

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 1
Pages 65-76
ISSN: 2252-0449

A Review of Types of Bio-based Superabsorbent Polymers

Hesam Niknezhad^{1*} and Amir Mohamadpour²

1. Department of Inorganic Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Guilan, Rasht, Iran

2. Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources, Tehran University,
Tehran, Iran

Received: 5 October 2024, Accepted: 3 March 2025

Abstract

Cellulose is a polysaccharide with numerous hydroxyl groups and high water absorption capacity, and is the most abundant natural polymer used in the industry. Cellulose-based hydrogels are superabsorbents that provide the ability to create three-dimensional networks. Chemical bonds or other cohesive forces, such as hydrogen bonding or ionic interactions, hold the cellulose chains together. Hydrogels can absorb water and other aqueous liquids into their three-dimensional networks and swell, but they are insoluble in them. Today, there is an increasing demand for biodegradable materials and products made from renewable sources such as cellulose. The biodegradability and environmental friendliness of cellulose have led to its widespread use in personal care products. Cellulose hydrogels act as superabsorbents for these products, which is used as the main absorbent or as an auxiliary absorbent with the ability to protect the skin. Hygienic absorbent cellulose products such as diapers, panty liners, tampons, toilet paper, and paper towels are used as personal care products. These products are available in different absorbency ratings from low to very high. Superabsorbent products are made using cellulose-based hydrogels. In this article, the applications of cellulose-based hydrogel in a variety of personal care products were reviewed.

Key Words

polysaccharide,
cellulose products,
superabsorbent,
biodegradability,
personal care products

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hesam.nik.chem@gmail.com

مروری بر انواع پلیمرهای ابرجاذب زیست‌پایه

حسام نیک‌نژاد^{۱*} و امیر محمدپور تسبیه^۲

۱- رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده شیمی، گروه شیمی معدنی

۲- تهران، دانشگاه تهران، پردیس منابع طبیعی، دانشکده صنایع چوب و کاغذ

دریافت: ۱۴۰۳/۷/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

سلولوز پلی‌ساکاریدی است که با گروه‌های هیدروکسیل متعدد و ظرفیت جذب آب زیاد به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی در صنعت استفاده می‌شود. هیدروژل‌های برپایه سلولوز، ابرجاذب‌هایی هستند که قابلیت ایجاد شبکه‌های سه‌بعدی را دارند. پیوندهای شیمیایی یا سایر نیروهای چسبنده، مانند پیوند هیدروژنی یا برهم‌کنش‌های یونی، زنجیرهای سلولوز را در کنار هم نگه می‌دارند. هیدروژل‌ها می‌توانند آب و سایر مایعات آبی را در شبکه‌های سه‌بعدی خود جذب کنند و به‌دنبال آن متورم شوند، اما در آن‌ها نامحلول باشند. امروزه تقاضای فزاینده‌ای برای مواد زیست‌تخریب‌پذیر و محصولات ساخته‌شده از آن‌ها مانند سلولوز وجود دارد. زیست‌تخریب‌پذیری و سازگاری با محیط‌زیست مناسب سلولوز، استفاده گسترده از آن را در محصولات مراقبت شخصی امکان‌پذیر کرده است. هیدروژل سلولوزی برای این محصولات به‌عنوان یک ابرجاذب عمل می‌کند و به‌عنوان عامل جذب اصلی یا جاذب کمکی با قابلیت محافظت از پوست استفاده می‌شود. محصولات جاذب سلولوزی بهداشتی مانند پوشک، آستر لباس‌زیر، تامپون، دستمال توالت و دستمال کاغذی به‌عنوان محصولات مراقبت شخصی استفاده می‌شوند. این محصولات در رتبه‌بندی‌های مختلف جذب از کم تا بسیار زیاد موجود هستند. با استفاده از هیدروژل برپایه سلولوز، محصولات ابرجاذب ساخته می‌شوند. در این مقاله، کاربردهای هیدروژل برپایه سلولوز در انواع محصولات مراقبت شخصی مرور شده است.

چکیده



امیر محمدپور تسبیه



حسام نیک‌نژاد

واژگان کلیدی

پلی‌ساکارید،
محصولات سلولوزی،
ابرجاذب،
زیست‌تخریب‌پذیری،
محصولات مراقبت شخصی

مقدمه

سلولوز فراوان‌ترین پلی‌ساکارید روی زمین است. می‌توان آن را از منابع متعددی مانند دیواره‌های سلولی چوب و گیاهان، برخی از گونه‌های باکتری و جلبک‌ها و نیز تونیکات‌ها، تنها جانوران شناخته‌شده حاوی سلولوز، به‌دست آورد. این فراوانی ذاتی به‌طور طبیعی، راه را برای کشف کاربردهای جدید این ماده همه‌کاره هموار می‌کند. پلیمرهای ابرجاذب (SAPs) در درجه اول به‌عنوان جاذب آب و محلول‌های آبی در محصولات آبی در محصولات، محصولات بی‌اختیاری بزرگسالان، محصولات بهداشتی زنانه و کاربردهای مشابه استفاده می‌شوند. بی‌شک در این کاربردها، مواد ابرجاذب جایگزین مواد جاذب سنتی مانند پارچه، پنبه و الیاف سلولوزی می‌شوند که محدودیت‌هایی مانند بازدهی و بازیافتپذیری کم و نشستی دارند [۱]. ابرجاذب‌ها مواد پلیمری کاربردی جدیدی هستند که می‌توانند مایعات را چند هزار برابر جرم خود جذب و حفظ کنند. در این مقاله، ابرجاذب‌هایی که در ساختار محصولات سلولوزی استفاده، مقایسه و بررسی شده‌اند. پلیمرهای سنتزی مانند پلی‌آکرلیک اسید، پلی‌آکریل آمید، پلی‌آکریلونیتریل و پلی‌وینیل الکل در مقایسه با پلیمرهای طبیعی مانند سلولوز، کیتوسان و نشاسته خواص جذب آب بیشتری نشان می‌دهند، اما به‌راحتی تجزیه نمی‌شوند. در نتیجه، اغلب لازم است که پلیمرهای سنتزی یا گروه‌های عاملی ابرجاذب پیوندی را روی پلیمرهای طبیعی اصلاح کرد و سپس آن‌ها را برای متعادل کردن خواص مواد پیوند داد. در مقایسه با نانوذرات ابرجاذب که به‌طور گسترده استفاده می‌شوند، پژوهش‌ها درباره‌ی الیاف و ژل‌های ابرجاذب در حال افزایش است. این مواد، به‌ویژه در زمینه‌های زیست‌پزشکی مانند دارورسانی، پانسمان زخم و مهندسی بافت درخورد توجه‌اند [۲]. پلیمرهای ابرجاذب در بسیاری از کاربردها مانند پوشک، لوازم آرایشی و پدهای جاذب استفاده می‌شوند. ابرجاذب‌ها با توجه به ساختار بسیار ویژه آن‌ها دارای ظرفیت فوق‌العاده‌ای برای جذب مقدار زیادی مایع هستند [۳]. پلیمر ابرجاذب با گروه‌های آب‌دوست قوی مانند کربوکسیل و هیدروکسیل می‌تواند صدها برابر بیشتر از وزن خود آب را در زمان کوتاهی جذب کند و حتی در دما و فشار زیاد آن را به‌خوبی حفظ کند. پلیمر ابرجاذب نسبت به سایر مواد جاذب برتر است. این مواد به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند پوشک، نوار بهداشتی و پوشش‌های محلول در آب استفاده شده است [۴].

