REVIEW ARTICLE

Recent Advances in Bacterial Cellulose Production, Modification, and Biomedical Applications: A Review

Zahra Gholamian-Moghri[1]
Ali Pakdin Parizi[2]
Hamidreza Mohammadi[3]
Amirali Khodashenas[4]
Mehdi Mogharabi-Manzari[5]

[1]Pharmacy Student, Student Research Commitee, Faculty of Pharmacy, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[2]Assistant Professor, Tabarestan Agricultural Genetics and Biotechnology Research Institute, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
[3]Professor, Department of Toxicology and Pharmacology, Pharmaceutical Sciences Research Center, Hemoglobinopathy Institute, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[4]Assossiate Professor, Department of Medical Biotechnology, Faculty of Advanced Technologies in Medicine, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[5]Assistant Professor, Pharmaceutical Sciences Research Center, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received May 17, 2026; Accepted October 26, 2026)

Abstract

Bacterial cellulose is an important natural biopolymer produced mainly by aerobic bacteria of the genus Komagataeibacter. Owing to its high purity and lack of lignin and hemicellulose, bacterial cellulose possesses a more uniform and highly organized structure and distinct functional properties compared with plant-derived cellulose. It consists of a three-dimensional network of cellulose nanofibres with a high degree of crystallinity, contributing to its distinctive mechanical, physicochemical and biological properties. The hierarchical structure of bacterial cellulose, ranging from the molecular to the nanoscale, is a key determinant of its surface characteristics, water-holding capacity, porosity, mechanical strength and ability to interact with cells. Its biosynthesis is governed by metabolic pathways, the activity of the cellulose synthase enzyme complex, cultivation conditions, medium composition, and the type and concentration of the carbon source. Despite its desirable properties, the large-scale production of bacterial cellulose still faces several limitations, including high raw material costs, reliance on refined carbon sources, relatively low yields, long production cycles and challenges in scaling up production. The use of agricultural residues as alternative substrates can reduce production costs while promoting waste valorisation, improving resource efficiency and supporting the development of a circular economy. In addition, physical, chemical and biological modification approaches enable the regulation of bacterial cellulose's structural and surface properties, thereby enhancing its adsorption capacity, biological activity and potential for the loading and controlled release of active compounds. Owing to its biocompatibility, biodegradability, porosity, water-holding capacity and versatility for surface modification, bacterial cellulose has attracted considerable attention as a biomaterial for various biomedical applications, including wound dressings, tissue engineering, drug delivery and biosensors. This review examines the relationships between the structure and properties of bacterial cellulose, its biosynthetic mechanisms and production using renewable carbon sources. It also discusses strategies for improving production and modifying its structure, biomedical applications, current challenges, recent advances and future perspectives for the development and use of this versatile biomaterial.

Keywords: bacterial cellulose, Komagataeibacter, biopolymer, biocompatibility, tissue engineering, wound dressing, drug delivery

J Mazandaran Univ Med Sci 2026; 36 (263): 285-300 (Persian).

Corresponding Author: Mehdi Mogharabi-Manzari - Research Center, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran (E-mail: m.mogharabi@mazums.ac.ir)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره سی و ششم شماره ۲۶۳ آبان سال ۱۴۰۵ (۳۰۰-۲۸۵)

مروری بر پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید سلولز باکتریایی و کاربرد های آن در زیست پزشکی

زهرا غلامیان مقری[۱]
علی پاکدین پاریزی[۲]
حمیدرضا محمدی[۳]
امیرعلی خداشناس[۴]
مهدی مقربی منظری[۵]

چکیده

سابقه و هدف: سلولز باکتریایی یک زیست‌پلیمر طبیعی پیشرفته است که عمدتاً توسط باکتری‌های هوازی جنس *Komagataeibacter* تولید می‌شود و به دلیل خلوص بالا و نبود لیگنین و همی‌سلولز، ساختاری منظم‌تر و ویژگی‌های عملکردی متفاوتی نسبت به سلولز گیاهی دارد. این ماده از شبکه‌ای سه بعدی از نانوالیاف سلولزی با درجه بلورینگی بالا تشکیل شده است که ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکوشیمیایی و زیستی مطلوبی ایجاد می‌کند. ساختار سلسله مراتبی سلولز باکتریایی از مقیاس مولکولی تا نانومتری، نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های سطحی، ظرفیت نگهداری آب، تخلخل، استحکام و قابلیت برهم‌کنش آن با سلول‌ها و ترکیبات زیست‌فعال دارد. تولید این زیست‌پلیمر به مسیرهای متابولیکی، فعالیت مجموعه آنزیمی سلولز سنتاز، شرایط کشت، ترکیب محیط و نوع و غلظت منبع کربن وابسته است. با وجود ویژگی‌های مطلوب، تولید صنعتی سلولز باکتریایی همچنان با محدودیت‌هایی از جمله هزینه بالای مواد اولیه، وابستگی به منابع کربنی خالص، بازده نسبتاً پایین، طولانی بودن فرایند تولید و دشواری افزایش مقیاس تولید مواجه است. استفاده از پسماندهای کشاورزی، صنایع غذایی و سایر منابع کربنی ارزان و تجدیدپذیر به‌عنوان بسترهای جایگزین، می‌تواند ضمن کاهش هزینه تولید، به کاهش ضایعات، استفاده کارآمدتر از منابع و توسعه اقتصاد چرخشی کمک کند. افزون بر این، اصلاح فیزیکی، شیمیایی و زیستی سلولز باکتریایی امکان تنظیم ویژگی‌های سطحی و ساختاری آن و بهبود ظرفیت جذب، فعالیت زیستی، بارگذاری و رهایش ترکیبات فعال را فراهم می‌کند. به دلیل زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری مناسب، تخلخل بالا، ظرفیت نگهداری آب و قابلیت اصلاح سطح، سلولز باکتریایی در حوزه‌های مختلف زیست‌پزشکی، از جمله پانسمان و ترمیم زخم، مهندسی بافت، سامانه‌های دارو رسانی، تولید بیوسنسورها و سامانه‌های آنتی‌باکتریال مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله مروری با تمرکز بر ارتباط میان ساختار و ویژگی‌های سلولز باکتریایی، سازوکارهای تولید، منابع کربنی تجدیدپذیر، راهکارهای بهبود تولید و اصلاح ساختار، کاربردهای زیست‌پزشکی و چالش‌های موجود، پیشرفت‌های اخیر و چشم‌اندازهای آینده این زیست‌ماده را بررسی می‌کند.

واژه های کلیدی: سلولز باکتریایی، *Komagataeibacter*، بیوپلیمر، زیست‌سازگاری، مهندسی بافت، پانسمان زخم، دارو رسانی

مولف مسئول: مهدی مقربی- مرکز تحقیقات علوم دارویی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران **E-mail:** m.mogharabi@mazums.ac.ir
۱. دانشجو، داروسازی عمومی، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۲. استادیار، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳. استاد، گروه سم شناسی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۴. دانشیار، گروه بیوتکنولوژی پزشکی، دانشکده فناوری نوین، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۵. استادیار، مرکز تحقیقات علوم دارویی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
تاریخ دریافت : ۱۴۰۵/۲/۲۷ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : ۱۴۰۵/۲/۳۰ تاریخ تصویب : ۱۴۰۵/۸/۴

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

مقدمه

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های فزاینده درباره آلودگی‌های زیست‌محیطی و کاهش منابع فسیلی، توجه به بیوپلیمرهای پایدار و تجدیدپذیر را افزایش داده است. در این میان، سلولز، فراوان‌ترین پلیمر طبیعی، نقشی کلیدی در علوم مواد و زیست‌فناوری ایفا می‌کند(۱). علاوه بر سلولز گیاهی، سلولز باکتریایی (BC) به دلیل ویژگی‌های ساختاری و عملکردی منحصربه‌فرد خود، به‌ویژه در علوم پزشکی، مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته است(۲). این نوع سلولز توسط باکتری‌های هوازی مانند گونه‌های *Komagataeibacter* تولید می‌شود و برخلاف سلولز گیاهی، فاقد لیگنین و همی‌سلولز است. این خلوص بالا، همراه با ساختار نانوالیافی منظم، خواص مکانیکی، فیزیکوشیمیایی و زیستی برتری به سلولز باکتریایی می‌بخشد(۳).

