Farzam, M., Beitollahpoor, M., & Tavakoli, O. (2016). Study on potentials of Iran citrus wastes as a feedstock for biofuel production. In *Proceedings of the Emerging Trends in Energy Conservation (ETEC)*. pp. 1–12.
- Ke, C.L., Deng, F.S., Chuang, C.Y., & Lin, C.H. (2021). Antimicrobial actions and applications of chitosan. *Polymers*, 13(6), 904. doi: [10.3390/polym13060904](https://doi.org/10.3390/polym13060904)
- Khandwal, D., Patel, S., Pandey, A.K., & Mishra, A. (2025). A comprehensive, analytical narrative review of polysaccharides from the red seaweed *Gracilaria*: Pharmaceutical applications and mechanistic insights for human health. *Nutrients*, 17(5), 744. doi: [10.3390/nu17050744](https://doi.org/10.3390/nu17050744)
- Lara-Espinoza, C., Carvajal-Millán, E., Balandrán-Quintana, R., López-Franco, Y., & Rascón-Chu, A. (2018). Pectin and pectin-based composite materials: Beyond food texture. *Molecules*, 23(4), 942–953. doi: [10.3390/molecules23040942](https://doi.org/10.3390/molecules23040942)
- Lavrentev, F.V., Shilovskikh, V.V., Alabusheva, V.S., Yurova, V.Y., Nikitina, A.A., Ulasevich, S.A., & Skorb, E.V. (2023). Diffusion-limited processes in hydrogels with chosen applications from drug delivery to electronic components. *Molecules*, 28(15), 5931. doi: [10.3390/molecules28155931](https://doi.org/10.3390/molecules28155931)
- Li, Z., Qin, R., Xue, J., Lin, C., & Jiang, L. (2025). Chitosan-Based Hydrogel Beads: Developments, Applications, and Challenges. *Polymers*, 17(7), 920. doi: [10.3390/polym17070920](https://doi.org/10.3390/polym17070920)
- Lin, J., Jiao, G., & Kermanshahi-pour, A. (2022). Algal polysaccharides-based hydrogels: Extraction, synthesis, characterization, and applications. *Marine Drugs*, 20(5), 306. doi: [10.3390/md20050306](https://doi.org/10.3390/md20050306)
- Liu, H., Hu, Y., Liu, Y., Hu, R., Wu, X., & Li, B. (2023). A review of recent advances in biomedical applications of smart cellulose-based hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(Pt6), 127149. doi: [10.1016/j.ijbiomac.2023.127149](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127149)
- Lu, P., Ruan, D., Huang, M., Tian, M., Zhu, K., Gan, Z., & Xiao, Z. (2024). Harnessing the potential of hydrogels for advanced therapeutic applications: Current achievements and future directions. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1), 166. doi: [10.1038/s41392-024-01852-x](https://doi.org/10.1038/s41392-024-01852-x)
- Magalhães, S., Fernandes, C., Pedrosa, J.F.S., Alves, L., Medronho, B., Ferreira, P.J.T., & Rasteiro, M.G. (2023). Eco-friendly methods for extraction and modification of cellulose: An overview. *Polymers*, 15(14), 3138. doi: [10.3390/polym15143138](https://doi.org/10.3390/polym15143138)
- Maiz-Fernández, S., Pérez-Álvarez, L., Ruiz-Rubio, L., Vilas-Vilela, J.L., & Lanceros-Mendez, S. (2020). Polysaccharide-based in situ self-healing hydrogels for tissue engineering applications. *Polymers*, 12(10), 2261. doi: [10.3390/polym12102261](https://doi.org/10.3390/polym12102261)
- Makarova, A.O., Derkach, S.R., Khair, T., Kazantseva, M.A., Zuev, Y.F., & Zueva, O.S. (2023). Ion-induced polysaccharide gelation: Peculiarities of alginate egg-box association with different divalent cations. *Polymers*, 15(5), 1243. doi: [10.3390/polym15051243](https://doi.org/10.3390/polym15051243)
- Maldonado, N., & Amo-Ochoa, P. (2021). Advances and novel perspectives on colloids, hydrogels, and aerogels based on coordination bonds with biological interest ligands. *Nanomaterials*, 11(7), 1865. doi: [10.3390/nano11071865](https://doi.org/10.3390/nano11071865)
- Dhalsamant, K., Dalai, A., Pattnaik, F., & Acharya, B. (2025). Biodegradable carbohydrate-based films for packaging agricultural products—A review. *Polymers (Basel)*, 17(10), 1325. doi: [10.3390/polym17101325](https://doi.org/10.3390/polym17101325)