پلیمرهای ابرجاذب‌های مشتق از پلی‌ساکاریدها

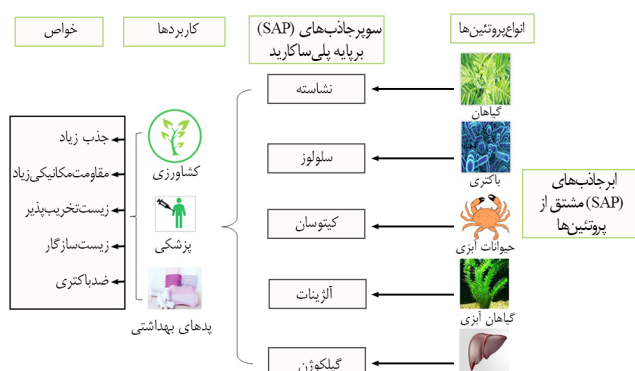
پلی‌ساکاریدها درخورد توجه‌ترین شکل کربوهیدرات‌ها در

موجودات زنده هستند و به‌وفور در اشکال مختلف هم در گیاهان و هم در حیوانات موجود هستند. آن‌ها ساختارهای بلوری و بی‌شکلی هستند که از درشت‌مولکول‌های مونوساکارید تشکیل شده‌اند و در آب نامحلول هستند. ابرجاذب‌های برپایه‌ی پلی‌ساکارید مانند سلولوز، نشاسته، کیتوسان و آلژینات‌های ارزان، تجدیدپذیر، زیست‌تخریب‌پذیر، زیست‌سازگار و دارای خواص جذب بیشتر هستند. این مواد توجه پژوهشگران را برای استفاده در کاربردهای مختلف مانند کشاورزی و زیست‌پزشکی جلب کرده‌اند. شکل ۱، منبع ابرجاذب‌های مختلف برپایه‌ی پلی‌ساکارید و خواص و کاربردهای آن‌ها را نشان می‌دهد.

ابرجاذب‌های برپایه‌ی سلولوز

سلولوز ($C_6H_{10}O_5$) نوعی پلیمر آلی طبیعی رایج است که در مواد طبیعی مختلف مانند چوب، الیاف پنبه، الیاف و کنف خشک یافت می‌شود، درصد سلولوز در این مواد به‌ترتیب ۴۰٪ تا ۵۰٪، ۸۲٪ تا ۹۶٪ و ۷۰٪ تا ۹۹٪ متغیر است. به‌طور کلی، سلولوز و ابرجاذب‌های (SAP) برپایه‌ی مشتقات آن از پلی‌ساکاریدهای حاوی پیوند β مرتبط با واحدهای D-گلوکوز تشکیل شده‌اند. ماهیت آب‌دوست سلولوز با وجود گروه هیدروکسیل (OH^-) در سراسر ساختار آن با داشتن درجه یونش بیشتر تقویت می‌شود. این ویژگی به افزایش جذب سلولوز و بهبود کارایی محصول سلولوزی کمک می‌کند. کربوکسی‌متیل سلولوز (CMC)، هیدروکسی‌متیل سلولوز (HMC)، هیدروکسی‌اتیل سلولوز (HEC) و هیدروکسی‌پروپیل متیل سلولوز (HPC)، همه مواد مهم در فرمول‌بندی ابرجاذب‌ها برپایه‌ی سلولوز هستند.

چهار نوع جایگزینی در ساختار سلولوزی وجود دارد: (۱) نوع جایگزین، (۲) وزن مولکولی (Mw)، (۳) درجه جایگزینی (Ds) و (۴) توزیع جایگزین. جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل با



شکل ۱- منابع مختلف ابرجاذب‌های برپایه‌ی پلی‌ساکارید و کاربرد آن‌ها [۱].

کربوکسی‌متیل، هیدروکسی‌متیل و سایر گروه‌ها در ساختار سلولوز به‌شدت بر خواص سلولوز اثر می‌گذارد که دلیل تورم و درنهایت حل‌پذیری آن است. از این‌رو، وزن مولکولی بیش از یک نقطه مهم است که به تشکیل شبکه ژل منجر می‌شود. رویکردهای بسیاری برای استخراج سلولوز از ضایعات گزارش شده است. Lacoste و همکاران، کربوکسی‌متیل سلولوز را از مقوای دورریز با استفاده از روش واکنش شیمیایی در شرایط قلیایی با اکسند متوسط و انجام مراحل قلیایی شدن و استری شدن استخراج کردند. مشتق سلولوز حاصل، زیست‌تخریب‌پذیر بود و نوعی ابرجاذب زیست‌تخریب‌پذیر با ترکیب سیتریک اسید زیست‌پایه پیوند عرضی‌یافته با کربوکسی‌متیل سلولوز تولید شد. این ترکیب قابلیت جذب به‌ترتیب $45/87 \text{ g/g}$ آب و $7/45 \text{ g/g}$ محلول نمکی را داشت و این یکی از برنامه‌های کاربردی در حوزه پوشاک است (جدول ۱) [۵].

ابر جاذب‌های بر پایه کیتوسان-کیتین

کیتوسان نوعی پلی‌ساکارید خطی بوده که از ترکیب تصادفی واحدهای N-استیل-D-گلوکوزامین و D-گلوکوزامین با پیوندهای β -گلیکوزیدی ساخته شده است. این ترکیب مقدار

زیادی گروه‌های هیدروکسیل و آمین دارد که امکان انجام تغییرات شیمیایی، به‌ویژه فرایند اتصال زنجیری را فراهم می‌کند. از نظر تجاری، ۶۰٪ تا ۱۰۰٪ کیتوسان از کیتین استخراج می‌شود که بخش ساختاری اسکلت خارجی خرچنگ‌ها و میگوها و همچنین دیواره سلولی قارچ‌ها را تشکیل می‌دهد. این فرایند با استفاده از روش آسیل‌دار کردن انجام شده و کیتوسان حاصل، وزنی در حدود 3800 Da تا 20000 Da دارد.

وجود گروه‌های هیدروکسیل و آمین در ساختار اصلی کیتوسان، باعث پیچیدگی در تشکیل ساختار آن حین فرایند تولید می‌شود. این ترکیب در آب و محلول‌های قلیایی نامحلول است، اما در محیط اسیدی (معدنی و آلی) حل‌پذیر است. Chen و همکاران، ابرجاذب جدیدی بر پایه کیتوسان را از طریق پلیمرشدن پیوندی با سدیم پلی‌آکریلات و ۱-وینیل-۲-پیرولیدون ساختند. این ماده جذب درخور توجهی را در محیط‌های مختلف به مقدار 1268 g/g در آب مقطر، 165 g/g در محلول نمکی، 121 g/g در ادرار مصنوعی و 112 g/g در خون مصنوعی نشان داد. کیتوسان خواص ضد میکروب مؤثری در برابر استافیلوکوکوس اورئوس (باکتری گرم مثبت) و اشیریشیا کلی (باکتری گرم منفی) دارد که

جدول ۱- ساختار شیمیایی، گروه عاملی، حلال‌های اصلی و کاربردهای مشتقات سلولوز.

مشتقات سلولوز	نوع	گروه عاملی	حلال	کاربردهای عمده	مرجع
اثر سلولوزی	متیل سلولوز	OH یا OCH_3	آب سرد (50°C)، استیک اسید	صنایع غذایی و مهندسی بافت	۶
	CMC	OH یا OCH_2COOH	آب	مهندسی بافت، پانسمان زخم، دارورسانی، صنایع غذایی، فناوری‌های جذب، رنگ‌های بر پایه آب، نساجی و صنعت کاغذ	۷
	اتیل سلولوز	OH یا OCH_2CH_3	گلیسرول، پروپان-۱، ۲-دی‌ال، نامحلول در آب	صنعت کاغذ و مهندسی بافت	۸
	هیدروکسی پروپیل سلولوز	OH یا $\text{OCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$	آب	مهندسی بافت، دارورسانی، التیام زخم و فناوری‌های حسگر	۹
اثر سلولوز	استات سلولوز	OH یا $\text{O}(\text{C}=\text{O})\text{CH}_3$	استون، استیک اسید و دی‌متیل استامید	صنعت جداسازی، نساجی، مهندسی بافت، التیام زخم، دارورسانی و بسته‌بندی مواد غذایی	۱۰
	نیترات سلولوز	OH یا ONO_2	متانول، نیتروبنزن و مخلوط اتانول	صنعت جداسازی، رنگ، پوشش و مواد منفجره	۱۱
	سولفات سلولوز	OH یا OSO_3H	آب	مهندسی بافت، دارورسانی، بی‌حرکت‌سازی-کپسول‌سازی سلولی	۱۲

آن را برای کاربردهایی نظیر سامانه‌های دارورسانی و محصولات بهداشتی ایده‌آل می‌سازد [۱۳].