سلولز باکتریایی از شبکه‌ای سه بعدی از نانوالیاف سلولزی با سطح ویژه بالا، تخلخل قابل توجه و ظرفیت جذب آب زیاد تشکیل شده است. این ویژگی‌ها سلولز باکتریایی را به یک هیدروژل طبیعی با عملکرد بالا تبدیل می‌کنند که در محیط‌های زیستی پیچیده پایداری خوبی از خود نشان می‌دهد(۴). قابلیت تنظیم‌پذیری خواص سلولز باکتریایی از طریق تغییر شرایط کشت، اصلاح شیمیایی و ترکیب با سایر مواد، آن را به پلتفرمی انعطاف‌پذیر برای طراحی مواد پیشرفته تبدیل کرده است. این قابلیت‌ها دامنه کاربرد سلولز باکتریایی را در حوزه‌هایی مانند مهندسی بافت، پانسمان زخم، دارورسانی، بیوسنسورها و سامانه‌های آنتی‌باکتریال گسترش داده‌اند(۵). علاوه بر این، ساختار متخلخل و سطح فعال بالای سلولز باکتریایی آن را به زیست‌پایه‌ای مناسب برای تثبیت آنزیم‌ها تبدیل می‌کند. گروه‌های عاملی سطحی این ماده، امکان برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی با آنزیم‌ها را فراهم کرده و پایداری و فعالیت کاتالیتیکی آن‌ها را در شرایط مختلف بهبود می‌بخشد(۶، ۷). با وجود این مزایا، تولید صنعتی سلولز باکتریایی با چالش‌هایی نظیر هزینه بالا، بازده محدود در مقیاس‌های بزرگ و وابستگی به منابع کربنی خالص مواجه است. استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی به‌عنوان سوبسترای کربنی جایگزین، راهکاری پایدار و اقتصادی است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، با اصول پایداری زیست‌محیطی و اقتصاد چرخشی همخوانی دارد(۸). از سوی دیگر، درک عمیق از ساختار سلسله‌مراتبی سلولز باکتریایی و ارتباط آن با خواص عملکردی، نقش اساسی در توسعه کاربردهای پیشرفته آن دارد. رفتار این ماده از سطح مولکولی تا نانوساختار، تعیین‌کننده ویژگی‌هایی مانند استحکام مکانیکی، نفوذپذیری، زیست‌سازگاری و قابلیت اصلاح سطح است(۹).

با وجود انتشار مرورهای متعددی درباره سلولز باکتریایی، هنوز نیاز به یک بررسی یکپارچه وجود دارد که ارتباط میان زیست‌سنتز، فرآیند تولید، منابع کربنی، ویژگی‌های ساختاری و کاربردهای زیست‌پزشکی سلولز باکتریایی را مورد تحلیل قرار دهد. اکثر مطالعات موجود، عمدتاً بر ویژگی‌ها و کاربردهای زیست‌پزشکی سلولز باکتریایی تمرکز داشته است، در حالی که در سال‌های اخیر مطالعات قابل توجهی در زمینه استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی به عنوان منابع کربنی، بهینه‌سازی شرایط زیست‌فرآیند، کشت همزمان میکروبی، دستکاری مسیرهای متابولیکی و توسعه سامانه‌های بیوراکتوری برای افزایش تولید و مقیاس‌پذیری سلولز باکتریایی منتشر شده است. از این رو، مرور حاضر با هدف تکرار مطالعات پیشین انجام نشده است، بلکه تلاش می‌کند این پیشرفت‌ها را در یک چارچوب تولید–ساختار–عملکرد به یکدیگر مرتبط سازد. در این چارچوب، انتخاب میکروارگانیسم و منبع کربن، مسیرهای زیست‌سنتزی و شرایط کشت به عنوان عوامل مؤثر بر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی سلولز باکتریایی در نظر گرفته شد و پیامدهای این عوامل برای کاربردهای زیست‌پزشکی بررسی می‌شود. چنین رویکردی می‌تواند به شناسایی عوامل محدود

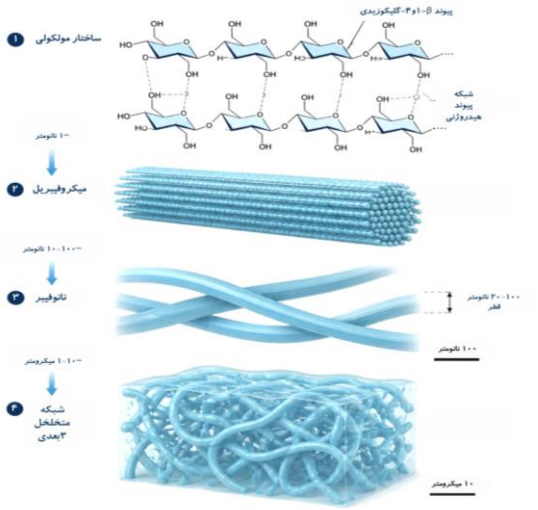
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

کننده گذار از تولید آزمایشگاهی به تولید پایدار و مقیاس‌پذیر سلولز باکتریایی کمک کند.

در این راستا، مقاله حاضر با هدف ارائه یک مرور جامع بر سلولز باکتریایی، ابتدا به بررسی ساختار مولکولی، بلوری و نانوالیافی این ماده پرداخته و سپس به تحلیل روش‌های تولید آن با تمرکز بر مسیرهای متابولیکی، شرایط کشت و منابع کربنی مختلف را، پرداخت. در ادامه، استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی به‌عنوان منابع پایدار تولید مورد بحث قرار گرفته و در نهایت، کاربردهای گسترده آن در علوم پزشکی شامل پانسمان زخم، مهندسی بافت، دارورسانی، بیوسنسورها، و سیستم‌های آنتی‌باکتریال به‌صورت تحلیلی بررسی می‌شود. همچنین، چالش‌های موجود و مسیرهای آینده تحقیقاتی در این حوزه مورد توجه قرار گرفته‌اند تا این مرور بتواند به‌عنوان راهنمایی برای پژوهش‌های آتی در زمینه طراحی مواد زیستی پیشرفته مورد استفاده قرار گیرد.

۱- ساختار و ویژگی‌های سلولز باکتریایی

سلولز باکتریایی یک بیوپلیمر طبیعی با ساختاری سلسله مراتبی است که از سطح مولکولی تا مقیاس نانویی و میکرونی سازمان‌دهی شده است (تصویر شماره ۱).



تصویر شماره ۱: ساختار شیمیایی سلولز و نحوه تولید میکروفیبریل، نانوفیبریل و شبکه متخلخل سه بعدی

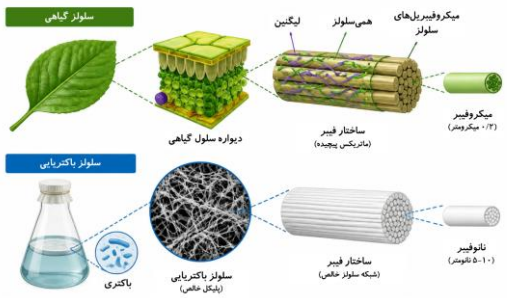
این سازمان‌دهی چند سطحی منشأ اصلی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی این ماده محسوب می‌شود و درک ارتباط میان ساختار و خواص عملکردی آن برای توسعه کاربردهای زیست‌پزشکی ضروری است(۱۰). در سطح مولکولی، سلولز باکتریایی از واحدهای تکراری β-D-گلوکوپیرانوز تشکیل شده است که از طریق پیوندهای β-۱ و ۴-گلیکوزیدی به یکدیگر متصل شده‌اند و زنجیره‌های خطی با درجه پلیمریزاسیون بالا ایجاد می‌کنند(۱۱). هر واحد گلوکز دارای سه گروه هیدروکسیل فعال در موقعیت‌های ۲ و ۳ و ۶ است که امکان ایجاد شبکه گسترده‌ای از پیوندهای هیدروژنی درون‌مولکولی و بین‌مولکولی را فراهم می‌کنند. پیوندهای درون‌مولکولی باعث تثبیت ساختار خطی زنجیره‌ها می‌شوند، در حالی که پیوندهای بین‌مولکولی موجب تجمع زنجیره‌ها و تشکیل ساختارهای بلوری می‌گردند. این برهم‌کنش‌ها، همراه با نیروهای واندروالس، موجب آرایش منظم زنجیره‌ها، تشکیل نواحی بلوری و در نهایت استحکام مکانیکی و پایداری شیمیایی بالا در سلولز باکتریایی می‌شوند. میزان نظم بلوری در این ماده معمولاً بیش‌تر از سلولز گیاهی است و همین ویژگی به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی آن منجر می‌شود(۱۲).