- Dharmapriya, T.N., Shih, H.Y., & Huang, P.J. (2022). Facile synthesis of hydrogel-based ion-exchange resins for nitrite/nitrate removal and studies of adsorption behavior. *Polymers*, 14(7), 1442. doi: [10.3390/polym14071442](https://doi.org/10.3390/polym14071442)
- Dohendou, M., Pakzad, K., Nezafat, Z., Nasrollahzadeh, M., & Dekamin, M.G. (2021). Progresses in chitin, chitosan, starch, cellulose, pectin, alginate, gelatin and gum based (nano)catalysts for the Heck coupling reactions: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 192, 771–819. doi: [10.1016/j.ijbiomac.2021.09.162](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.162)
- Dowbysz, A., Samsonowicz, M., & Kukfisz, B. (2022). Recent advances in bio-based additive flame retardants for thermosetting resins. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4828. doi: [10.3390/ijerph19084828](https://doi.org/10.3390/ijerph19084828)
- El-Bourachdi, S., El-Amri, A., Ayub, A.R., Moussaoui, F., & Lahkimi, A. (2025). Development of a novel low-cost adsorbent Chitosan@EDTA@Cellulose composite to effectively remove Methyl Orange dye from wastewater: Experimental and theoretical investigation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 305(1), 141030. doi: [10.1016/j.ijbiomac.2025.141030](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141030)
- El-Sherbiny, I. M., & Yacoub, M.H. (2013). Hydrogel scaffolds for tissue engineering: Progress and challenges. *Global Cardiology Science and Practice*, 2013(3), 316–342. doi: [10.5339/gcsp.2013.38](https://doi.org/10.5339/gcsp.2013.38)
- Fancy, D.A., & Kodadek, T. (1999). Chemistry for the analysis of protein-protein interactions: Rapid and efficient cross-linking triggered by long wavelength light. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 6020–6024. doi: [10.1073/pnas.96.11.6020](https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.6020)
- Ghiorghita, C.A., Dinu, M.V., Lazar, M.M., & Dragan, E.S. (2022). Polysaccharide-based composite hydrogels as sustainable materials for removal of pollutants from wastewater. *Molecules*, 27(23), 8574. doi: [10.3390/molecules27238574](https://doi.org/10.3390/molecules27238574)
- Goel, A., Masurkar, S., & Pathade, G.R. (2024). An overview of digital transformation and environmental sustainability: Threats, opportunities, and solutions. *Sustainability*, 16(24), 11079. doi: [10.3390/su162411079](https://doi.org/10.3390/su162411079)
- Grant, G.T., Morris, E.R., Rees, D.A., Smith, P.J., & Thom, D. (1973). Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model. *FEBS Letters*, 32(1), 195–198. doi: [10.1016/0014-5793\(73\)80770-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80770-7)
- Gulcin, İ., & Alwasel, S.H. (2022). Metal ions, metal chelators and metal chelating assay as antioxidant method. *Processes*, 10(1), 132. doi: [10.3390/pr10010132](https://doi.org/10.3390/pr10010132)
- Ho, T. C., Chang, C. C., Chan, H. P., Chung, T. W., Shu, C. W., Chuang, K. P., Duh, T. H., Yang, M. H., & Tyan, Y. C. (2022). Hydrogels: Properties and applications in biomedicine. *Molecules*, 27 (9), 2902. doi: [10.3390/molecules27092902](https://doi.org/10.3390/molecules27092902)
- Hosseini, E., Andwari, A.M., Wahid, M.A., & Bagheri, G. (2013). A review on green energy potentials in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 533–545. doi: [10.1016/j.rser.2013.07.015](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.015)
- Huang, J., Huang, Z., Xiong, J., Xia, J., Wang, Y., Yang, L., & Liang, Y. (2023). 3D bioprinted scaffolds of polysaccharide hydrogels in osteochondral and cartilage tissue engineering. *Designed Monomers and*