Narayanan و همکاران، دو ابرجاذب نوآورانه برپایه کیتوسان را با نام‌های CHEDUR و CHCAUR ساختند. CHEDUR از طریق اتصال عرضی مولکول‌های کیتوسان با محصول افزایشی EDTA-اوره و CHCAUR با سنتز آب‌گرمایی کیتوسان، سیتریک اسید و اوره تهیه شدند. آن‌ها گزارش کردند، وجود درشت‌منافذ بر سطح ماتریس کیتوسان و مقدار اولیگومرها بر ظرفیت جذب آن اثر دارد. براین‌اساس، CHEDUR جذب 1250 g/g در آب مقطر و CHCAUR جذب 210 g/g در محلول نمکی را نشان دادند. نتایج این مطالعه نشان داد، میزان جذب این SAP‌های جدید بیش از پوشک‌های برند Huggies است [۱۴].

ابر جاذب‌های بر پایه نشاسته

نشاسته نوعی ماده کربوهیدراتی پلیمری ناهمگن با ریزساختار پیچیده است که بافتی سفیدرنگ، بدون طعم و بو دارد و در الکل و آب سرد نامحلول است. آثار فیزیکی شیمیایی نشاسته مانند حل‌پذیری، دمای ژل شدن، گرانروی و بازگشت به حالت اولیه به نسبت آمیلوز به آمیلوپکتین در گرانول‌های نشاسته و ساختار مولکولی آن‌ها بستگی دارد که بر عملکرد، ساختار و پایداری مکانیکی ابرجاذب‌های بر پایه نشاسته اثر می‌گذارند [۱۵]. بیشتر گرانول‌های نشاسته از آمیلوز تشکیل شده‌اند که شامل واحدهای گلوکوز با پیوند α بوده و وزن مولکولی آن حدود 10^6 است. از سوی دیگر، آمیلوپکتین ساختار بسیار شاخه‌داری دارد که از زنجیرهای کوتاه با وزن مولکولی حدود 10^8 تشکیل شده است. به‌طورکلی، نشاسته منبع مهم و رایجی برای موجودات زنده محسوب می‌شود. بیشتر غذاهای مصرفی مانند گندم، سیب‌زمینی، ذرت و برنج حاوی مقادیر زیادی نشاسته هستند. استخراج ابرجاذب‌های بر پایه نشاسته از محصولات مختلف، جذب‌پذیری درخورد توجهی را نشان می‌دهد. Zhang و همکاران، ماده ابرجاذبی بر پایه نشاسته برنج ایندیکا با استفاده از پلیمرشدن پیوندیافته با $23/6\%$ مقدار آمیلوز ساختند که جذب آب آن 439 g/g بود و خواص زیست‌تخریب‌پذیری بهتری داشت. همچنین، نوعی ابرجاذب زیست‌تخریب‌پذیر نشاسته‌ای با جذب آب 500% توسط این پژوهشگران گزارش شده است که با استفاده از عامل اتصال‌دهنده N^H, N^H -متیلن-بیس‌آکریل‌آمید سنتز شد. نسبت ترکیب آمیلوز به آمیلوپکتین در ابرجاذب‌ها و کاهش طول بخش پیوندیافته با افزایش غلظت آمیلوپکتین در نشاسته بر خاصیت جذب‌پذیری آن

اثرگذار است. خاصیت تخریب‌پذیری ابرجاذب‌های بر پایه نشاسته بسیار درخورد توجه است و گزارش‌هایی مانند مطالعه Relio و همکاران نشان می‌دهد، سرعت زیست‌تخریب‌پذیری ماده ابرجاذب بر پایه پلی‌ساکارید-پلی‌آکرلیک اسید-نشاسته کاساوا که تحت تابش گاما قرار گرفته‌اند، پس از ۸۵ روز حدود 42% بوده و وجود نشاسته باعث افزایش خاصیت زیست‌تخریب‌پذیری آن می‌شود [۱۶].

ابر جاذب‌های بر پایه کاراگینان

کاراگینان‌ها نوعی کلئوید آب‌دوست هستند که به‌شکل ترکیبات خشک و جامد موجود در دیواره سلولی بسیاری از گونه‌های جلبک قرمز دریایی معروف به رودوفیتا (Rhodophyta) یافت می‌شوند. این ترکیبات به خانواده پلی‌ساکاریدهای سولفات‌ی خطی تعلق دارند که معمولاً از طریق استخراج قلیایی از برخی گونه‌های جلبک‌های دریایی به‌دست می‌آیند. کاراگینان‌ها عملکردهای ساختاری مشابه سلولوز در گیاهان دارند و به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف مانند سامانه‌های دارورسانی، بازسازی اسکلت، عامل ژل‌کننده، هیدروژل‌ها و بسیاری کاربردهای دیگر استفاده می‌شوند. هیدروژل‌های بر پایه کاراگینان خواص مکانیکی خوب، شکل‌شناسی سازگار، تخریب‌پذیری دارند و دوستدار محیط‌زیست هستند. آن‌ها می‌توانند به‌عنوان حامل در سامانه‌های رهایش سلولی مفید باشند.

شکل کامپوزیتی این ماده با غلظت کمتر پلیمر، جذب آب و سرعت تخریب بیشتری را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، Bardajee و همکاران نوعی هیدروژل جدید را با کوپلیمرشدن پیوندی آکریل آمید روی کاپاکاراگینان با ژلاتین تهیه کردند که نسبت تورم درخورد توجهی معادل 3310 g/g در آب مقطر نشان داد. انواع دیگری نیز توسعه یافته‌اند، مانند اسفنج‌ها و هیدروژل‌های کاراگینان که با سایر زیست‌مولکول‌ها اصلاح شده‌اند و به‌دلیل خواص عالی جذب مایع استفاده می‌شوند. هیدروژل نانوکامپوزیت متشکل از کاپاکاراگینان و نانوذرات نقره کلرید نتایج مؤثری را به‌عنوان جاذب بلور بنفش نشان داد. مقدار جذب آن مطابق با مدل سینتیکی شبه‌مرتب دوم و خودبه‌خود (با مقدار $\Delta G > 0$) بود. افزون‌براین، مواد مزبور می‌توانند در کاربردهای پانسمان زخم نیز استفاده شوند. Chandika و همکاران نوعی هیدروژل زیست‌پلیمری بر پایه کاراگینان را ساختند که با متاکریلات اصلاح شده بود و در کاربردهای پانسمان زخم استفاده شد. این هیدروژل خواص مکانیکی بهبودیافته، پایداری گرمایی خوب، سمیت سلولی کم و عملکرد درخورد توجهی را نشان داد [۷۸].