سلولز می‌تواند در چندین فرم بلوری مختلف وجود داشته باشد که به‌عنوان پلی‌مورف‌های سلولز شناخته می‌شوند. مهم‌ترین فرم بلوری در سلولز باکتریایی، سلولز نوع I است. این ساختار شامل دو زیرگونه Iα و Iβ بوده و در سلولز باکتریایی معمولا فرم Iα با ساختار بلوری متاستابل و آرایش زنجیره‌ای موازی غالب است. در این ساختار، زنجیره‌های پلیمری در کنار یکدیگر نواحی بلوری و آمورف را تشکیل می‌دهند. نواحی بلوری دارای نظم بالا و چگالی زیاد هستند، در حالی که نواحی آمورف ساختار نامنظم‌تری داشته و نقش مهمی در جذب آب و نفوذپذیری ایفا می‌کنند. درجه بلورینگی یکی از پارامترهای تعیین کننده خواص سلولز باکتریایی است.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

افـزایش بلـورینگی معمـولاً منجـر بـه افـزایش اسـتحکام مکـانیکی و کـاهش نفوذپـذیری می‌شـود، در حـالی کـه کاهش بلورینگی می‌تواند انعطاف‌پـذیری و قابلیـت جـذب آب را افزایش دهد. تعادل میان نـواحی بلـوری و آمـورف، نقـش مهمـی در تعیـین عملکـرد سـلولز باکتریـایی در کاربردهـای مختلـف دارد(۱۳). در مقیـاس نـانویی، سـلولز باکتریایی به‌صورت الیافی با قطر حـدود ۲۰ تـا ۱۰۰ نـانومتر سـازمان‌دهی می‌شـود کـه از تجمـع زنجیـره هـای مـوازی تشکیل شده‌اند. این نانوالیاف در ادامه به‌صورت یک شبکه سه بعـدی درهم‌تنیـده سـازمان می‌یابنـد کـه سـاختار نهـایی سلولز باکتریایی را شکل می‌دهد (تصویر شماره ۱)(۵). ایـن سازمان‌دهی چند سطحی موجب ایجاد سـطح ویـژه بـالا و تخلخل قابـل توجـه می‌شـود. بـرخلاف سـلولز گیـاهی کـه سـاختاری نـاهمگن دارد، سـلولز باکتریـایی دارای توزیـع یکنواخت الیاف و منافذ است که به بهبود خواص مکانیکی و زیستی کمک می‌کند. تخلخل این شبکه می‌تواند بیش از ۹۰ درصد حجم ماده را شامل شود. اندازه منافذ موجـود در این ساختار از نانومتر تا میکرومتر متغیـر اسـت. ایـن سـاختار چند مقیاسی منافذ، امکان نفـوذ مـؤثر مولکول‌هـا، یون‌هـا و حتی سلول‌ها را فراهم می‌کند. سطح ویـژه بـالای ایـن مـاده نیز باعث افزایش برهم‌کنش با مولکول‌های زیستی می‌شود. در سیستم‌های دارورسانی، ایـن ویژگـی امکـان بارگـذاری بیش‌تـر دارو را فـراهم می‌کنـد و در بیوسنسـورها، موجـب افزایش حساسیت سیستم می‌شود. همچنین ساختار متخلخل سـلولز باکتریـایی انتقـال مـؤثر اکسـیژن، مـواد غـذایی و متابولیت‌ها را تسهیل می‌کنـد کـه بـرای کاربردهـایی ماننـد پانسمان زخم و مهندسی بافت اهمیت دارد(۱۴).

از نظـر مکـانیکی، سـلولز باکتریـایی دارای اسـتحکام کششی بالا، مـدول یانـگ مناسـب و انعطاف‌پـذیری نسـبی است که این ویژگی‌ها تا حد زیادی بـه درجـه بلـورینگی و آرایش الیاف وابسته هستند. در حالـت مرطـوب ایـن مـاده به‌صورت یک هیدروژل انعطاف‌پذیر با قابلیت تغییـر شـکل ظاهر می‌شود. در حالی که در حالـت خشـک، سـخت‌تر و شـکننده‌تر اسـت. ایـن رفتـار وابسـته بـه رطوبـت، بایـد در طراحی کاربردهای مختلف در نظر گرفتـه شـود. عـلاوه بـر این، خواص مکانیکی سلولز باکتریایی را می‌تـوان از طریـق تغییر شرایط کشت، اصلاحات شیمیایی یا ترکیـب بـا سـایر مـواد تنظـیم کـرد(۱۵). سـلولز باکتریـایی همچنـین دارای مجموعـه‌ای از ویژگی‌هـای فیزیکوشـیمیایی مطلـوب بـرای کاربردهای زیست‌پزشکی، از جمله زیست‌سازگاری بـالا، عدم سمیت، پایداری شیمیایی و ظرفیت قابل توجـه جـذب آب، است. این مـاده در تمـاس بـا بافت‌هـای زنـده معمـولاً پاسخ ایمنی قابل‌توجهی ایجاد نمی‌کند. سـاختار متخلخـل و حضور گروه‌های هیدروکسیل فعال باعـث می‌شـود سـلولز باکتریایی بتواند چندین برابر وزن خشک خـود آب جـذب کند که ایـن ویژگـی در کاربردهـایی ماننـد پانسـمان زخـم بسـیار مهـم اسـت. عـلاوه بـر ایـن، وجـود گروه‌هـای هیدروکسـیل فعـال امکـان انجـام اصـلاحات شـیمیایی و اصـلاح سـطح را فـراهم می‌کنـد و بـه پژوهشـگران اجـازه می‌دهد خواص این ماده را برای کاربردهـای خـاص تنظـیم کننـد(۱۵). در مقایسـه بـا سـلولز گیـاهی، سـلولز باکتریـایی دارای خلوص و نظم ساختاری بـیش‌تـری اسـت. در سـلولز گیـاهی حضـور ترکیبـاتی ماننـد لیگنـین و همی‌سـلولز، ساختاری ناهمگن ایجاد می‌کند که فرآیند خالص‌سـازی را دشوار کرده و می‌تواند بر خواص مکانیکی و زیسـتی تـأثیر بگذارد. در مقابل، سلولز باکتریایی به‌طور طبیعـی فاقـد ایـن ناخالصی‌ها بوده و به‌صورت شـبکه‌ای نـانویی و یکنواخـت تولید می‌شود (تصویر شـماره ۲). ایـن ویژگی‌هـا، همـراه بـا قابلیت اصلاح و کنترل دقیق‌تر خواص، موجب شده‌اند کـه سلولز باکتریـایی در بسیاری از کاربردهـای زیست‌پزشـکی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سلولز گیاهی داشته باشد.



تصویر شماره ۲: مقایسه ساختاری سلولز گیاهی و سلولز باکتریایی

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

۲- روش‌های تولید سلولز باکتریایی

تولید سلولز باکتریایی یک فرآیند زیستی پیچیده است که در آن میکروارگانیسم‌های خاص قادر به سنتز و ترشح پلیمرهای سلولزی خارج‌سلولی هستند. این فرآیند علاوه بر مسیرهای متابولیکی درون‌سلولی، به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی، نوع سیستم کشت و منبع کربنی قرار دارد. درک این عوامل برای بهینه‌سازی تولید و دستیابی به محصولی با ویژگی‌های مطلوب ضروری است.

۲-۱- میکروارگانیسم‌های تولید کننده و مسیرهای متابولیکی

سلولز باکتریایی عمدتاً توسط باکتری‌های هوازی گرم منفی از جنس *Komagataeibacter* تولید می‌شود که پیش‌تر با نام *Acetobacter* شناخته می‌شدند (جدول شماره ۱). این باکتری‌ها با استفاده از سیستم آنزیمی اختصاصی، منابع کربنی ساده مانند گلوکز را به زنجیره‌های سلولزی تبدیل می‌کنند. در طی فرآیند گلیکولیز، گلوکز ابتدا فسفریله شده و به گلوکز-۶-فسفات و سپس به گلوکز-۱-فسفات تبدیل می‌شود. این ترکیب با UTP واکنش داده وUDP-گلوکز را تشکیل می‌دهد که پیش‌ساز مستقیم سنتز سلولز محسوب می‌شود(۱۶). آنزیم کلیدی در این مسیر، سلولز سنتاز (cellulose synthase) است که در غشای سلولی قرار دارد و وظیفه پلیمریزاسیون واحدهای گلوکز و تشکیل زنجیره‌های β-۱ و ۴-گلوکان را بر عهده دارد. این زنجیره‌ها همزمان از غشای عبور کرده و در خارج از سلول به الیاف نانومتری سازمان‌دهی می‌شوند. نکته مهم این است که این فرآیند به‌صورت کاملاً جهت‌دار انجام می‌شود، به‌طوری که الیاف تولید شده به‌صورت موازی و با نظم بالا کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و ساختارهای بلوری پایدار را تشکیل می‌دهند. فعالیت سلولز سنتاز تحت تأثیر عواملی مانند سطح انرژی سلولی، کوفاکتورها و شرایط محیطی است. به‌ویژه، سطح اکسیژن محلول برای تأمین انرژی لازم در این باکتری‌های هوازی اهمیت زیادی دارد. همچنین، مولکول‌های سیگنال دهنده درون‌سلولی می‌توانند بیان ژن‌های مرتبط با سنتز سلولز را تنظیم کنند که این موضوع در مهندسی ژنتیک سویه‌ها اهمیت دارد(۱۷).

