

## Production of Cellulose and Nanocellulose from Macroalgae as Novel Green Sustainable Bioresources

Fatemeh Asadi<sup>1</sup>, Mohammad Hadi Aryaie Monfared<sup>2\*</sup>, Ahmad Reza Saraeyan<sup>3</sup>, Sahab Hedjazi<sup>4</sup>

1- Ph.D. Candidate of Pulp and Paper Industries, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2- Corresponding author, Assistant Professor, Paper Sciences and Engineering Department, Wood and Paper Engineering Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Corresponding Author Email: [aryaie@gau.ac.ir](mailto:aryaie@gau.ac.ir)

3- Emeritus Associate Professor, Paper Sciences and Engineering Department, Wood and Paper Engineering Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

4- Associate Professor, Paper Sciences and Engineering Department, Wood and Paper Engineering Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Received: June 2025

Accepted: August 2025

### Abstract

**Problem definition and objectives:** Growing global environmental awareness has significantly boosted the demand for biodegradable and eco-friendly biopolymers. While terrestrial biopolymer sources can lead to overexploitation of land and water resources and potential food displacement, marine macroalgae emerge as highly promising sustainable alternatives. These organisms are independent of terrestrial ecosystems and can contribute effectively to reducing oceanic plastic pollution. This research focuses on investigating the potential of macroalgae for cellulose and nanocellulose (NCs) production, exploring extraction methodologies, and evaluating the unique applications of these materials.

**Methodology:** The extraction and purification of cellulose and NCs from macroalgae leverage structural similarities between algal and plant cellulose, relying on integrated chemical and mechanical approaches, often complemented by green chemistry and biological methods. Processes typically commence with alkaline pretreatment (e.g., sodium hydroxide, NaOH) to remove hemicelluloses, waxes, and lipids, thereby purifying cellulose fibers. Subsequently, the cellulosic pulp undergoes bleaching with agents like hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) or sodium chlorite (NaClO<sub>2</sub>), with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> being preferred due to its environmental compatibility. For nanofibrillation, energy-intensive mechanical methods such as super-disk milling, homogenization, or microfluidization are employed to produce cellulose nanofibrils (CNF). In contrast, controlled acid hydrolysis using strong acids (e.g., hydrochloric acid, HCl, or sulfuric acid, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) is utilized for synthesizing cellulose nanocrystals (CNC). Furthermore, biological methods, including enzymatic hydrolysis with Cellulase enzymes (produced by microorganisms), offer a sustainable and less energy-intensive alternative, leading to reduced chemical solvent consumption and enhanced NC yield.

**Results:** Extensive research on cellulose and NCs extraction from various macroalgal species (brown, green, and red) has yielded promising outcomes. The outstanding properties of algal NCs, including high mechanical strength, large specific surface area, and excellent biocompatibility,

render them highly valuable materials with broad applications. Studies indicate that extracted NCs, such as those from *Chara corallina*, possess a highly ordered crystalline structure (with a crystallinity index up to 85.64%) and a rod-like nanomorphology coupled with a significant specific surface area (e.g., 823.5 m<sup>2</sup>/g), substantially enhancing their application potential. In packaging and bioplastics, algal NCs have been successfully incorporated into nanocomposite films (e.g., from *Laminaria japonica* and *Sargassum natans*), demonstrating improved physical and mechanical properties, including enhanced water and oxygen barrier resistance. Additionally, cellulose extracted from *Cladophora* sp. has served as a primary component in high-performance bioplastics, exhibiting a tensile strength of 9.33 MPa and biodegradability exceeding 40% in 5 days. For water treatment, nanocellulose membranes derived from the freshwater macroalga *Chara corallina* have demonstrated high efficiency in removing heavy metal ions (e.g., cadmium, nickel, and lead) from contaminated water, with efficiencies of 98.20%, 95.15%, and 93.80%, respectively. This presents a sustainable remediation strategy. Moreover, in biomedical applications, NCs extracted from *Ulva lactuca* have exhibited significant antibacterial properties against both Gram-positive and Gram-negative bacteria. Furthermore, NCs derived from brown algae (*Laminaria digitata* and *Saccharina latissima*) show remarkable potential for developing advanced medical dressings and hydrogels, owing to their long-term stability in gel solutions and excellent biocompatibility.