ابرجاذب‌های برپایه آلزینات

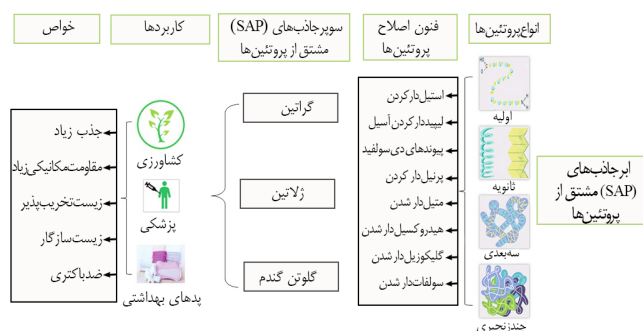
آلزینیک اسید، پلی‌ساکارید طبیعی محلول در آب است که از مانورونیک اسید β و گالورونیک اسید α تشکیل شده است و الگوی نامنظمی در طول زنجیر پلیمر دارد. این ماده، یکی از فراوان‌ترین زیست‌موادهاست که از جلبک‌های قهوه‌ای و باکتری‌ها به دست می‌آید و در ساختار بین‌سلولی به شکل ژل حاوی نمک‌هایی مانند سدیم، کلسیم، منیزیم، استرانسیم و باریم قرار دارد [۱۹]. آلزینات به دلیل خواص جالبی که دارد، مانند خاصیت ژلی، ماهیت گران‌رو، خواص تثبیت‌کننده و جذب زیاد آب در زیست‌مواد و مراقبت‌های شخصی به طور گسترده استفاده می‌شود. پژوهش‌های مختلف در زمینه استفاده از ابرجاذب‌های برپایه آلزینات برای کاربردهای بهداشتی و پزشکی انجام شده است. Ma و همکاران نوعی کامپوزیت ابرجاذب دوستدار محیط‌زیست برپایه سدیم آلزینات و لس آلی (organo-loess) معرفی کردند که خواص تورم زیادی دارد. لس نوعی رسوبات بادی دارای رس است. طبق عملکرد این کامپوزیت ابرجاذب دوستدار محیط‌زیست، این ماده می‌تواند به عنوان گزینه امیدوارکننده‌ای برای کاربردهای مختلف استفاده شود. افزون‌براین، ترکیب آلزینات و الیاف کیتوسان می‌تواند در محصولات بهداشتی استفاده شود. درواقع، این مواد می‌توانند به عنوان لایه تماس ترکیبی استفاده شوند. بدین ترتیب، خواص ضد میکروب آن‌ها موجب کاهش نشت و جلوگیری از آلودگی و انتقال بیماری‌های عفونی می‌شود. همچنین، این ترکیب می‌تواند نوعی رابط تازه و خشک بین بدن و جاذب فراهم کند [۲۰، ۲۱].

ابرجاذب‌های مشتق از پروتئین‌ها

تلاش برای توسعه جایگزین‌های طبیعی به جای ابرجاذب‌های سنتزی به طور درخور توجهی تقویت شده است، زیرا پژوهشگران به دنیای مهندسی ذرات ابرجاذب برپایه پروتئین وارد شده‌اند. پروتئین‌ها مولکول‌هایی هستند که به طور گسترده در موجودات زنده یافت می‌شوند. آن‌ها تقریباً در تمام سازوکارهای فیزیولوژیکی شناخته شده مشارکت دارند که پروتئین‌ها، را به مهم‌ترین زیست‌مولکول‌ها تبدیل می‌کند. پروتئین‌ها، پلیمرهایی از واحدهای کوچک‌تر به نام اسیدهای آمینه هستند که از طریق پیوندهای آمیدی به هم متصل می‌شوند. برخلاف سایر زیست‌مولکول‌ها، پروتئین‌ها دارای چهار سطح سازمان‌یافته بوده که شامل ساختارهای اولیه، ثانویه، شکل سه‌بعدی و ساختار چندزنجیری است. سلسله‌مراتب این ساختارها براساس سازمان‌دهی اسیدهای آمینه و تشکیل مارپیچ‌های α و صفحه‌های β به عنوان ساختارهای ثانویه و

همچنین تا شدن زنجیرهای پلی‌پپتیدی برای تشکیل دامنه‌ها در شکل سه‌بعدی تعریف می‌شود. افزون‌براین، زنجیرهای پلی‌پپتیدی مختلف از طریق پیوندهای کووالانسی و غیرکووالانسی به هم متصل می‌شوند تا ساختار چندزنجیری را تشکیل دهند [۲۲]. ۲۰ اسید آمینه ضروری به همراه سایر اسیدهای آمینه غیرریبوزومی، پروتئین‌های ساختاری و عملکردی مختلفی را تشکیل می‌دهند. به طور کلی، پروتئین‌ها به دو دسته رشته‌ای و کروی تقسیم می‌شوند که تفاوت‌های عمده آن‌ها ناشی از حلالیت در آب، توالی اسیدهای آمینه، شکل و هدف تولید آن‌هاست.

پروتئین‌های کروی دارای توالی‌های تکراری اسیدهای آمینه هستند، حلالیت بیشتری در آب دارند و بیشتر به فرایندهای فیزیکی‌شیمیایی موجودات زنده مرتبط هستند، درحالی‌که پروتئین‌های رشته‌ای دارای ساختارهای اولیه نامنظم هستند، حلالیت کمتری در آب دارند و از اجزای اصلی ساختارهای پیش‌هسته‌ای‌ها (prokaryote) و هوسته‌ای‌ها (eukaryote) محسوب می‌شوند. پروتئین‌ها می‌توانند گزینه مطلوبی برای تولید ابرجاذب‌های طبیعی باشند، زیرا به راحتی می‌توان از آن‌ها برای توسعه مواد ترکیبی یا کامپوزیتی جدید استفاده کرد. سلسله‌مراتب ساختاری چندفازی پروتئین‌ها به آن‌ها برتری درخور توجهی نسبت به سایر زیست‌مولکول‌ها می‌دهد و امکان تشکیل پیوندهای متعدد در موقعیت‌های مختلف و طیف وسیعی از خواص عملکردی مانند پتانسیل اتصال بین‌مولکولی را فراهم می‌کند. اصلاح پروتئین‌ها می‌تواند از طریق فنون مختلف پس از سنتز انجام شود. برخی از این اصلاحات می‌توانند در افزایش ماهیت آب‌دوستی پروتئین‌ها مفید باشند تا ظرفیت جذب آب آن‌ها به سطح ابرجاذب‌ها برسد. در شکل ۲، منابع مختلف ابرجاذب‌های برپایه پروتئین و خواص و کاربردهای آن‌ها نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۲- منابع مختلف ابرجاذب‌های برپایه پروتئین و کاربرد آن‌ها [۱].

ابر جاذب‌های زیست‌پایه کراتین

کراتین‌ها، پروتئین‌های رشته‌ای هستند که در بسیاری از اندامگان پیش‌هسته‌ای که معمولاً در پوست، ناخن و موی انسان، پرندگان، شاخ، سم و چنگال حیوانات مختلف یافت می‌شوند. این پروتئین‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پروتئین‌های محافظتی تجاری شناخته می‌شوند که در زمینه‌های مختلف از جمله زیست‌پزشکی، آرایشی و بهداشتی، داروسازی و صنایع کاربرد دارند. این موضوع، عمدتاً به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری، دوام مکانیکی و فراوانی طبیعی آن‌هاست. به‌طور کلی، کراتین‌ها به خانواده پروتئین‌های رشته‌ای ساختاری تعلق دارند و به α -کراتین و β -کراتین دسته‌بندی می‌شوند. هر دو نوع کراتین‌ها، تفاوت‌های عمده‌ای در ویژگی‌های فیزیکی و مولکولی و همچنین در دسترس بودن دارند. α -کراتین‌ها اغلب سخت و نامحلول و دارای پیکربندی مارپیچی هستند و واحد اصلی آن‌ها پروتئین لیفچه‌ای (protofibril) است. در حالی که β -کراتین نرم و انعطاف‌پذیر و دارای پیکربندی زنجیر گسترده بوده و واحد اصلی آن‌ها یک ورقه β پلیسه ناموازی است. کراتین از آب‌کافت قلیایی تولید می‌شود. مزیت اصلی آن پایداری بیشتر و تجزیه‌پذیری به‌وسیله آنزیم‌ها نسبت به سایر پلی‌پپتیدهاست [۲۴]. برای مثال، Wattie و همکاران گزارش کردند، ابرجاذب‌های زیست‌پایه کراتین مشتق از پَر، طی ۴۸ h ظرفیت تورم در آب ۳۴/۴۸٪ را نشان دادند، در حالی که این مقدار در محلول نمکی کاهش یافت. در مطالعه دیگری Demir و همکاران نشان داد که نسبت تورم ابرجاذب‌های توسعه‌یافته بین ۱۳۷/۲٪ تا ۱۴۳۰/۷٪ متغیر است و افزایش جزئی در درجه اتصال عرضی به کاهش درخور توجهی در ظرفیت تورم منجر شد. کراتین می‌تواند به‌عنوان عامل تقویت‌کننده و اتصال‌دهنده برای محصولات زیست‌پایه استفاده شود، زیرا دارای خاصیت گرمایی درخور توجهی (دمای تجزیه بیش از ۳۰۰ °C) و استحکام کششی بیشتری است. کامپوزیت‌های زیست‌پایه کراتین همراه با سایر زیست‌مولکول‌ها می‌توانند در زمینه‌های مختلف مانند دارورسانی، کاربردهای پزشکی و کشاورزی استفاده شوند [۲۵، ۲۴، ۵].