جدول شماره ۱: ویژگی های سلولز تولید شده توسط سویه های مختلف باکتری

سویه باکتری	ویژگی	منبع
Komagataeibacter xylinus	تولیدکننده کلاسیک سلولز با بازده بالا، بلورینگی زیاد و خلوص بالا که به‌طور گسترده مطالعه شده	(۱۸)
Komagataeibacter hansenii	تشکیل پلیکل‌های ضخیم و ژلاتینی و شبکه نانوفیبری بسیار منظم	(۱۹)
Komagataeibacter rhaeticus	تولید سلولز بالا و تحمل دامنه وسیعpH و رشد پایدار	(۲۰)
Komagataeibacter medellinensis	تحمل اسیدی بالا و تولید کارآمد سلولز در pH پایین (≈3.5–4)	(۲۱)
Komagataeibacter entanii	تحمل غلظت‌های بالای اتانول و اسید استیک و رشد پایدار در شرایط تنش‌زا	(۲۲)
Komagataeibacter sucrofermentans	توان بالا در مصرف ساکارز و تشکیل لایه‌های سلولزی متراکم	(۲۳)
Komagataeibacter nataicola	متابولیسم مؤثر ساکارز و تولید سلولز با ساختار یکنواخت	

۲-۲- شرایط کشت ساکن و هم‌زده

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید سلولز باکتریایی، نوع سیستم کشت است. به‌طور کلی، دو روش اصلی شامل کشت ساکن و کشت هم‌زده وجود دارد. در کشت ساکن، باکتری‌ها در سطح محیط تجمع یافته و لایه‌ای ژل مانند از سلولز به‌صورت یک پلیکل تشکیل می‌دهند. این شرایط به‌دلیل دسترسی بهتر به اکسیژن در سطح، به تولید ساختاری یکنواخت، نانوالیافی و پیوسته منجر می‌شود(۲۴). چنین محصولی به دلیل خواص مکانیکی مناسب و ساختار یکپارچه، برای کاربردهای پزشکی مانند پانسمان زخم و مهندسی بافت بسیار مطلوب است. در مقابل، در کشت هم‌زده، مخلوط شدن مداوم محیط باعث توزیع یکنواخت‌تر باکتری‌ها و افزایش انتقال جرم می‌شود، اما در عین حال الیاف سلولزی به‌صورت نامنظم تجمع می‌یابند و ساختارهایی به شکل ذرات یا گلوله‌های پراکنده ایجاد می‌شود. اگر چه بازده تولید در این روش ممکن است بالاتر باشد،

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

یکنواختی ساختاری محصول کم‌تر است و برای برخی کاربردهای زیست‌پزشکی محدودیت ایجاد می‌کند. یکی از چالش‌های مهم در این روش، تنش برشی است که می‌تواند به سلول‌ها آسیب وارد کرده و فعالیت آنزیم‌های درگیر در سنتز سلولز را کاهش دهد (تصویر شماره ۳). بنابراین، طراحی بهینه سیستم‌های همزده برای ایجاد تعادل میان انتقال جرم و حفظ سلامت سلول‌ها اهمیت زیادی دارد(۲۵).



تصویر شماره ۳: مقایسه ویژگی های تولید سلولز باکتریایی در شرایط کشت ساکن و همزده

۲-۳- پارامترهای فیزیکوشیمیایی مؤثر بر تولید

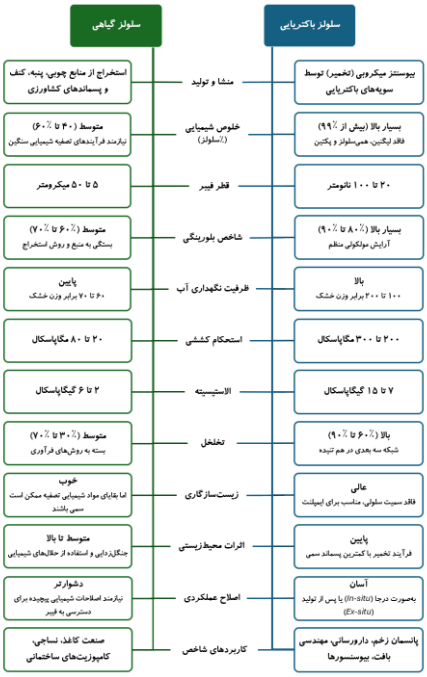
تولید سلولز باکتریایی به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای محیطی قرار دارد که بر بازده، ساختار و خواص محصول نهایی تأثیر می‌گذارند. مهم‌ترین این عوامل شامل pH، دما، غلظت اکسیژن، و نوع و غلظت منبع کربن هستند. pH محیط کشت معمولاً در محدوده اسیدی ملایم (حدود ۴ تا ۶) تنظیم می‌شود، زیرا فعالیت آنزیم‌های دخیل در سنتز سلولز در این محدوده بهینه است. دما نیز در محدوده ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد برای رشد بهینه باکتری‌ها مناسب است و در دماهای بالاتر ممکن است باعث کاهش بازده تولید شوند(۲۶). اکسیژن محلول یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده است، زیرا این فرآیند به متابولیسم هوازی وابسته است. در کشت ساکن، اکسیژن عمدتاً از سطح وارد محیط می‌شود، در حالی که در کشت هم‌زده، توزیع آن یکنواخت‌تر است. با این حال، اکسیژن بیش از حد نیز می‌تواند متابولیت‌های ناخواسته ایجاد کند(۲۷). منبع کربن، ماده اولیه اصلی برای سنتز سلولز است و انتخاب آن تأثیر مستقیمی بر هزینه و بازده تولید دارد. گلوکز رایج‌ترین منبع کربن است، اما فروکتوز، ساکارز، گلیسرول و حتی اتانول نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در سال‌های اخیر، توجه به منابع ارزان قیمت و تجدیدپذیر مانند ملاس، آب پنیر، پوست میوه‌ها و پساب‌های قندی افزایش یافته است. این منابع ضمن کاهش هزینه تولید، به کاهش آلودگی محیط زیست نیز کمک می‌کنند. همچنین، راهبردهای تغذیه‌ای مانند fed-batch با افزودن تدریجی منبع کربن، از تجمع بیش از حد سوبسترا و اثرات مهاری جلوگیری می‌کنند. استفاده هم‌زمان از چند منبع کربن نیز می‌تواند بازده تولید را افزایش دهد(۲۸).

۲-۴- طراحی بیوراکتور و مقیاس‌پذیری

یکی از چالش‌های اصلی در تولید سلولز باکتریایی، انتقال از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی است و در این میان، طراحی بیوراکتور نقش کلیدی دارد. بیوراکتورهای مورد استفاده شامل راکتورهای سینی‌ای، همزده و غشایی هستند. در کشت ساکن، راکتورهای سطحی با مساحت زیاد می‌توانند تولید را افزایش دهند، اما به فضای زیاد و زمان طولانی نیاز دارند. در مقابل، راکتورهای همزده تولید سریع‌تر را ممکن می‌کنند، هرچند کنترل ساختار محصول در آن‌ها دشوارتر است. استفاده از بیوراکتورهای پیوسته، سیستم‌های هیبریدی، میکروبیوراکتورها و فناوری‌های میکروسیالات نیز به‌عنوان رویکردهای نوین برای کنترل بهتر فرایند و بهینه‌سازی تولید مطرح شده‌اند(۲۹). با وجود این پیشرفت‌ها، تولید سلولز باکتریایی همچنان با چالش‌هایی مانند هزینه بالا، زمان طولانی فرایند و محدودیت مقیاس‌پذیری روبه‌رو است. برای رفع این محدودیت‌ها، راهکارهایی نظیر مهندسی ژنتیک سویه‌ها برای افزایش بیان ژن‌های سنتز سلولز یا حذف مسیرهای رقابتی، استفاده از کوکالچرها، سیستم‌های میکروبی

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

ترکیبی و توسعه روش‌های نوین مانند میدان‌های الکتریکی یا افزودن نانوذرات به محیط کشت بررسی شده‌اند. این رویکردها می‌توانند بر سازمان‌دهی الیاف و سرعت سنتز اثر بگذارند (تصویر شماره ۴)