**Conclusion:** Marine macroalgae represent an abundant, renewable, and sustainable source for high-quality cellulose and NCs production. These biomaterials, with their remarkable physicochemical and mechanical properties, pave the way for diverse applications across various industries. The development of green and cost-effective extraction methods, such as enzymatic hydrolysis and optimized chemical processes, is crucial for the commercialization and improved efficiency of these processes. Given current environmental challenges, utilizing algae-derived NCs not only provides a sustainable pathway for novel material production but also significantly contributes to algal waste management and carbon footprint reduction. This research underscores the vital role of macroalgae in the future of sustainable biopolymers and their innovative applications, thereby paving the way for further research and development in this field.

**Keywords:** Biomass, Macroalgae, Biopolymer, Cellulose, Nanocellulose, Enzymatic Hydrolysis.

## تولید سلولز و نانوسلولز از ماکرو جلبک‌ها به‌عنوان منابع زیستی نوین سبز پایدار

فاطمه اسدی<sup>۱</sup>، محمد هادی آریائی منفرد<sup>۲</sup>، احمد رضا سرائیان<sup>۲</sup>، سبحان حجازی<sup>۲</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
 ۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [aryaie@gau.ac.ir](mailto:aryaie@gau.ac.ir)  
 ۳- دانشیار بازنشسته گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.  
 ۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: تیر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: مرداد ۱۴۰۴

### چکیده

**بیان مساله و اهداف:** افزایش آگاهی‌های جهانی نسبت به مسائل زیست‌محیطی، تقاضا برای بیوپلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر را به‌طور چشمگیری افزایش داده است. در حالی که منابع بیوپلیمری زمینی، منجر به بهره‌برداری بی‌رویه از زمین و منابع آبی می‌شوند، ماکرو جلبک‌های دریایی به‌عنوان منابعی پایدار و مستقل از اکوسیستم‌های خشکی، پتانسیل بالایی برای تولید پلی‌ساکاریدهای زیست‌فعال نظیر سلولز و کاهش آلودگی‌های پلاستیکی اقیانوسی از خود نشان می‌دهند. این تحقیق بر بررسی پتانسیل ماکرو جلبک‌ها در تولید سلولز و نانوسلولز (NCs)، روش‌های استخراج و کاربردهای منحصربه‌فرد این مواد تمرکز دارد.

**مواد و روشها:** استخراج و خالص‌سازی سلولز و نانوسلولز (NCs) از ماکرو جلبک‌ها، با بهره‌گیری از شباهت‌های ساختاری سلولز جلبکی به سلولز گیاهی، متکی بر رویکردهای ترکیبی شیمیایی و مکانیکی است که اغلب با روش‌های شیمی سبز و بیولوژیکی تکمیل می‌شوند. فرآیندها معمولاً با پیش تیمار قلیایی مانند هیدروکسید سدیم (NaOH)، جهت حذف همی سلولزها، موم‌ها و لیپیدها و خالص‌سازی فیبرهای سلولزی آغاز می‌شود. در ادامه، خمیر سلولزی با عوامل سفیدکننده نظیر پراکسید هیدروژن (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)، کلریت سدیم (NaClO<sub>2</sub>) رنگ‌بری می‌شود که در این میان، استفاده از (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) به دلیل سازگاری زیست‌محیطی ارجحیت بیشتری دارد. در مرحله‌ی نهایی، جهت تولید نانوسلولز فیبرله (CNF)، روش‌های مکانیکی انرژی بر، مانند آسیاب سوپردیسکی، هموژنایزر یا میکرومایع‌ساز به کار گرفته می‌شوند، در حالی که جهت سنتز نانوسلولز کریستالی (CNC)، هیدرولیز اسیدی کنترل شده با اسیدهای قوی نظیر هیدروکلریک اسید (HCl) یا سولفوریک اسید (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) انجام می‌پذیرد. همچنین، روش‌های بیولوژیکی از جمله هیدرولیز آنزیمی با استفاده از آنزیم‌های سلولاز (تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها) به‌عنوان جایگزینی پایدار و کم‌انرژی تر، منجر به کاهش مصرف حلال‌های شیمیایی و بهبود بازده نانوسلولز خواهند شد.