ابر جاذب‌های زیست‌پایه ژلاتین

ژلاتین یک پروتئین مشتق‌شده از کلاژن است که از طریق آب‌کافت کنترل‌شده یا جزئی به‌دست می‌آید. این ماده به‌صورت شفاف، بی‌رنگ یا پودری دارای رنگ مایل به زرد با ماهیت شفاف، شکننده و خاصیت برگشت‌پذیری گرمایی دارد. ژلاتین در اشکال مختلف از جمله ورقه، پولک یا پودر موجود است و عمدتاً از باقی‌مانده‌های

گلیسین، پرولین و ۴-هیدروکسی پرولین تولید می‌شود. ژلاتین به دو نوع A و B تقسیم می‌شود که این دسته‌بندی براساس نوع بافت استخراج‌شده از آن انجام می‌گیرد. ژلاتین نوع A از بافت پخت‌شده با اسید بوده و نقطه ایزوالکتریک آن در حدود pH=۹ (بار منفی) است. در حالی که ژلاتین نوع B از بافت پخت‌شده با آهک بوده و نقطه ایزوالکتریک آن حدود pH=۵ (بار مثبت) است. به‌طور کلی مشخص شده، ژلاتین حاوی ۱۸ اسید آمینه است که به‌طور جزئی به هم متصل شده‌اند. گلیسین ماده اصلی تشکیل‌دهنده اسیدهای آمینه در مولکول ژلاتین محسوب می‌شود [۲۱]. ژلاتین معمولاً از طریق جوشاندن پوست، تاندون‌ها، لیگامان‌ها و/یا استخوان‌های گاو یا خوک استخراج می‌شود. فرایند تولید آن شامل مراحل مختلف از جمله چربی‌زدایی و تکریس استخوان‌ها، عمل‌آوری قلیایی یا اسیدی برای آزادسازی کلاژن و در نهایت جوشاندن برای استخراج ژلاتین به‌صورت محلول است. هیدروژل‌های زیست‌پایه ژلاتین، نقش مهمی در توسعه ساختارهای سه‌بعدی زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار (با بیش از ۹۰٪ زنده‌مانی سلولی) دارند. این ساختارها از ویژگی‌های برجسته‌ای همچون چسبندگی عالی به سلول‌ها، قابلیت بازسازی و تکثیر سلولی برخوردار بوده و گزینه مناسبی برای کاربردهای مهندسی بافت محسوب می‌شوند [۲۶، ۲۷].

ویژگی‌های ابرجاذب‌های زیست‌تخریب‌پذیر

رفتار تورم

بیشتر محصولات مراقبت شخصی از مواد ابرجاذب، عمدتاً از پلی‌آکریلات سدیم ساخته شده‌اند. زیرا پوشک‌ها، قابلیت جذب آب زیادی دارند و می‌توانند ۲۰۰ برابر تا ۳۰۰ برابر وزن خود آب جذب کنند. برخلاف پلیمرهای طبیعی که توسط ریزاندامگان برای حصول مولکول‌های کوچک‌تر شکسته می‌شوند، پیوند ساده C-C از پلیمرهای موجود در پوشک نمی‌تواند به‌راحتی توسط بیشتر ریزاندامگان تجزیه شود. ابرجاذب طبیعی زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند در مقایسه با وزن اصلی خود، مقدار بیشتری مایع را جذب کند که مبنای رفتار تورم آن است. ظرفیت تورم ابرجاذب‌ها کاملاً به انواع مواد تشکیل‌دهنده، غلظت اتصال‌دهنده، pH، آغازگر، دمای واکنش و چگالی اتصال عرضی بستگی دارد. جدای از این، سایر پارامترها مانند تخلخل، اندازه ذرات، شرایط خشک شدن و ساختار پلیمر بر سینتیک تورم اثرگذارند. اندازه ذرات ابرجاذب‌ها، نقش مهمی در رفتار تورم براساس کاربرد مدنظر دارد. برای مثال در کاربردهای بهداشتی، ابرجاذب‌های با اندازه ذرات کوچک‌تر لازم است، در حالی که اندازه ذرات بزرگ‌تر برای کاربردهای کشاورزی مفید است

جدول ۲- ابرجاذب‌های مختلف زیست‌تخریب‌پذیر و خواص به‌دست‌آمده برای آن‌ها در پژوهش‌های مختلف.

مرجع	خواص حاصل	هدف	ابرجاذب
۲۸	تورم g/g ۴۳۸-۹۴، خمیر سیمان انبساط مثبت نشان داد.	استفاده به‌عنوان افزودنی برای افزایش احتباس آب سیمان	کاراگینان
۲۹	حداکثر جذب آب g/g ۴۳۸	ایجاد کامپوزیت ابرجاذب جدید با کوپلیم‌شدن پیوندی	کیتوسان-کائولن
۳۰	به‌دست آمدن استحکام مکانیکی مطلوب، به‌طوری‌که کاهش استحکام در مقایسه با ماده خالص کمتر از ۱۵٪ بوده است.	دستیابی به خودترمیمی و خودآب‌بندی ترک‌ها در بتن و استفاده برای پخت داخلی	آلژینات
۳۱	ظرفیت جذب آب mL/g 1.4 ± 0.2 ، مقادیر رو به کاهش تنش نشانگر مواد کمتر شکننده است.	تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای جذب آب و خواص کششی پروتئین سویای آسیل‌دارشده	پروتئین سویا
۳۲	حداکثر ظرفیت تورم در محیط نمک $pH=9$ ۱۵۰۲/۸٪	تشکیل هیدروژل مفید از ضایعات صنعت چرم	کراتین
۳۳	کاهش خواص مکانیکی هیدروژل با افزایش ظرفیت جذب آب	هیدروژل جدید برپایه زیست‌پلیمر برای دارورسانی	سلولوز-آکریل‌آمید
۳۴	میزان بارگذاری دارو $\pm 3.21\%$ ، 74.56% ، افزایش ظرفیت تورم در اندازه ذرات کمتر، حداکثر ظرفیت تورم g/g ۳۳۵	پلیمرشدن پیوندی ذرات ژلاتین و کائولن برای تولید کامپوزیت ابرجاذب جدید	ژلاتین
۳۵	ذرات پوشش‌یافته نشاسته نسبت به گرانول‌های اوره بی‌پوشش (۹۵٪)، کاهش ۴۰٪ در رهاسازی مواد مغذی	تولید نوعی کود نیتروژن جدید آهسته‌رهش با کپسول‌دار کردن برپایه نشاسته	نشاسته
۳۶	حداکثر جذب g/g ۱۹۷ در شرایط زمان آب‌کافت min ۶۰ و دمای آب‌کافت $^{\circ}C$ ۹۵	تهیه ابرجاذب از طریق آب‌کافت قلیایی و بررسی اثر متغیر pH در کاربردهای دارورسانی	آلژینات پیوندیافته با پلی‌متیل‌آکریل‌آمید
۳۷	افزودن هیدروژل به افزایش ظرفیت نگهداری آب تا ۶۰٪ در مقایسه با خاک تمیز کمک کرد. همچنین خاصیت آزادسازی آب بهتری به گیاهان نشان داد و به بقای گیاهان در شرایط خشکسالی کمک کرد.	توسعه هیدروژل جدید برای کاربردهای تهویه خاک، تقویت رشد و بهبود مقاومت گیاه در برابر تغییرات آب‌وهوایی	زانتان
۳۸	بیشترین جذب برابر g/g ۳۸۰/۹ در محیط آب مقطر، جذب g/g ۱۰۱/۱ در محیط خون سنتزی	استخراج نشاسته از سورگوم با استفاده از بیشترین جذب مونومر آکرلیک با پلیمرشدن پیوندی بهینه‌شده برای پوشک بچه و نوار بهداشتی	ذرت خوشه‌ای
۳۹	کارایی نور مؤثر برای کروم $\pm 0.498\%$ و 97.7% و کروم (VI) $\pm 0.541\%$ و 99.7%	ساخت نورکاتالیزگر جدید برای کمک به تجزیه نوری رنگ CR در فاضلاب	نشاسته-آکرلیک اسید