تصویر شماره ٤: مقایسه ویژگی های سلولز باکتریایی و سلولز گیاهی

۳ - *استفاده از پسماندها و منابع تجدیدپذیر در تولید سلولز باکتریایی*

در سال‌های اخیر، استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی به‌عنوان منابع کربنی جایگزین در تولید سلولز باکتریایی، به یکی از محورهای مهم پژوهش در این حوزه تبدیل شده است. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، در توسعه پایدار و مدیریت پسماند نیز اهمیت زیادی دارد. از آن‌جا که تأمین منابع خالصی مانند گلوکز بخش قابل توجهی از هزینه را تشکیل می‌دهد، جایگزینی آن با منابع ارزان و در دسترس می‌تواند امکان‌پذیری اقتصادی فرایند را بهبود بخشد. پسماندهای زیستی معمولاً حاوی مقادیر چشمگیری از قندها، اسیدهای آلی و ترکیبات قابل متابولیزه هستند که می‌توانند به‌عنوان سوبسترا برای رشد باکتری‌های تولید کننده سلولز استفاده شوند(۳۰). این مواد شامل ملاس، آب‌پنیر، ضایعات میوه‌ها مانند پوست پرتقال، سیب و موز، پساب صنایع غذایی و نوشیدنی، و نیز پسماندهای لیگنوسلولزی کشاورزی هستند (جدول شماره ۲). ترکیب شیمیایی این مواد بسته به منبع متفاوت است، اما اغلب دارای قندهای ساده یا پلی‌ساکاریدهایی هستند که پس از پیش تیمار، به منابع کربنی قابل استفاده تبدیل شوند. استفاده از پسماندها ضمن جلوگیری از آلودگی آب و خاک، به تولید محصولات با ارزش افزوده بالا و تحقق اصول اقتصاد چرخشی منجر می‌شود(۳۱). با این حال، استفاده از پسماندها با چالش‌هایی نیز همراه است. تنوع ترکیب شیمیایی و وجود ترکیبات مهاری مانند فنول‌ها، اسیدهای آلی یا فلزات سنگین، می‌تواند رشد باکتری و سنتز سلولز را مختل کند. در نتیجه، انجام پیش‌تیمار های فیزیکی، شیمیایی یا آنزیمی برای حذف یا کاهش این ترکیبات ضروری است. پسماندهای لیگنوسلولزی به‌دلیل ساختار پیچیده خود، نیاز به تجزیه دارند تا قندهای قابل تخمیر آزاد شوند. در این راستا از روش‌هایی مانند هیدرولیز اسیدی، تیمار قلیایی یا استفاده از آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز استفاده می‌شود. انتخاب روش پیش‌تیمار تأثیر مستقیمی بر بازده و هزینه فرآیند دارد. از منظر متابولیکی، استفاده از منابع کربنی پیچیده می‌تواند مسیرهای متابولیکی باکتری را تحت تأثیر قرار دهد. در برخی موارد، وجود چندین نوع قند می‌تواند منجر به مهار کاتابولیتی (catabolite repression) شود که در آن مصرف یک نوع قند بر مصرف سایر قندها تأثیر می‌گذارد. بنابراین، بررسی رفتار متابولیکی باکتری‌ها در حضور این ترکیبات برای بهینه‌سازی تولید ضروری است. ترکیب شیمیایی محیط کشت می‌تواند بر مورفولوژی، درجه بلورینگی و خواص مکانیکی سلولز باکتریایی تأثیر بگذارد(۳۲). به‌عنوان مثال، برخی ترکیبات منجر به تغییر در اندازه یا آرایش نانوالیاف می‌شوند که می‌تواند عملکرد ماده را در کاربردهای زیست‌پزشکی تغییر دهد. به همین دلیل،

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

رابطه میان نوع سوبسترا و ویژگی‌های محصول باید دقیق بررسی شود. یکی از رویکردهای نوین در این زمینه استفاده از سیستم‌های تخمیر ترکیبی (co-culture) است که در آن چند میکروارگانیسم به‌طور هم‌زمان برای تجزیه پسماند و تولید قندهای ساده فعالیت می‌کنند، در حالی که باکتری تولید کننده سلولز از این قندها برای سنتز سلولز باکتریایی بهره می‌برد. این روش کارایی فرایند را افزایش داده و نیاز به پیش‌تیمارهای پیچیده را کاهش می‌دهد(۲۷). در مقیاس صنعتی، مهم‌ترین چالش‌ها مربوط به ناهمگنی ترکیب پسماند، دشواری استانداردسازی و کنترل کیفیت منابع اولیه است. نوسان در ترکیب شیمیایی می‌تواند پایداری فرایند را مختل کند. به همین دلیل توسعه روش‌هایی برای کنترل و یکنواخت‌سازی تغذیه پسماندها حیاتی است. همچنین، طراحی بیوراکتورهایی سازگار با سوبسترای پیچیده از ملزومات گسترش صنعتی این فناوری به‌شمار می‌آید(۳۳). در مجموع، استفاده از پسماندها در تولید سلولز باکتریایی، یک رویکرد موثر برای کاهش هزینه، افزایش پایداری زیستی و گسترش اقتصاد زیستی است. با این وجود، رفع چالش‌های مرتبط با پیش‌تیمار، کنترل ترکیب سوبسترا و بهینه‌سازی شرایط کشت برای تحقق کامل این پتانسیل ضروری است. پیشرفت در این حوزه می‌تواند مسیر تجاری‌سازی گسترده سلولز باکتریایی و توسعه کاربردهای آن در علوم پزشکی را هموار سازد. با وجود مزیت اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی، جایگزینی کامل منابع کربنی خالص با این مواد با چالش‌هایی همراه است. تغییرپذیری ترکیب شیمیایی پسماندها، وجود ترکیبات بازدارنده، نیاز به پیش‌تیمار، تغییر نسبت کربن به نیتروژن و تفاوت در قابلیت دسترسی به منابع کربنی می‌تواند بر رشد میکروبی، بازده تولید و ویژگی‌های نهایی سلولز باکتریایی اثرگذار باشد. بنابراین، ارزیابی یک منبع کربنی جایگزین نباید صرفاً بر اساس مقدار سلولز تولید شده انجام شود، بلکه لازم است اثر آن بر کیفیت و ویژگی‌های ساختاری محصول، تکرارپذیری فرآیند، هزینه پیش‌تیمار و قابلیت انتقال فرآیند به مقیاس بزرگ نیز در نظر گرفته شود. از این منظر، توسعه فرآیندهای پایدار برای تولید سلولز باکتریایی نیازمند رویکردی است که همزمان اقتصاد فرآیند، زیست‌سنتز و ویژگی‌های عملکردی محصول را مورد توجه قرار دهد.

جدول شماره ۲: استفاده از پسماند ها و عصاره های مختلف به عنوان منبع کربن برای تهیه سلولز از باکتری های مختلف

باکتری	منبع کربن	بازده (g/L)	منبع
Komagataeibacter xylinus CH1	پسماند صنعت نبات	۴۵/۵۴۳	(۳۴)
Komagataeibacter sucrofermentans	آب گریپ فروت	۶/۷	(۳۵)
Komagataeibacter sucrofermentans	آب پرتقال	۶/۱	(۳۵)
Komagataeibacter sucrofermentans	عصاره پوست لیمو	۵/۲	(۳۵)
Komagataeibacter sucrofermentans	عصاره پوست گریپ فروت	۵/۰	(۳۵)
Komagataeibacter sucrofermentans	عصاره پوست پرتقال	۲/۹	(۳۵)
Acetobacter xylinum	آب برگ نخل روغنی	۱/۹۱	(۳۶)
Komagataeibacter sucrofermentans	گلیسرول خام و هیدرولیزات کنجاله آفتابگردان	۱۳/۳	(۳۷)
Komagataeibacter sucrofermentans	هیدرولیزات ضایعات غنی از آرد	۱۳/۰	(۳۷)
Komagataeibacter rhaeticus	پوست مارچوبه	۲/۵۷	(۳۸)
Komagataeibacter nataicola	عصاره پوست موز	۰/۸۹	(۳۹)
Komagataeibacter nataicola	عصاره پوست پشن فروت	۰/۳۱	(۳۹)
Gluconacetobacter xylinus	هیدرولیزات آنزیمی کاه گندم	۸/۳	(۴۰)
Komagataeibacter rhaeticus	تفاله انگور تخمیری	۱۰/۲	(۴۱)
Komagataeibacter nataicola	آب نارگیل	۷/۰۷	(۴۲)
Komagataeibacter intermedius	گل یاسمین	۱۲/۱۶	(۴۳)
omagataeibacter intermedius	برگ چای	۱۴/۵۸	(۴۳)
Komagataeibacter spp	باقیمانده سرکه	۲/۱	(۴۴)
Acinetobacter sp.	آب آناناس	۶/۴	(۴۴)
Acinetobacter sp.	آب پاپایا	۶/۵	(۴۴)
Acinetobacter sp.	آب هندوانه	۳/۳	(۴۴)
Acetobacter pasteurianus	آب آناناس	۰/۷	(۴۴)
Acetobacter pasteurianus	آب پاپایا	۶/۷	(۴۴)
Acetobacter pasteurianus	آب هندوانه	۷/۷	(۴۴)