- Pak, A., & Farajzadeh, M. (2007). Iran's Integrated Coastal Management plan: Persian Gulf, Oman Sea, and southern Caspian Sea coastlines. *Ocean & Coastal Management*, 50(9–10), 754–773. doi: [10.1016/j.ocecoaman.2007.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2007.03.006)
- Peera, S.G., & Byun, M. (2025). Engineering gel-based precursors into advanced ORR catalysts for Zn–air batteries and fuel cells: Insights into hydrogels, aerogels, xerogels, metal–organic gels, and metal aerogels. *Gels*, 11(7), 479. doi: [10.3390/gels11070479](https://doi.org/10.3390/gels11070479)
- Pellá, M.C.G., Lima-Tenório, M.K., Tenório-Neto, E.T., Guilherme, M.R., Muniz, E.C., & Rubira, A.F. (2018). Chitosan-based hydrogels: From preparation to biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 196, 233–245. doi: [10.1016/j.carbpol.2018.05.033](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.033)
- Pérez-Pacheco, Y., Tylkowski, B., & García-Valls, R. (2025). Chitosan micro/nanocapsules in action: Linking design, production, and therapeutic application. *Molecules*, 30(2), 252. doi: [10.3390/molecules30020252](https://doi.org/10.3390/molecules30020252)
- Pytel, K., Filippek, R., Kalwar, A., Piaskowska-Silarska, M., Hudy, W., Depešová, J., & Kurdziel, F. (2025). Proactive maintenance and data-driven optimization of mineral lubricating oil in a gas engine cogeneration system extending oil change intervals for cost savings and a reduced environmental footprint. *Energies*, 18(1), 154. doi: [10.3390/en18010154](https://doi.org/10.3390/en18010154)
- Quazi, M.Z., & Park, N. (2022). Nanohydrogels: Advanced polymeric nanomaterials in the era of nanotechnology for robust functionalization and cumulative applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 1943. doi: [10.3390/ijms23041943](https://doi.org/10.3390/ijms23041943)
- Rahman, M.L., Fui, C.J., Ting, T.X., Sarjadi, M.S., Arshad, S.E., & Musta, B. (2020). Polymer Ligands Derived from Jute Fiber for Heavy Metal Removal from Electroplating Wastewater. *Polymers*, 12(11), 2521. doi: [10.3390/polym12112521](https://doi.org/10.3390/polym12112521)
- Rajiman, V., Abdul Halim, H.N., Shariff, A.M., Shahid, M.Z., Maulud, A.S., Lau, K.K., & Tan, L.S. (2022). CO₂ absorption from biogas using piperazine-promoted 2-amino-2-methyl-1-propanol: Process performance in a packed column. *Sustainability*, 14(12), 7095. doi: [10.3390/su14127095](https://doi.org/10.3390/su14127095)
- Ramakrishnan, R.K., Padil, V.V.T., Wacławek, S., Černík, M., & Varma, R.S. (2021). Eco-friendly and economic, adsorptive removal of cationic and anionic dyes by bio-based karaya gum—Chitosan sponge. *Polymers*, 13(2), 251. doi: [10.3390/polym13020251](https://doi.org/10.3390/polym13020251)
- Ramírez, O., López-Frances, A., Baldoví, H. G., Saldías, C., Navalón, S., Leiva, A., & Díaz, D.D. (2024). Hydrogel composites based on chitosan and CuAuTiO₂ photocatalysts for hydrogen production under simulated sunlight irradiation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 273(Pt 2), 132898. doi: [10.1016/j.ijbiomac.2024.132898](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132898)
- Rashid, S.S., Harun, S.N., Hanafiah, M.M., Razman, K.K., Liu, Y.Q., & Tholibon, D.A. (2023). Life cycle assessment and its application in wastewater treatment: A brief overview. *Processes*, 11(1), 208. doi: [10.3390/pr11010208](https://doi.org/10.3390/pr11010208)
- Rauseo, J., Spataro, F., & Patrolecco, L. (2025). Persistent and emerging organic contaminants in natural environments. *Water*, 17(3), 436. doi: [10.3390/w17030436](https://doi.org/10.3390/w17030436)
- Rehman, T.U., Shah, A., Khattak, S., Khan, A., Rehman, N., & Alam, S. (2021). Superabsorbent Hydrogels for Heavy Metal Removal. *IntechOpen*, 1, 1–32. doi: [10.5772/intechopen.89350](https://doi.org/10.5772/intechopen.89350)