باعث بهبود خاصیت مکانیکی هیدروژل می‌شود. همچنین، بسیاری از مطالعات پژوهشی دربارهٔ مناسب ساختن خواص مکانیکی ابرجاذب‌ها در کاربردهای هدفمند متمرکزند [۴۱].

خواص گرمایی

خواص گرمایی پلیمرهای ابرجاذب با آزمون گرم‌وزن‌سنجی (TGA) تجزیه و تحلیل می‌شوند. پایداری گرمایی و دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) ماده ارزیابی می‌شود. Peng و همکاران، رفتار گرمایی دانه چیا، آرد چیا و هیدروژل میموزا پودیکا (*mimosa pudica*) یا گل قهروآشتی را مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند، پیوند عرضی هیدروژل میموزا پودیکا مسئول پایداری گرمایی بیشتر آن در میان تمام مواد است که برای کاربردهای بهداشتی زنان مفید است [۴۱].

[۲۸، ۲۹]. در جدول ۲، تعدادی از ابرجاذب‌های زیست‌تخریب‌پذیر و خواص حاصل برای آن‌ها در پژوهش‌های مختلف درج شده است.

خواص مکانیکی

ابرجاذب‌های طبیعی دارای خواص مکانیکی نسبتاً ضعیف‌تری در مقایسه با مواد سنتزی هستند. بنابراین، برخی از اصلاحات برای بهبود مقاومت آن‌ها انجام می‌شود. یکی از روش‌ها، وارد کردن گروه عاملی در ساختار پلیمری است که می‌تواند یک شبکه اتصالات عرضی جدید با افزایش خواص مکانیکی ایجاد کند [۴۰]. کبیری و همکاران، تغییرات ساختاری هیدروژل برپایه ۲-آکریل‌آمید و ۲-متیل‌پروپان سولفونیک اسید را تشریح کردند. آن‌ها دریافتند، تغییرات ساختاری با کمک پلیمرشدن به‌سرعت

جدول ۳- رفتار زیست تخریب پذیری برخی از ابرجاذب ها [۴۵، ۴۶].

نام پلیمر	روش تخریب	دمای زیست تخریب (°C)	زمان	میزان تخریب نمونه (%wt)
کراتین (خالص)	گرمایی	۳۳۰	۱ h	۱۰۰
کراتین (ناخالص)	گرمایی	۳۳۰	۱ h	۳۶/۴
کراتین (هیدروژل کامپوزیت)	دفن در خاک	-	۱۲ روز	۵۰
لیگنین (هیدروژل مرکب)	گرمایی	۵۸۰	۱ h	۶۰
لیگنین (هیدروژل)	دفن در خاک	-	۱۲۰ روز	۲۰
کیتین	دفن در خاک	-	۳۰ روز	۵۲
مشتق کیتین	دفن در خاک	-	۷۰-۱۰ روز	۵۰-۸۰
کیتین	گرمایی	۲۶۳	۱ h	۳۵
گلوتن	گرمایی	۲۰۰-۳۰۰	۱ h	۵۰-۹۰
سلولوز (هیدروژل)	گرمایی	۲۸۵	-	۵۵
مشتقات سلولوز	دفن در خاک	-	۲۰ روز	۸۵-۹۵
ژلاتین (هیدروژل)	دفن در خاک	-	۱۶۰ روز	۶۰
ژلاتین (فیلم)	گرمایی	۲۰۰-۳۰۰	۱ h	۶۰-۸۰

خواص زیستی

پلیمر ابرجاذب طبیعی دارای خواص زیستی عالی مانند خواص ضدباکتری، ضدسلول های سمی و زیست سازگار است. با توجه به این خواص عالی، تقاضای مداوم برای ابرجاذب های زیست تخریب پذیر در مقایسه با مواد سنتزی به سرعت افزایش می یابد. ماهیت طبیعی بر رفتار مواد اثر می گذارد و هیچگونه عوارض جانبی برای سلامت انسان و محیط زیست به بار نمی آید. همچنین محصولات توسعه یافته دارای هزینه کم، فراورش پذیری متوسط و دسترس پذیری آسان هستند که بسیاری از مطالعات پژوهشی بر ابرجاذب زیست تخریب پذیر متمرکز شده اند و آن ها را به انتخاب مفیدی برای برنامه های هدفمند تبدیل کرده است. شبلی و همکاران، نوعی پد قاعدگی مقرون به صرفه با استفاده از ابرجاذب های پلیمر پایه و عوامل ضد میکروب مانند آلونوره و اسانس ریحان مقدس (tulsi) تولید کردند که خاصیت ضدباکتری بهتری را در برابر میکروب های استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) و اشرشیا کلی (گرم منفی) نشان داد، بدون اینکه خاصیت جذب آن در کاربرد مدنظر کاهش یابد [۴۱، ۴۴].

زیست تخریب پذیری ابرجاذب ها

امروزه، زیست تخریب پذیری یک ماده موضوع اساسی برای مدیریت پسماند در محیط زیست است. ابرجاذب سنتزی، ساختار

Lacoste و همکاران در گزارش دیگری نشان دادند، ابرجاذب های زیست تخریب پذیر ساخته شده از سلولوز بازیافتی، پایداری گرمایی بیشتری دارند. آن ها دریافتند، وجود لیگنین (نوعی پلیمر طبیعی موجود در دیواره سلولی گیاهان) بر پارامترهای گرمایی این مواد اثر مثبت دارد. لیگنین باعث افزایش تشکیل زغال می شود و پس از تجزیه گرمایی مواد آلی باقی می ماند. این زغال به عنوان یک لایه محافظ عمل کرده و از تخریب بیشتر ماده در دمای زیاد جلوگیری می کند. در مجموع، پایداری و خاصیت گرمایی ماده آن را به انتخاب بهینه برای کاربرد مدنظر تبدیل می کند که برای تجزیه و تحلیل پلیمر ابرجاذب استفاده می شود [۴۲]. از سوی دیگر، Zhang و همکاران نوعی ابرجاذب از خاک اره (محصول جانبی کم هزینه صنعت جنگل داری) ساختند و آن را با استفاده از آکریل آمید و آکرلیک اسید اصلاح کردند. آن ها در مطالعات خود مشاهده کردند، این ماده دارای رفتار تخریب و تجزیه سه مرحله ای در دمای زیاد است که در منحنی گرمایی مشخص می شود. این رفتار نشانگر پایداری گرمایی زیاد ماده است. در مجموع، پایداری گرمایی و ویژگی های مطلوب این مواد، آن ها را به گزینه ای ایده آل برای کاربردهای مدنظر تبدیل می کند. استفاده از مواد طبیعی و بازیافتی مانند سلولوز و خاک اره نه تنها هزینه ها را کاهش می دهد، بلکه به توسعه مواد پایدار و سازگار با محیط زیست نیز کمک می کند [۴۳، ۴۲].