۴ - *کاربردهای سلولز باکتریایی در علوم پزشکی*

کاربردهای سلولز باکتریایی در علوم پزشکی حاصل هم‌افزایی چند ویژگی کلیدی است، ساختار نانوالیافی سه بعدی، زیست‌سازگاری بالا، ظرفیت جذب آب و امکان اصلاح سطح. این ویژگی‌ها نه‌تنها امکان استفاده مستقیم از سلولز باکتریایی را فراهم می‌کنند، بلکه آن را به یک پلتفرم انعطاف‌پذیر برای طراحی سیستم‌های پیشرفته زیست‌پزشکی تبدیل کرده‌اند. در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهش‌ها از کاربردهای ساده به

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

سمت طراحی سیستم‌های چند منظوره، هوشمند و پاسخ دهنده به محرک‌ها حرکت کرده است، به‌طوری‌که سلول باکتریایی دیگر صرفاً یک ماده غیرفعال نیست، بلکه به‌عنوان یک جزء فعال در سیستم‌های درمانی ایفای نقش می‌کند.

۴-۱- پانسمان زخم

یکی از بالغ‌ترین و در عین حال موفق‌ترین کاربردهای سلول باکتریایی، استفاده از آن در طراحی پانسمان‌های پیشرفته زخم است. فرآیند ترمیم زخم شامل مراحل پیچیده‌ای از جمله التهاب، تکثیر سلولی و بازسازی بافت است که هر یک نیازمند شرایط فیزیکوشیمیایی خاصی هستند. سلول باکتریایی با ایجاد یک محیط مرطوب پایدار، نقش کلیدی در تسهیل این فرآیند ایفا می‌کند. برخلاف پانسمان‌های سنتی که معمولاً منجر به خشک شدن سطح زخم می‌شوند، سلول باکتریایی با حفظ رطوبت، از تشکیل دلمه سخت جلوگیری کرد و مهاجرت سلول‌های اپیتلیال را تسریع می‌کند. ساختار نانوالیافی و شبکه متخلخل، ترشحات زخم را جذب و نگه می‌دارد و هم‌زمان تبادل گازها را ممکن می‌کند. همچنین، عدم چسبندگی به بافت زخم، درد و آسیب ثانویه هنگام تعویض پانسمان را کاهش می‌دهد(۴۵). در سال‌های اخیر، تمرکز بر توسعه پانسمان‌های فعال مبتنی بر سلول باکتریایی افزایش یافته است. در این راستا، بارگذاری عوامل آنتی‌باکتریال مانند نانوذرات نقره، اکسید روی یا ترکیبات آلی ضد میکروبی در ساختار سلول باکتریایی منجر به تولید پانسمان‌هایی با قابلیت مهار رشد باکتری‌ها شده است. این موضوع به‌ویژه در زخم‌های مزمن و عفونی، مانند زخم‌های دیابتی، اهمیت دارد. افزون بر آن، می‌توان از آن به‌عنوان بستر دارورسانی موضعی برای رهایش کنترل شده آنتی‌بیوتیک‌ها و فاکتورهای رشد استفاده کرد.

از دیدگاه طراحی، چالش اصلی در این حوزه، ایجاد تعادل میان استحکام مکانیکی، انعطاف‌پذیری و ظرفیت جذب است. اصلاحات شیمیایی و ترکیب با پلیمرهای دیگر، از جمله راهکارهایی هستند که برای بهینه‌سازی این ویژگی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند(۴۶).

۴-۲- مهندسی بافت

در مهندسی بافت، هدف اصلی ایجاد یک بستر مناسب برای رشد، تکثیر و تمایز سلول‌ها به‌منظور بازسازی بافت‌های آسیب دیده است. سلول باکتریایی به‌عنوان یک داربست زیستی، به دلیل شباهت ساختاری به ماتریکس خارج سلولی و تخلخل بالا، چسبندگی و تعامل سلولی را بهبود می‌دهد و امکان نفوذ سلول‌ها و انتقال مواد غذایی، اکسیژن و متابولیت‌ها را فراهم می‌کند. علاوه بر این، امکان اصلاح سطح با لیگاندهای زیستی یا پروتئین‌های چسبنده می‌تواند مسیرهای تمایز را هدایت کند(۴۷). کاربردهای سلول باکتریایی در مهندسی بافت شامل بازسازی پوست، غضروف، استخوان و حتی عروق خونی می‌شود. در مهندسی بافت پوست، سلول باکتریایی به‌عنوان جایگزین موقت یا دائم برای اپیدرم عمل می‌کند. در مهندسی غضروف، ترکیب سلول باکتریایی با پلیمرهای الاستیک می‌تواند خواص مکانیکی مشابه بافت طبیعی را فراهم کند. همچنین، در بازسازی عروق، استفاده از لوله‌های مبتنی بر سلول باکتریایی به‌دلیل استحکام و زیست‌سازگاری بالا مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، در برخی کاربردها یکی از محدودیت‌ها، عدم زیست‌تخریب‌پذیری کنترل شده سلول باکتریایی است. بنابراین، توسعه روش‌هایی برای تنظیم نرخ تخریب سلول باکتریایی، از جمله اصلاحات شیمیایی یا ترکیب با پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۴-۳- دارو رسانی

ساختار متخلخل و شبکه‌ای سلول باکتریایی، امکان بارگذاری داروها با اندازه‌ها و خواص مختلف را فراهم می‌کند. علاوه بر این، برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

میان دارو و ماتریس سلولز باکتریایی به تنظیم سینتیک رهایش کمک می‌کند. همچنین با اصلاح سطح می‌توان سامانه‌های پاسخ دهنده به محرک‌هایی مانند pH، دما یا حضور آنزیم‌های خاص طراحی نمود؛ این قابلیت در درمان‌های هدفمند (مثل عفونت موضعی یا سرطان) کاربرد دارد.

این ماده می‌تواند به شکل هیدروژل، فیلم یا میکرو/نانوذره استفاده شود. در سیستم‌های موضعی، مانند پانسمان‌های دارو رسان سلولز باکتریایی می‌تواند دارو را به‌طور مستقیم به محل زخم منتقل کند. در کاربردهای سیستمیک، طراحی ساختارهای قابل تزریق یا خوراکی مبتنی بر سلولز باکتریایی امکان رهایش تدریجی دارو در بدن را فراهم می‌کند. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی، کنترل دقیق سینتیک رهایش است که به عواملی مانند اندازه منافذ، درجه بلورینگی و نوع برهم‌کنش دارو با ماتریس وابسته است(۴۸).

۴-۴- کاربردهای آنتی‌باکتریال

سلولز باکتریایی ذاتاً آنتی‌باکتریال نیست، اما با اصلاح و ترکیب با عوامل ضد میکروبی می‌توان عملکرد بالا ایجاد کرد. رایج‌ترین رویکرد، استفاده از نانوذرات فلزی مانند نقره، مس و اکسید روی است. این نانوذرات می‌توانند از طریق مکانیسم‌هایی مانند تولید گونه‌های فعال اکسیژن، تخریب دیواره سلولی و اختلال در عملکرد آنزیم‌های باکتریایی، موجب مرگ میکروارگانیسم‌ها شوند. در سیستم‌های مبتنی بر سلولز باکتریایی این نانوذرات به‌صورت یکنواخت در ماتریس توزیع می‌شوند که این امر باعث افزایش سطح تماس با باکتری‌ها و بهبود کارایی ضد میکروبی می‌شود. علاوه بر این، ماتریس سلولز باکتریایی می‌تواند به‌عنوان یک مخزن برای رهایش تدریجی عوامل آنتی‌باکتریال عمل کند، که این ویژگی در جلوگیری از رشد مجدد باکتری‌ها اهمیت دارد(۴۹).

کاربرد این سیستم‌ها در محیط‌های بیمارستانی، به‌ویژه در پانسمان زخم، کاتترها و سطوح پزشکی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، کنترل سمیت نانوذرات برای سلول‌های انسانی یک چالش کلیدی است و باید سامانه‌ها با حداقل سمیت و حداکثر کارایی طراحی شوند.