**نتایج:** تحقیقات گسترده بر روی استخراج سلولز و نانوسلولز (NCs) از گونه‌های مختلف ماکرو جلبک‌ها (قهوه‌ای، سبز و قرمز) نتایج امیدوارکننده‌ای را به ارمغان آورده است. خواص برجسته نانوسلولز جلبکی، از جمله استحکام مکانیکی بالا، سطح ویژه وسیع و زیست‌سازگاری عالی، آن را به یک ماده‌ی بسیار ارزشمند با کاربردهای گسترده تبدیل کرده است. مطالعات نشان می‌دهند که نانو سلولزهای استخراج شده، به‌عنوان مثال از گونه‌ی جلبکی (*Chara corallina*)، دارای ساختار کریستالی بسیار منظم (با شاخص کریستالیتی تا ۸۵/۶۴ درصد) و مورفولوژی نانو میله‌ای همراه با سطح ویژه قابل توجه (۵/۸۲۳ مترمربع بر گرم) هستند که پتانسیل کاربردی آن‌ها را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهند. در حوزه بسته‌بندی و بیوپلاستیک، نانوسلولز جلبکی در تولید فیلم‌های نانو کامپوزیت (مانند فیلم‌های حاصل از جلبک‌های قهوه‌ای، کامبو (*Laminaria japonica*) سارگاسوم (*Sargassum natans*) با خواص فیزیکی و مکانیکی بهبودیافته، از جمله افزایش مقاومت در برابر نفوذ آب و اکسیژن، به کار گرفته شده است. علاوه بر این، سلولز استخراج شده از جلبک سبز (*Cladophora sp*)، به‌عنوان جزء اصلی در ساخت بیوپلاستیک‌های با عملکرد بالا، با استحکام کششی ۹/۳۳

مگاپاسکال و زیست‌تخریب‌پذیری بیش از ۴۰ درصد در ۵ روز، مورد استفاده قرار گرفته است. در زمینه تصفیه آب، غشاهای نانو سلولزی استخراج شده از ماکرو جلبک آب شیرین (*Chara corallina*)، قابلیت بالایی در حذف یون‌های فلزات سنگین (نظیر کادمیوم، نیکل و سرب) با بازدهی به ترتیب ۹۸/۲۰، ۹۵/۱۵ و ۹۳/۸۰ درصد از آب‌های آلوده نشان داده‌اند که راهکاری پایدار برای این معضل زیست‌محیطی محسوب می‌شود. همچنین، در کاربردهای زیست‌پزشکی، نانوسلولز استخراج شده از جلبک سبز (*Ulva lactuca*)، خواص ضد باکتریایی قابل توجهی در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی از خود نشان داده است. علاوه بر این، نانو سلولزهای حاصل از دو گونه جلبک قهوه‌ای، (*Laminaria digitata*) و (*Saccharina latissima*)، به دلیل پایداری طولانی مدت در محلول‌های ژل‌مانند و خواص زیست‌سازگاری، پتانسیل چشمگیری در توسعه باندپیچی‌های پزشکی پیشرفته و هیدروژل‌ها دارند.

**نتیجه‌گیری:** ماکرو جلبک‌های دریایی به‌عنوان یک منبع فراوان، تجدیدپذیر و پایدار، پتانسیل بی‌نظیری برای تولید سلولز و نانوسلولز باکیفیت بالا دارند. این مواد زیستی با خواص فیزیکوشیمیایی و مکانیکی برجسته، از جمله استحکام بالا، سطح ویژه وسیع و زیست‌سازگاری، راه را برای کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف هموار می‌کنند. توسعه روش‌های استخراج سبز و مقرون‌به‌صرفه، مانند هیدرولیز آنزیمی و بهبود فرآیندهای شیمیایی، اهمیت بالایی در تجاری‌سازی و افزایش بهره‌وری این مواد دارد. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی فعلی، استفاده از نانو سلولزهای استخراج شده از جلبک‌ها، نه تنها راهکاری پایدار برای تولید مواد جدید فراهم می‌کند، بلکه به مدیریت پسماندهای جلبکی و کاهش ردپای کربن نیز کمک شایانی می‌نماید. این پژوهش بر نقش حیاتی ماکرو جلبک‌ها در آینده بیوپلیمرهای پایدار و کاربردهای نوین آن‌ها تأکید می‌کند و مسیر را برای تحقیقات و توسعه بیشتر در این حوزه هموار می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** زیست‌توده، ماکرو جلبک‌ها، بیوپلیمر، سلولز، نانوسلولز، هیدرولیز آنزیمی.