- Revete, A., Aparicio, A., Cisterna, B. A., Revete, J., Luis, L., Ibarra, E., Segura González, E.A., Molino, J., & Manzoor, A., Dar, A.H., Pandey, V.K., Shams, R., Khan, S., Panesar, P.S., Kennedy, J.F., Fayaz, U., & Khan, S.A. (2022). Recent insights into polysaccharide-based hydrogels and their potential applications in food sector: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 213, 987–1006. doi: [10.1016/j.ijbiomac.2022.06.044](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.044)
- Martínez-Sabando, J., Coin, F., Melillo, J. H., Goyanes, S., & Cervený, S. (2023). A review of pectin-based material for applications in water treatment. *Materials*, 16(6), 2207. doi: [10.3390/ma16062207](https://doi.org/10.3390/ma16062207)
- Masinga, P., Simbanegavi, T. T., Makuvura, Z., Marumure, J., Chaukura, N., & Gwenzi, W. (2024). Emerging organic contaminants in the soil-plant-receptor continuum: Transport, fate, health risks, and removal mechanisms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(4), 367. doi: [10.1007/s10661-023-12282-7](https://doi.org/10.1007/s10661-023-12282-7)
- McNamara, J.T., Morgan, J.L., & Zimmer, J. (2015). A molecular description of cellulose biosynthesis. *Annual Review of Biochemistry*, 84, 895–921. doi: [10.1146/annurev-biochem-060614-033930](https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060614-033930)
- Mone, M., Lambropoulou, D.A., Bikiaris, D.N., & Kyzas, G.Z. (2020). Chitosan grafted with biobased 5-hydroxymethyl-furfural as adsorbent for copper and cadmium ions removal. *Polymers*, 12(5), 1173. doi: [10.3390/polym12051173](https://doi.org/10.3390/polym12051173)
- Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Quiñonez-Barzola, X., Jaya-Montalvo, M., & Carrión-Mero, P. (2022). What do we know about water scarcity in semi-arid zones? A global analysis and research trends. *Water*, 14(17), 2685. doi: [10.3390/w14172685](https://doi.org/10.3390/w14172685)
- Murphy, E.J., Fehrenbach, G. W., Abidin, I.Z., Buckley, C., Montgomery, T., Pogue, R., Murray, P., Major, I., & Rezoagli, E. (2023). Polysaccharides—Naturally occurring immune modulators. *Polymers*, 15(10), 2373. doi: [10.3390/polym15102373](https://doi.org/10.3390/polym15102373)
- Nath, J., Sharma, K., Sehgal, R., & Kumar, S. (2024). Polysaccharide-based superabsorbent hydrogels. In V. K. Thakur & M. K. Thakur (Eds.), *Polysaccharides-Based Hydrogels*. Elsevier. pp. 265–305. doi: [10.1016/B978-0-323-99341-8.00009-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99341-8.00009-0)
- NCBI. (2025). National Center for Biotechnology Information. (2025). *PubChem Compound Summary for CID 311, Citric Acid*. Retrieved June 28, 2025, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Citric-Acid>
- Nikpey, S., Rahimibadr, B., Nozari, N., & Rezaei, S. (2025). The effect of water scarcity on Iran's food security. *Brazilian Journal of Biology*, 85, e291705. doi: [10.1590/1519-6984.291705](https://doi.org/10.1590/1519-6984.291705)
- Ojo, A.O. (2023). An overview of lignocellulose and its biotechnological importance in high-value product production. *Fermentation*, 9(11), 990. doi: [10.3390/fermentation9110990](https://doi.org/10.3390/fermentation9110990)
- Ojstršek, A., & Gorgieva, S. (2024). Cellulose nanofibrils-reinforced pectin membranes for the adsorption of cationic dyes from a model solution. *Polymers*, 16(6), 724–734. doi: [10.3390/polym16060724](https://doi.org/10.3390/polym16060724)
- Omotoso, A.B., & Omotayo, A.O. (2024). The interplay between agriculture, greenhouse gases, and climate change in Sub-Saharan Africa. *Regional Environmental Change*, 24(1), 101592. doi: [10.1007/s10113-023-02159-3](https://doi.org/10.1007/s10113-023-02159-3)