۴-۵- بیوسنسورها و سیستم‌های تشخیصی

سلولز باکتریایی به‌دلیل سطح ویژه بالا، تخلخل مناسب و قابلیت اصلاح سطح، به‌عنوان بستری ایده‌آل برای تثبیت آنزیم‌ها و سایر عناصر زیستی در بیوسنسورها مورد استفاده قرار گرفته است(۵۰). در این سیستم‌ها، آنزیم‌ها یا آنتی‌بادی‌ها بر روی سطح سلولز باکتریایی تثبیت شده و در واکنش با آنالیت، تولید سیگنال قابل اندازه‌گیری می‌کنند. یکی از مزایای مهم سلولز باکتریایی در این کاربرد، حفظ فعالیت زیستی آنزیم‌ها پس از تثبیت است. ساختار نانوالیافی این ماده می‌تواند به حفظ ساختار سه بعدی آنزیم‌ها و کاهش دناتوراسیون کمک کند. علاوه بر این، امکان اصلاح سطح سلولز باکتریایی با گروه‌های عاملی مختلف، اتصال قوی‌تر و پایدارتر مولکول‌های زیستی را فراهم می‌کند(۵۱).

در سال‌های اخیر، بیوسنسورهای انعطاف‌پذیر و پوشیدنی برای پایش مداوم پارامترهایی مانند گلوکز و لاکتات و همچنین نشانگرهای عصبی توسعه یافته‌اند. ترکیب با مواد رسانا مانند گرافن یا پلیمرهای رسانا، امکان انتقال سیگنال الکتریکی را بهبود بخشیده و حساسیت سنسورها را افزایش می‌دهد. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی مانند پایداری طولانی مدت، تکرارپذیری و کاهش نویز سیگنال، همچنان در توسعه این سیستم‌ها وجود دارد.

مرور مطالعات نشان می‌دهد که سلولز باکتریایی از یک زیست‌پلیمر تخصصی به بستری چند منظوره برای توسعه مواد پیشرفته تبدیل شده است. ویژگی‌های ساختاری منحصربه‌فرد این ماده در کنار قابلیت اصلاح شیمیایی و فیزیکی، طراحی سامانه‌های عملکردگرا در

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

حوزه‌های ترمیم زخم، مهندسی بافت، دارورسانی، بیوسنسورها، تصفیه آب و بسته‌بندی زیست‌پایه را ممکن ساخته است. همچنین ادغام آن با پلیمرهای زیستی، نانومواد و ترکیبات زیست فعال، منجر به کامپوزیت‌های هوشمند و چند منظوره با کاربردهای زیست‌پزشکی و محیط‌زیستی شده است.

با وجود این پیشرفت‌ها، بهره‌برداری صنعتی و بالینی از سلولز باکتریایی هنوز با چالش‌هایی چون، هزینه بالای تولید، بازده محدود تخمیر، زمان طولانی فرایند، و دشواری کنترل یکنواختی ساختار در مقیاس صنعتی، روبه‌رو است. همچنین دستیابی به ویژگی‌هایی چون زیست‌تخریب‌پذیری قابل کنترل، فعالیت ضدباکتری ذاتی و پاسخ‌دهی به محرک‌های محیطی، نیازمند اصلاحات نوآورانه است. در این راستا، مهندسی ژنتیک سویه‌ها، بهینه‌سازی کشت، استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی و بهبود طراحی بیوراکتورها می‌تواند بهره‌وری را افزایش و هزینه‌ها را کاهش دهد. در چشم‌انداز آینده، تمرکز بر تولید مقیاس‌پذیر و اقتصادی و طراحی مواد عملکردی پیشرفته اهمیت دارد. عملکردسازی هدفمند سلولز باکتریایی و ترکیب آن با مواد هوشمند، توسعه سامانه‌های رهایش کنترل شده، حسگری زیستی و پاسخ دهنده به محرک را ممکن می‌کند. با تداوم پیشرفت‌های علمی و همکاری‌های میان رشته‌ای، انتظار می‌رود سلولز باکتریایی و کامپوزیت‌های آن به یکی از مواد کلیدی در فناوری‌های پایدار سلامت، محیط زیست و علم مواد پیشرفته تبدیل شوند.

در مجموع، بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که توسعه سلولز باکتریایی برای کاربردهای زیست‌پزشکی را نمی‌توان صرفاً از منظر افزایش بازده تولید یا توسعه کاربردهای جدید دنبال کرد. یک رویکرد مؤثرتر، ارتباط دادن انتخاب سویه و منبع کربن، مسیرهای متابولیکی، شرایط زیست فرآیند و طراحی بیوراکتور با ویژگی‌های ساختاری و عملکردی سلولز تولید شده است. استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه و حرکت به سوی تولید پایدار داشته باشد، اما تغییرپذیری این منابع و تأثیر آن‌ها بر کیفیت محصول، نیازمند کنترل و استانداردسازی فرآیند است. بنابراین، آینده این حوزه به سمت راهبردهای یکپارچه شامل مهندسی سویه، بهینه‌سازی متابولیکی، استفاده از منابع کربنی تجدیدپذیر، طراحی فرآیندهای مقیاس‌پذیر و کنترل ویژگی‌های ساختاری سلولز برای کاربردهای اختصاصی پیش خواهد رفت. این دیدگاه تولید–ساختار–عملکرد می‌تواند مسیر انتقال سلولز باکتریایی از تولید آزمایشگاهی به مواد زیست‌پزشکی پایدار و قابل توسعه در مقیاس صنعتی را تسهیل کند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح شماره ۲۵۸۵۱ مصوب کمیته تحقیقات دانشجویی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران می‌باشد.

References

1- Tsouko E, Pilafidis S, Kourmentza K, Gomes HI, Sarris G, Koralli P, et al. A sustainable bioprocess to produce bacterial cellulose (BC) using waste streams from wine distilleries and the biodiesel industry: evaluation of BC for adsorption of phenolic compounds, dyes and metals. Biotechnol Biofuels Bioprod 2024;17:40. PMID: 38500200

2- Jafarbigloo HG, Khorasani AC. Process intensification in co-production of plant and bacterial cellulose from citrus waste: a review. Chem Eng Process Process Intensif 2026;222:110730.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

3- Zhu S, Sha Y, Shan J, Chen T, Yang J, Peng H, et al. Bacterial cellulose: a sustainable material for environmental applications. Cellulose 2026;33:607-630.
4- Dang R, Xu J, Zhang B, Zhao S, Dang Y. Preparation of bacterial cellulose-based antimicrobial materials and their applications in wound dressing: a review. Mater Des 2025;253:113820.
5- Yildirim M, Ermis E, Amangeldinova M, Yabalak E. Recent advances in bacterial cellulose: from sustainable production to environmental, biomedical, and 3D bioprinting applications. Chem Eng Res Des 2026;226:515-535.
6- Hashempour Y, Mortezazadeh F, Rezaei S, Salehipour M, Gholami-Borujeni F, Ebrahimnejad P, et al. Co-immobilization of laccase and zinc oxide nanoparticles onto bacterial cellulose to achieve synergistic effect of photo and enzymatic catalysis for biodegradation of favipiravir. Int J Biol Macromol 2025;292:139288. PMID: 39746448
7- Nikpour S, Salehipour M, Rezaei S, Mogharabi-Manzari M. Design and fabrication of magnetic cross-linked laccase aggregate using superparamagnetic metal-organic frameworks for phenol removal. Biochem Eng J 2024;209:109385.
8- Fiallos-Cardenas M, Gavin C, Huilcarema-Enríquez K, Cumbicus-Bravo A, Pozo F. Innovation in obtaining bacterial nanocellulose from banana rachis: effects of ozone treatment. Case Stud Chem Environ Eng 2025;11:101044.
9- Çalhan A, Hasanoğlu A. Bacterial cellulose as a next-generation membrane material for selective transport: properties, fabrication, and applications. Cellulose 2026;33:1167-1211.
10- Zhang Y, Shen Y, Liu R, Zhang W, Luo Z, Wang X, et al. Research progress of cellulose composite membranes in advanced functional materials: strategy, performance, and application. J Environ Chem Eng 2026;14:121107.
11- Liu X, Qian X, Yu Z, Zheng X, Qiao Y, Chen C, et al. A one-dimensional bacterial cellulose nano-whiskers-based binary-drug delivery system for the cancer treatment. Int J Biol Macromol 2024;279:134970.
12- 12. Qiao W, Qiao Y, Gao G, Liao Z, Wu Z, Saris PEJ, et al. A novel co-cultivation strategy to generate low-crystallinity bacterial cellulose and increase nisin yields. Int J Biol Macromol 2022;202:388-396.
13- Sommer A, Staroszczyk H. Bacterial cellulose vs. bacterial cellulose nanocrystals as stabilizer agents for O/W pickering emulsions. Food Hydrocoll 2023;145:109080.
14- Prilepskii A, Nikolaev V, Klaving A. Conductive bacterial cellulose: from drug delivery to flexible electronics. Carbohydr Polym 2023;313:120850.
15- Chen S, Tang H, Fan X, Li B, Wang Y, Zhou W, et al. Bio-orthogonal functionalization of bacterial cellulose combining metabolic glycoengineering and click chemistry. Nat Commun 2026;17(1):1-14. PMID: 41633993
16- Kulshrestha P, Arora A, Aggarwal A, Hosseini-Bandegharaei A, Sudhakar MS, Sah MK. Advances in biomedical applications of bacterial cellulose: from synthesis mechanisms to commercial innovations. World J Microbiol Biotechnol 2025;41:132.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

17- Liu M, Shen X, Guo F, Jiang W, Zhang W, Xin F, et al. Unraveling the biosynthesis and regulation mechanism of bacterial cellulose: challenges and strategies toward industrial production. Carbohydr Polym 2026;377:124891. PMID: 41617292

18- Sumini M, Andrade GJS, Tischer CA, Kobayashi RKT, Nakazato G. Production of bacterial cellulose by Komagataeibacter xylinus: biochemistry, synthesis and applications. Cellulose 2025;32:81-94.