## مقدمه

پذیر، مهندسی بافت و سیستم‌های انتقال ژن نیز کاربرد پیدا می‌کنند. آگاهی از مشکلات محیط‌زیستی فعلی نیز بر توسعه نانو مواد سازگارتر با محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد [۱ و ۲]. پلیمرهای به دست آمده از منابع زیستی، در مقایسه با پلیمرهای مصنوعی، از مزایای اکولوژیکی بسیاری برخوردارند؛ زیرا این پلیمرها، تجدیدپذیر، در دسترس، دارای قابلیت جداسازی نسبتاً آسان، زیست‌سازگار و غیرسمی هستند. استفاده از آن‌ها می‌تواند مقدار زیادی از زباله‌های غیرقابل تجزیه زیستی که روزانه توسط برخی صنایع تولید می‌شوند را کاهش دهد [۳]. سلولز به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگاری که در طبیعت یافت می‌شود، شناخته شده است. تخمین زده شده است که سالیانه مقدار ۱۰۱۲ × ۱/۵ تن سلولز در طبیعت تولید می‌شود. این رقم، عملاً سلولز را به‌عنوان یک منبع تقریباً تمام نشدنی مبتنی بر زیست‌توده تبدیل می‌کند [۱].

امروزه بازار جهانی محصولات جلبکی رونق قابل توجهی را تجربه می‌کند. بر طبق گزارشی که توسط (Fior Markets) منتشر شده است، پیش‌بینی‌ها حاکی از رشد این بازار از ۳/۲۰ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۷ به ۵/۳۸

این بررسی با هدف ارائه دیدگاهی جامع و به‌روز، پتانسیل ماکرو جلبک‌ها را به‌عنوان منابعی طبیعی و تجدیدپذیر از سلولز و مشتقات آن (مانند نانوسلولز) مورد کاوش قرار می‌دهد. همچنین، ضمن برجسته‌سازی اهمیت فزاینده این بیوپلیمرهای زیستی، به روش‌های اصلی و نوین استخراج آن‌ها از گونه‌های مختلف جلبکی (قهوه‌ای، سبز و قرمز)، با تأکید ویژه بر رویکردهای سبز و پایدار، پرداخته می‌شود. علاوه بر این، خواص منحصربه‌فرد سلولز استخراج شده و تأثیر عواملی نظیر نوع جلبک و روش‌های استخراج بر ویژگی‌های آن مورد بحث قرار خواهد گرفت و در نهایت، کاربردهای متنوع و رو به رشد این مواد در صنایع مختلف از جمله پزشکی، داروسازی، بسته‌بندی و سایر حوزه‌ها بررسی خواهد شد. رشد و استفاده از محصولات مبتنی بر نانو مواد یا مرتبط با آن‌ها، در سال‌های اخیر توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است. توجه به تحقیقات در خصوص نانو مواد، تحت تأثیر خواص منحصر به فردی است که می‌تواند با استفاده از مواد در این مقیاس پدیدار شود. این پیشرفت‌ها در بخش‌های با ارزش افزوده زیاد، مانند مواد زیست‌تخریب-

با افزایش تولید جلبک‌های دریایی برای پاسخ به تقاضای بازار در حال رشد، فرصت استفاده از آن‌ها به-عنوان مشتقات سلولزی افزایش یافته است. جلبک‌ها منابع مهمی از زیست‌توده هستند که در مقایسه با گیاهان خشکی، به‌ویژه در زمینه استفاده از بافت سلولزی آن‌ها، کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعه سنتز سلولز مبتنی بر جلبک‌های دریایی مدت‌هاست که آغاز شده است. برای اولین بار مطالعه در مورد استخراج سلولز از جلبک‌های دریایی سبز، در سال ۱۸۸۵ گزارش شد. متأسفانه علی‌رغم اثبات شدن قابلیت استفاده از سلولز جلبکی در طیف وسیعی از کاربردها مانند ذخیره انرژی، تصفیه آب و هوا، فیلتراسیون، مهندسی بافت، این عقب-ماندگی همچنان ادامه دارد [۵ و ۱۰]. جلبک‌ها به دلیل اینکه می‌توانند مواد مغذی را از جریان‌های پسماند (فاضلاب، گازهای گلخانه‌ای) دریافت کنند و در مقیاس وسیعی کشت شوند، به‌عنوان منابع تجدیدپذیر جایگزین، برای تولید سلولز و نانوکریستال سلولز به شمار می‌روند و در نهایت به محیط‌زیست نیز سود می‌رسانند [۶]. سایر مزایای استفاده از جلبک‌های دریایی برای تولید نانوسلولز عبارت‌اند از:

- ۱- سهولت استخراج سلولز به دلیل میزان پایین‌تر سایر پلی‌ساکاریدها که باعث ایجاد تداخل در فرآیند جداسازی سلولز هستند.
  - ۲- جلبک‌ها حاوی بازده نسبتاً بالایی از کربوهیدرات‌های ذخیره شده هستند.
  - ۳- رشد سریع جلبک‌ها، زمان برداشت آن‌ها را در مقایسه با منابع دیگر کاهش می‌دهد [۱۱].
- از طریق الگوهای پراش اشعه ایکس، مشخص شد که مونومرهای D-گلوکز سلولز جلبک‌ها مشابه سلولز یافت شده در گیاهان خشکی‌زی هستند. گونه و منشأ جلبک‌ها، تأثیر قابل توجهی بر ترکیب شیمیایی آن‌ها دارد. گزارش شده است که محتوای سلولز در دیواره سلولزی برخی از گونه‌های جلبک‌های سبز، در حدود ۷۰ درصد (بر اساس وزن خشک سلول) است. به‌طور کلی، دیواره سلولی جلبک‌ها دارای فاز میکروفیبریل (کریستالی) ساخته شده از مانان، زایلان یا سلولز است که توسط یک ماتریس فاز آمورف احاطه می‌شود. در مقایسه با گیاهان، در اکثر گونه‌های جلبکی که در مقالات علمی گزارش شده‌اند، سلولز با لیگنین همراه نیست و بنابراین، استخراج سلولز از

میلیارد دلار در سال ۲۰۲۵ می‌باشد. این ارقام به معنای افزایش نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR)، ۶/۷ درصد طی دوره‌ی پیش‌بینی از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ خواهد بود. این گسترش را می‌توان به افزایش تقاضا برای محصولات مبتنی بر جلبک، در صنایع مختلفی از جمله غذا، دارو، آرایشی و بهداشتی و کشاورزی نسبت داد [۴]. واژه «جلبک» به‌طور عام برای توصیف گروه وسیع و متنوعی از موجودات زنده (چندسلولی یا تک‌سلولی) به کار می‌رود. جلبک‌های دریایی موجودات مهمی برای زیستگاه‌های خود به شمار می‌روند و نقش آن‌ها در فناوری‌های سبز نیز مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. بهره‌برداری از آن‌ها در جوامع بشری به ۵۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در چین بازمی‌گردد و بعدها در سراسر جهان نیز رواج یافته و تا به امروز کاربرد دارند. اقیانوس‌ها با پوشش بیش از ۷۱ درصد از سطح زمین، زیستگاه اکثر موجودات دریایی از جمله گونه‌های مختلف جلبک‌های دریایی به شمار می‌روند. از نظر بوم‌شناسی، جلبک‌های دریایی پایه و اساس بیشتر زنجیره‌های غذایی آبی هستند و به‌عنوان فراوان-ترین منابع در اقیانوس‌ها شناخته شده‌اند. جلبک‌های دریایی حاوی منابع غنی از متابولیت‌های کاربردی از جمله پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها، پپتیدها، لیپیدها، اسیدهای آمینه، پلی‌فنول‌ها و نمک‌های معدنی هستند؛ بنابراین، از گونه‌های مختلف آن‌ها می‌توان در صنایع لبنی، آرایشی، دارویی و غذایی استفاده کرد [۵ و ۶]. جلبک‌ها معمولاً در آب‌های کم‌عمق زندگی می‌کنند و بر اساس اندازه به دو زیرگروه اصلی تقسیم می‌شوند: ماکرو-جلبک‌ها: به‌طور معمول به‌عنوان علف دریایی شناخته می‌شوند. میکرو جلبک‌ها: موجودات تک‌سلولی میکروسکوپی فتوسنتزی هستند [۵ و ۷]. ماکرو جلبک‌ها موجودات چندسلولی و شبیه گیاهان خشکی‌زی هستند، با این حال، به‌جای برگ، ساقه و ریشه، دارای تالوس یا همان بدنه برگ مانند هستند. سه زیرگروه اصلی ماکرو جلبک‌ها عبارت‌اند از: جلبک‌های قهوه‌ای (*Phaeophyceae*)، جلبک‌های قرمز (*Rhodophyceae*) و جلبک‌های سبز (*Chlorophyceae*). این طبقه‌بندی بر اساس رنگ تالوس آن‌هاست که به محتویات کلروفیل‌ها و رنگدانه‌های موجود در ارگانسیم‌های جلبک‌ها بستگی دارد [۴، ۶، ۸ و ۹].