- Otalora, A., Lerma, T.A., Arrieta Urango, Y.A., & Palencia, M. (2021). Emerging organic pollutants in aqueous environments: Detection, monitoring, and removal techniques. *Journal of Science with Technological Applications*, 10(68), 92–153. doi: [10.34294/j.jsta.21.10.68](https://doi.org/10.34294/j.jsta.21.10.68)

- Wu, T., Sawut, A., & Simayi, R. (2025). Preparation and heavy metal adsorption performance of 2-aminopyridine-modified sodium alginate/polyacrylic acid hydrogel. *Gels*, 11(4), 224. doi: 10.3390/gels11040224
- Yan, D., Li, Y., Liu, Y., Li, N., Zhang, X., & Yan, C. (2021). Antimicrobial properties of chitosan and chitosan derivatives in the treatment of enteric infections. *Molecules*, 26 (23), 7136. doi: 10.3390/molecules26237136
- Yamine, P., El Safadi, A., Kassab, R., El-Nakat, H., Obeid, P.J., Nasr, Z., Tannous, T., Sari-Chmaysem, N., Mansour, A., & Chmaysem, A. (2025). Types of crosslinkers and their applications in biomaterials and biomembranes. *Chemistry*, 7(2), 61-75. doi: 10.3390/chemistry7020061
- Yang, S. Y., Bai, B.C., & Kim, Y.R. (2024). Effective surface structure changes and characteristics of activated carbon with the simple introduction of oxygen functional groups by using radiation energy. *Surfaces*, 7 (1), 12–25. doi: 10.3390/surfaces7010002
- Yazid, N.S.M., Abdullah, N., Muhammad, N., & Peralta, H.M.M. (2018). Application of starch and starch-based products in food industry. *Journal of Science and Technology*, 10 (2), 3–22. doi: 10.30880/jst.2018.10.02.023
- Zhang, Q., Zhang, L., Wu, W., & Xiao, H. (2020). Methods and applications of nanocellulose loaded with inorganic nanomaterials: A review. *Carbohydrate Polymers*, 229, 115454. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115454
- Zhang, X., Wang, X., Fan, W., Liu, Y., Wang, Q., & Weng, L. (2022). Fabrication, Property and Application of Calcium Alginate Fiber: A Review. *Polymers (Basel)*, 14(15), 15-35. doi: 10.3390/polym14153227
- Zhang, Y., Zhao, M., Cheng, Q., Wang, C., Li, H., Han, X., Fan, Z., Su, G., Pan, D., & Li, Z. (2021). Research progress of adsorption and removal of heavy metals by chitosan and its derivatives: A review. *Chemosphere*, 279, 130927. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130927
- Zhao, C., Liu, G., Tan, Q., Gao, M., Chen, G., Huang, X., Xu, X., Li, L., Wang, J., Zhang, Y., Xu, D. (2023). Polysaccharide-based biopolymer hydrogels for heavy metal detection and adsorption. *Journal of Advanced Research*, 44, 53-70. doi: 10.1016/j.jare.2022.04.005
- Zhao, D., & Shen, X. (2023). Preparation of chitosan-diatomite/calcium alginate composite hydrogel beads for the adsorption of Congo Red dye. *Water*, 15(12), 5-32. doi: 10.3390/w15122254
- Zheng, W., Sun, C., & Bai, B. (2017). Molecular dynamics study on the effect of surface hydroxyl groups on three-phase wettability in oil-water-graphite systems. *Polymers*, 9(8), 370-385. doi: 10.3390/polym9080370
- Zhou, G., Liu, C., Chu, L., Tang, Y., & Luo, S. (2016). Rapid and efficient treatment of wastewater with high-concentration heavy metals using a new type of hydrogel-based adsorption process. *Bioresource Technology*, 219, 451-457. doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.038
- Zhou, Y., Chen, K., Cheng, H., & Zhang, S. (2025). Recent advances in polysaccharide-based hydrogels for tumor immunotherapy. *Gels*, 11(3), 152-169. doi: 10.3390/gels11030152
- Zhu, H., Chen, S., & Luo, Y. (2023). Adsorption mechanisms of hydrogels for heavy metal and organic dyes removal: A short review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 6-25. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100552