پلیمری پیچیده‌ای دارد. ریزاندامگان موجود در خاک نمی‌توانند زنجیرهای آن را تجزیه کنند، به‌طوری‌که تخریب کامل آن حدود ۵۰۰ سال تا ۷۰۰ سال طول می‌کشد. بنابراین، امروزه ابرجاذب‌های زیست‌تخریب‌پذیر به‌دلیل جنبه‌های تجزیه بسیار محبوب هستند و مطالعات پژوهشی مختلفی در این زمینه انجام می‌شود [۴۵، ۴۶]. در جدول ۳، رفتار زیست‌تخریب‌پذیری برخی از ابرجاذب‌ها نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

افزایش تقاضای جهانی برای مواد جاذب بهبودیافته در کاربردهای محصولات مراقبت شخصی، انگیزه‌ای برای پژوهش‌های اساسی جدید و توسعه مواد و سامانه‌های جاذب کارآمد با مزایای بیشتر مانند ظرفیت جذب زیاد، زیست‌تخریب‌پذیری و زیست‌سازگاری ایجاد کرده است. بنابراین، نسل جدیدی از محصولات مراقبت

شخصی برپایه SAPهای طبیعی مانند انواع مختلف پلی‌ساکارید و هیدروژل‌های برپایه پروتئین معرفی شده‌اند. این مواد در مقایسه با ابرجاذب پلی‌آکریلات معمولی مزایایی دارند و هیچگونه آثار منفی بر سلامت و محیط‌زیست ندارند. زیرا در مراقبت شخصی مانند پوشک بچه، بهداشت زنانه و محصولات بی‌اختیاری بزرگسالان، مراقبت از پوست اهمیت ویژه‌ای دارد. استفاده از مواد بدون علائم حساسیت پوستی مانند جوش و التهاب ترجیح داده می‌شود. هیدروژل‌های برپایه سلولوز مواد زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیری هستند که آینده امیدوارکننده‌ای را برای تعدادی از کاربردهای صنعتی نشان می‌دهند، مانند محصولات بهداشتی، به‌ویژه در مواردی که به مسائل زیست‌محیطی مربوط می‌شود. چند مشتق سلولوز محلول در آب را می‌توان به‌طور مجزا یا ترکیبی برای تشکیل شبکه‌های هیدروژل با ویژگی‌های خاص از نظر تورم‌پذیری و حساسیت به محرک‌های خارجی استفاده کرد که می‌تواند در محصولات مختلف مراقبت‌های بهداشتی کاربرد یابد.

مراجع

1. Dhiman J., Anupam K., Kumar V., and Saruchi S.A., Bio-based Superabsorbent Polymers: An Overview, In *Bio-based Superabsorbents*, 1-27, 2023.
2. Bashari A., Rouhani Shirvan A., and Shakeri M., Cellulose-Based Hydrogels for Personal Care Products, *Polym. Adv. Technol.*, **29**, 2853-2867, 2018.
3. Chandel N., Jain K., Jain A., Raj T., Patel A.K., Yang Y.H., and Bhatia S.K., The Versatile World of Cellulose-Based Materials in Healthcare: From Production to Applications, *Ind. Crop. Prod.*, **201**, 116929, 2023.
4. Omidian H., Akhzharmehr A., and Chowdhury S.D., Advancements in Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels: Sustainable Solutions Across Industries, *Gels*, **10**, 174, 2024.
5. Pattanayak R., Jena T., Pradhan S., and Mohanty S., Recent Advancement of Bio-Based Super Absorbent Polymer and Its Biodegradable and Recycling Behavior: A Vision and Future, *Polym. Plast. Technol. Mater.*, **62**, 1290-1317, 2023.
6. De Dicastillo C.L., Rodríguez F., Guarda A., and Galotto M.J., Antioxidant Films Based on Cross-linked Methyl Cellulose and Native Chilean Berry for Food Packaging Applications, *Carbohydr. Polym.*, **136**, 1052-1060, 2016.
7. Capanema N.S., Mansur A.A., de Jesus A.C., Carvalho S.M., de Oliveira L.C., and Mansur H.S., Superabsorbent Crosslinked Carboxymethyl Cellulose-PEG Hydrogels for Potential Wound Dressing Applications, *Int. J. Biology. Macromol.*, **106**, 1218-1234, 2018.
8. Ferland G.J., Chatzikos M., Guzmán F., Lykins M.L., Van Hoof P.A.M., Williams R.J.R., Abel N.P. et al., The 2017 Release of Cloudy, *arXiv:1705.10877v3 [astro-ph.GA]*, 2023. doi: 10.48550/arXiv.1705.10877
9. Kozłowska K., Chudleigh C., Cruz C., Lim M., McClure G., Savage B. et al., Psychogenic Non-epileptic Seizures in Children and Adolescents: Part I. Diagnostic Formulations, *Clin. Child Psychol. Psychiatry*, **23**, 140-159, 2018.
10. Dairi N., Ferfera-Harrar H., Ramos M., and Garrigós M.C., Cellulose Acetate/AgNPs-Organoclay and/or Thymol Nano-Biocomposite Films with Combined Antimicrobial/Antioxidant Properties for Active Food Packaging Use, *Int. J. Biol. Macromol.*, **121**, 508-523, 2019.
11. Soylak M., Aydin F.A., Saracoglu S., Elci L., and Dogan M., Chemical Analysis of Drinking Water Samples from Yozgat, Turkey, *Pol. J. Environ. Stud.*, **11**, 151-156, 2002.
12. Rangasamy M. and Palaninathan K., A Pyrazoline-Based Fluorescent Chemosensor for Al³⁺ Ion Detection and Live Cell Imaging, *New J. Chem.*, **42**, 10891-10897, 2018.
13. Guan H., Li J., Zhang B., and Yu X., Synthesis, Properties, and Humidity Resistance Enhancement of Biodegradable Cellulose-Containing Superabsorbent Polymer, *J. Polym.*,