19- de Paiva GM, de Melo LF, Pedroso FP, Mesquita PL, Nucci ER, Santos IJB. Use of brewer's residual yeast for production of bacterial nanocellulose with Gluconacetobacter hansenii. Int J Biol Macromol 2023;242:124897. PMID: 37196713

20- Quiñones-Cerna C, Rodríguez-Soto JC, Barraza-Jáuregui G, Huanes-Carranza J, Cruz-Monzón JA, Ugarte-López W, et al. Bioconversion of agroindustrial asparagus waste into bacterial cellulose by Komagataeibacter rhaeticus. Sustainability 2024;16:736.

21- Gorgieva S, Jančič U, Cepec E, Trček J. Production efficiency and properties of bacterial cellulose membranes in a novel grape pomace hydrolysate by Komagataeibacter melomenusus AV436T and Komagataeibacter xylinus LMG 1518. Int J Biol Macromol 2023;244:125368.

22- Rahman SSA, Vaishnavi T, Vidyasri GS, Sathya K, Priyanka P, Venkatachalam P, et al. Production of bacterial cellulose using Gluconacetobacter kombuchae immobilized on Luffa aegyptiaca support. Sci Rep 2021;11:2912. PMID: 33536530

23- Venturelli G, Villa F, Petraretti M, Guagliano G, Levi M, Petrini P. Bacterial cellulose for scalable and sustainable bio-gels in the circular economy. Gels 2025;11:262.

24- Jin K, Jin C, Wu Y. Synthetic biology-powered microbial co-culture strategy and application of bacterial cellulose-based composite materials. Carbohydr Polym 2022;283:119171. PMID: 35153021

25- Rouhi M, Khanchezar S, Babaeipour V. Economical optimization of industrial medium culture for bacterial cellulose production. Appl Biochem Biotechnol 2023;195:2863-2881.

26- Son J, Lee KH, Lee T, Kim HS, Shin WH, Oh JM, et al. Enhanced production of bacterial cellulose from Miscanthus as sustainable feedstock through statistical optimization of culture conditions. Int J Environ Res Public Health 2022;19:866. PMID: 35055692

27- Li W, Huang X, Liu H, Lian H, Xu B, Zhang W, et al. Improvement in bacterial cellulose production by co-culturing Bacillus cereus and Komagataeibacter xylinus. Carbohydr Polym 2023;313:120892. PMID: 37182977

28- Wang X, Zhong JJ. Improvement of bacterial cellulose fermentation by metabolic perturbation with mixed carbon sources. Process Biochem 2022;122:95-102.

29- Loh J, Arnardottir T, Gilmour K, Zhang M, Dade-Robertson M. Enhanced production of bacterial cellulose with a mesh dispenser vessel-based bioreactor. Cellulose 2025;32:2209-2226.

30- Khan S, Ul-Islam M, Fatima A, Manan S, Khattak WA, Ullah MW, et al. Potential of food and agro-industrial wastes for cost-effective bacterial cellulose production: an

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

updated review of literature. ES Food Agrofor 2023;13:905.

31- 31. Güzel M. Valorisation of bread wastes via the bacterial cellulose production. Biomass Convers Biorefinery 2025;15:4777-4790.

32- Skiba EA, Gladysheva EK, Budaeva VV, Aleshina LA, Sakovich GV. Yield and quality of bacterial cellulose from agricultural waste. Cellulose 2022;29:1543-1555.

33- El-Gendi H, Taha TH, Ray JB, Saleh AK. Recent advances in bacterial cellulose: a low-cost effective production media, optimization strategies and applications. Cellulose 2022;29:7495-7533.

34- Khiabani A, Sarabi-Jamab M, Shakeri M, Pahlevanlo A, Emadzadeh B. Bacterial cellulose biosynthesis: optimization strategy using Iranian nabat industry waste. Heliyon 2024;10:e35986.

35- Andritsou V, de Melo EM, Tsouko E, Ladakis D, Maragkoudaki S, Koutinas AA, et al. Synthesis and characterization of bacterial cellulose from citrus-based sustainable resources. ACS Omega 2018;3:10365-10373.

36- Mohamad S, Abdullah LC, Jamari SS, Mohamad SFS. Lignin content analysis in oil palm frond juice base medium: effect on bacterial cellulose production by Acetobacter xylinum 0416. Cellulose 2024;31:1467-1479.

37- Tsouko E, Kourmentza C, Ladakis D, Kopsahelis N, Mandala I, Papanikolaou S, et al. Bacterial cellulose production from industrial waste and by-product streams. Int J Mol Sci 2015;16:14832-14849.

38- Quiñones-Cerna C, Rodríguez-Soto JC, Barraza-Jáuregui G, Huanes-Carranza J, Cruz-Monzón JA, Ugarte-López W, et al. Bioconversion of agroindustrial asparagus waste into bacterial cellulose by Komagataeibacter rhaeticus. Sustainability 2024;16:736.

39- Moukamnerd C, Ounmuang K, Konboa N, Insomphun C. Bacterial cellulose production by Komagataeibacter nataicola TISTR 2661 by agro-waste as a carbon source. Chiang Mai J Sci 2020;47:16-27.

40- Chen L, Hong F, Yang X, Han S. Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism. Bioresour Technol 2013;135:464-468.

41- Li Z, Dong J, Azi F, Feng X, Ge Z, Yang S, et al. Mechanism of Cr(VI) removal by polyphenols-rich bacterial cellulose gel produced from fermented wine pomace. NPJ Clean Water 2024;7:21.

42- Fei S, Fu M, Kang J, Luo J, Wang Y, Jia J, et al. Enhancing bacterial cellulose production of Komagataeibacter nataicola through fermented coconut water by Saccharomyces cerevisiae: a metabonomics approach. Curr Res Food Sci 2024;8:100761.

43- Avcioglu NH. Eco-friendly production of bacterial cellulose with Komagataeibacter intermedius strain by using Jasminum sambac and Camellia sinensis plants. J Polym Environ 2024;32:460-477.

44- Liu Z, Wang Y, Guo S, Liu J, Zhu P. Preparation and characterization of bacterial cellulose synthesized by kombucha from vinegar residue. Int J Biol Macromol 2024;258:128939. PMID: 38143062

45- Madanhire T, Poswayo O, Ngalo B, Alven S, Magwa N. Bacterial cellulose-based materials for drug delivery in wound

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]

dressing applications. J Drug Deliv Sci Technol 2026;:108275.

46- Jabbari F, Babaeipour V. Bacterial cellulose as an ideal potential treatment for burn wounds: a comprehensive review. Wound Repair Regen 2024;32:323-339. PMID: 38445725

47- Ujjwal RR, Slaughter G. Advances in bacterial cellulose-based scaffolds for tissue engineering. J Biomed Mater Res A 2025;113:e37912.

48- Yan Y, Liu L, Wang F, Zhang H. Bacterial cellulose as a promising biodegradable bioplastic for sustainability. Nat Commun 2026;17(1):1-18.

49- Ul-Islam M, Habis F, Fatima A, Al Saidi AK, Shehzad A, Koofan F, et al. Sustainable antibacterial and wound-healing hydrogels: Croton confertus-loaded bacterial cellulose composites. Mater Adv 2026;7:4293-4306.

50- Aghaee M, Mogharabi-Manzari M. A review of enzyme immobilization methods and critical parameters for evaluating immobilized enzymes. J Mazandaran Univ Med Sci 2026;35:136-151.

51- Priya S, Malviya R, Chandra P, Sridhar SB, Shareef J, Wadhwa T, et al. Functionalized bacterial nanocellulose-based smart bioelectronics for biosensing. Carbohydr Polym Technol Appl 2026;14:101132.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-15]