- Reginensi, D. (2022). Advancements in the use of hydrogels for regenerative medicine: Properties and biomedical applications. *International Journal of Biomaterials*, 2022, 3606765. doi: 10.1155/2022/3606765
- Ribeiro, M.M., Simoes, M., Vitorino, C., & Mascarenhas-Melo, F. (2025). Physical crosslinking of hydrogels: The potential of dynamic and reversible bonds in burn care. *Coordination Chemistry Reviews*, 542, 216868. doi: 10.1016/j.ccr.2025.216868
- Saji, S., Hebden, A., Goswami, P., & Du, C. (2022). A brief review on the development of alginate extraction process and its sustainability. *Sustainability*, 14(9), 10-33. doi: 10.3390/su14095181
- Sandu, T., Chiriac, A.-L., Zaharia, A., Iordache, T.V., & Sarbu, A. (2025). New trends in preparation and use of hydrogels for water treatment. *Gels*, 11(4), 238-247. doi: 10.3390/gels11040238
- Sarraf, A., Verton, E., Addoun, N., Boual, Z., Ould El Hadj, M. D., El Alaoui-Talibi, Z., El Modafar, C., Abdelkafi, S., Fendri, I., Delattre, C. (2021). Polysaccharides and derivatives from Africa to address and advance sustainable development and economic growth in the next decade. *Applied Sciences*, 11(11), 3-19. doi: 10.3390/app11115243
- Sayed, M.M. (2023). Production of polymer hydrogel composites and their applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 31, 2855–2879. doi: 10.1007/s10924-023-02796-z
- Seeberger, P.H. (2022). Monosaccharide diversity. Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York, USA.
- Sharma, G., Verma, A., García-Peñas, A., & Kumar, A. (2024). Polysaccharide-based biopolymeric magnetic hydrogels for remediation of antibiotics from aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283, 2-25. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137555
- Shen, L., & Patel, M.K. (2008). Life cycle assessment of polysaccharide materials: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 16(2), 154–167. doi: 10.1007/s10924-008-0092-9
- Si, R., Pu, J., Luo, H., Wu, C., & Duan, G. (2022). Nanocellulose-based adsorbents for heavy metal ion. *Polymers*, 14(24), 3-18. doi: 10.3390/polym14245479
- Stanciu, M.C., & Teacă, C.A. (2024). Natural polysaccharide-based hydrogels used for dye removal. *Gels*, 10(4), 243-254. doi: 10.3390/gels10040243
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., & Sutton, D.J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Experientia Supplementum*, 101, 133–164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Thang, N.H., Chien, T.B., & Cuong, D. X. (2023). Polymer-based hydrogels applied in drug delivery: An overview. *Gels*, 9(7), 523-538. doi: 10.3390/gels9070523
- Upadhyay, U., Sireesha, S., Gupta, S., & Sreedhar, I. (2022). Freeze v/s air-dried alginate-pectin gel beads modified with sodium dodecyl sulphate for enhanced removal of copper ions. *Carbohydrate Polymers*, 301, 3-26. doi: 10.1016/j.carbpol.2022.120294
- Vasil'kov, A., Rubina, M., Naumkin, A., Buzin, M., Dorovatovskii, P., Peters, G., & Zubavichus, Y. (2021). Cellulose-based hydrogels and aerogels embedded with silver nanoparticles: Preparation and characterization. *Gels*, 7(3), 82-93. doi: 10.3390/gels7030082
- Wang, Y., Shen, Z., Wang, H., Song, Z., Yu, D., Li, G., Liu, X., & Liu, W. (2025). Progress in research on metal ion crosslinking alginate-based gels. *Gels*, 11(1), 1-16. doi: 10.3390/gels11010016

پی‌نوشت‌ها

1. Adsorbents
2. Cross-linking agents
3. Egg-box model
4. Freeze-Thaw cycles
5. Tripolyphosphate
6. Swelling ratio
7. Mechanical stability
8. Adsorption kinetics
9. Functional groups
10. Complexation and Chelation
11. Ion exchange
12. Arsenate
13. Physical filtration
14. Catalytic degradation
15. Antimicrobial properties
16. Emerging organic contaminants
17. Bioaccumulation
18. π - π interactions
19. *Salmonella*
20. Quaternary Ammonium Groups
21. Eutrophication
22. Hydrophobic
23. Life Cycle Assessment