- 2017, 2017.
14. Qureshi M.A., Nishat N., Jadoun S., and Ansari M.Z., Polysaccharide Based Superabsorbent Hydrogels and their Methods of Synthesis: A Review, *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, **1**, 100014, 2020.
 15. Guan X., Zhang J., and Zhao S., Design, Synthesis and Characterization of a Starch-Based Superabsorbent Polymer and Its Impact on Autogenous Shrinkage of Cement Paste, *Constr. Build. Mater.*, **415**, 134986, 2024.
 16. Jyotish J., Nayak R., Tripathy D., Moharana S., and Mahaling R.N., Starch-Based Superabsorbent Polymer, In *Bio-based Superabsorbents: Recent Trends, Types, Applications and Recycling*, Springer, Singapore, 115-143, 2023.
 17. Llanes L., Dubessay P., Pierre G., Delattre C., and Michaud P., Biosourced Polysaccharide-Based Superabsorbents, *Polysaccharides*, **1**, 51-79, 2020.
 18. Pethsangave D.A., Wadekar P.H., Khose R.V., and Some S., Super-Hydrophobic Carrageenan Cross-Linked Graphene Sponge for Recovery of Oil and Organic Solvent from their Water Mixtures, *Polym. Test.*, **90**, 106743, 2020.
 19. Thirumoolan D., Siva T., Ananthakumar R., and Nambi K.N., Alginate-Based Superabsorbents, in *Bio-Based Superabsorbents: Recent Trends, Types, Applications and Recycling*, Springer, Singapore, 93-114, 2023.
 20. Yang J., Wang J., Su Y., He X., Wang F., and Liang W., On the Factors Affecting the Swelling Behavior of Superabsorbent Polymers in Cement-Related Environment, *Constr. Build. Mater.*, **409**, 133938, 2023.
 21. Liu Y., Zhu Y., Mu B., Wang Y., Quan Z., and Wang A., Synthesis, Characterization, and Swelling Behaviors of Sodium Carboxymethyl Cellulose-g-Poly(acrylic acid)/Semi-Coke Superabsorbent, *Polym. Bull.*, 1-19, 2021.
 22. Capezza A.J., Newson W.R., Muneer F., Johansson E., Cui Y., Hedenqvist M.S. et al., Greenhouse Gas Emissions of Biobased Diapers Containing Chemically Modified Protein Superabsorbents, *J. Clean. Prod.*, **387**, 135830, 2023.
 23. Capezza A.J., Muneer F., Prade T., Newson W.R., Das O., Lundman M. et al., Acylation of Agricultural Protein Biomass Yields Biodegradable Superabsorbent Plastics, *Commun. Chem.*, **4**, 52, 2021.
 24. Pattanayak R. and Jena T., Bio-based Superabsorbent Polymer: Current Trends, Applications and Future Scope, In *Bio-based Superabsorbents: Recent Trends, Types, Applications and Recycling*, Springer, Singapore, 185-197, 2023.
 25. Rather R.A., Bhat M.A., and Shalla A.H., An Insight into Synthetic and Physiological Aspects of Superabsorbent Hydrogels based on Carbohydrate Type Polymers for Various Applications: A Review, *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, **3**, 100202, 2022.
 26. Peng J., Wang X., and Lou T., Preparation of Chitosan/Gelatin Composite foam with Ternary Solvents of Dioxane/Acetic Acid/Water and Its Water Absorption Capacity, *Polym. Bull.*, **77**, 5227-5244, 2020.
 27. Kenawy E.R., Seggiani M., Hosny A., Rashad M., Cinelli P., Saad-Allah K.M. et al., Superabsorbent Composites Based on Rice husk for Agricultural Applications: Swelling Behavior, Biodegradability in Soil and Drought Alleviation, *J. Saud. Chem. Soc.*, **25**, 101254, 2021.
 28. Aday A.N., Osio-Norgaard J., Foster K.E., and Srubar W.V., Carrageenan-Based Superabsorbent Biopolymers Mitigate Autogenous Shrinkage in Ordinary Portland Cement, *Mater. Struct.*, **51**, 1-13, 2018.
 29. Pourjavadi A. and Mahdavinia G.R., Chitosan-g-Poly(acrylic acid)/Kaolin Superabsorbent Composite: Synthesis and Characterization, *Polym. Polym. Compos.*, **14**, 203-212, 2006.
 30. Mignon A., Snoeck D., D'Halluin K., Balcaen L., Vanhaecke F., Dubruel P. et al., Alginate Biopolymers: Counteracting the Impact of Superabsorbent Polymers on Mortar Strength, *Constr. Build. Mater.*, **110**, 169-174, 2016.
 31. Cuadri A.A., Romero A., Bengoechea C., and Guerrero A., The Effect of Carboxyl Group Content on Water Uptake Capacity and Tensile Properties of Functionalized Soy Protein-Based Superabsorbent Plastics, *J. Polym. Environ.*, **26**, 2934-2944, 2018.
 32. Arican F., Uzuner-Demir A., Sancakli A., and Ismar E., Synthesis and Characterization of Superabsorbent Hydrogels from Waste Bovine Hair via Keratin Hydrolysate Graft with Acrylic Acid (AA) and Acrylamide (AAm), *Chem. Pap.*, **75**, 6601-6610, 2021.
 33. Pandey M., Mohd Amin M.C.I., Ahmad N., and Abeer M.M., Rapid Synthesis of Superabsorbent Smart-Swelling Bacterial Cellulose/Acrylamide-Based Hydrogels for Drug Delivery, *Int. J. Polym. Sci.*, **2013**(1), 905471, 2013.
 34. Pourjavadi A., Hosseinzadeh H., and Sadeghi M.H.H.J., Synthesis, Characterization and Swelling Behavior of Gelatin-g-Poly(sodium acrylate)/Kaolin Superabsorbent Hydrogel Composites, *J. Compos. Mater.*, **41**, 2057-2069, 2007.
 35. Qiao D., Liu H., Yu L., Bao X., Simon G.P., Petinakis E., and Chen L., Preparation and Characterization of Slow-Release Fertilizer Encapsulated by Starch-Based Superabsorbent Polymer, *Carbohydr. Polym.*, **147**, 146-154, 2016.
 36. Pourjavadi A., Amini-Fazl M.S., and Hosseinzadeh H., Partially Hydrolyzed Crosslinked Alginate-Graft-Polymethacrylamide as a Novel Biopolymer-Based Superabsorbent Hydrogel Having pH-Responsive Properties, *Macromol. Res.*, **13**, 45-53, 2005.
 37. Sorze A., Valentini F., Dorigato A., and Pegoretti A., Development of a Xanthan Gum Based Superabsorbent

- and Water Retaining Composites for Agricultural and Forestry Applications, *Molecules*, **28**, 1952, 2023.
38. Teli M.D. and Mallick A., Utilization of Waste Sorghum Grain for Producing Superabsorbent for Personal Care Products, *J. Polym. Environ.*, **26**, 1393-1404, 2018.
39. Friedrich S., Superabsorbent Polymers (SAP), in *Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP*, Springer, Netherlands, 13-19, 2011.
40. Kalinowski M., Woyciechowski P., and Sokołowska J., Effect of Mechanically-Induced Fragmentation of Polyacrylic Superabsorbent Polymer (SAP) Hydrogel on the Properties of Cement Composites, *Constr. Build. Mater.*, **263**, 120135, 2020.
41. Venkatachalam D. and Kaliappa S., Superabsorbent Polymers: A State-of-Art Review on their Classification, Synthesis, Physicochemical Properties, and Applications, *Rev. Chem. Eng.*, **39**, 127-171, 2023.
42. Lim H.L., Mazlan S.N.A., Ghazali S., Abd Rahim S., and Jamari S.S., Investigation on the Water Absorbency, Chemical and Thermal Properties of Superabsorbent Poly(acrylic acid-co-acrylamide)/Spent Coffee Ground Composite, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP, pp. 052021, 2020.
43. Zhang M., Zhang S., Chen Z., Wang M., Cao J., and Wang R., Preparation and Characterization of Superabsorbent Polymers Based on Sawdust, *Polymers*, **11**, 1891, 2019.
44. Zhao C., Zhang L., Zhang Q., Wang J., Wang S., Zhang M., and Liu Z., The Effects of Bio-Based Superabsorbent Polymers on the Water/Nutrient Retention Characteristics and Agricultural Productivity of a Saline Soil from the Yellow River Basin, *China. Agric. Water Manag.*, **261**, 107388, 2022.
45. Kim J.S., Kim D.H., and Lee Y.S., The Influence of Monomer Composition and Surface-Crosslinking Condition on Biodegradation and Gel Strength of Super Absorbent Polymer, *Polymers*, **13**, 663, 2021.
46. Hossain L., Ledesma R.M.B., Tanner J., and Garnier G., Effect of Crosslinking on Nanocellulose Superabsorbent Biodegradability, *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, **3**, 100199, 2022.