جلبک‌ها به‌عنوان منابع سلولز و نانوسلولز

برداشت آن‌ها در تمام طول سال و هزینه کم، به‌عنوان یک منبع جایگزین، قابل اعتماد، تجدیدپذیر و پایدار سلولز شناخته می‌شوند [۶، ۱۴ و ۱۵]. جلبک‌ها با جذب CO<sub>2</sub> به کاهش گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوا کمک می‌کنند. مشتقات رایج جلبک دریایی، منابع تجدیدپذیر و پایدار برای غذا، سوخت و کاربردهای شیمیایی هستند. منابع جلبکی می‌توانند به‌درستی از تقاضای رو به رشد سلولز و نانو کریستال‌های سلولزی پشتیبانی کنند. بیشتر گونه‌های جلبک، CO<sub>2</sub> را از محیط، (چه در فاز گاز و چه در محلول)، جذب کرده و اکسیژن آزاد می‌کنند؛ بنابراین، آن‌ها را می‌توان عناصر مهمی در ایجاد تعادل CO<sub>2</sub> در محیط‌زیست به شمار آورد. همچنین به نظر می‌رسد که به دلیل فراوانی منابع دی‌اکسید کربن، هزینه پرورش جلبک به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. مواد مغذی مورد نیاز برای رشد گونه‌های جلبک را می‌توان از جریان‌های فاضلاب، زباله‌های حیوانی و پساب‌های صنعتی تأمین کرد. این یک ویژگی اقتصادی عالی است که در آن رشد جلبک با هزینه کم و تصفیه هم‌زمان فاضلاب انجام می‌شود. در این حالت، سلولز و نانو کریستال‌های سلولزی مورد نظر، از جریان‌های زباله‌ای تولید می‌شوند. جلبک را می‌توان در شرایط متنوعی پرورش داد و در مورد آب و خشکی مورد نیاز برای کشت جلبک محدودیتی وجود ندارد؛ بنابراین، زمین‌هایی که برای تولید محصول و گیاه مناسب نیستند، می‌توانند برای کشت جلبک مورد استفاده قرار گیرند. اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، حوضچه‌ها، جریان‌های فاضلاب همگی محیط‌های مناسبی برای تولید جلبک هستند که منجر به تولید جلبک در مقیاس وسیع و کم هزینه می‌شوند. سلولز سلول‌های جلبک معمولاً خالص است و ناخالصی‌های کمی دارد. این بدان معنی است که به‌جای روش‌های پیچیده و پرهزینه می‌توان از روش‌های آسان و اقتصادی‌تر، برای جداسازی سلولز استفاده کرد [۳، ۶ و ۱۲].

## مواد و روش‌ها

### فرآیند استخراج و خالص‌سازی سلولز و نانوسلولز از منابع جلبکی

از آنجایی که ساختار و خواص شیمیایی سلولز به دست آمده از جلبک‌ها مشابه سلولز گیاهی است، تکنیک‌های استخراج سلولز و نانو کریستال‌های سلولزی

جلبک‌ها نسبتاً کم هزینه و آسان‌تر است. اعتقاد بر این است که در جلبک‌های سبز، محتوای سلولز دیواره سلولی هم‌رتبه با چوب است [۶]. به‌عنوان مثال، در میان جلبک های سبز، گونه *Ulva lactuca* دارای ۵۴/۳ درصد کربوهیدرات است که برای تولید نانوسلولز مناسب تلقی می‌شود. میزان سلولز موجود در دیواره‌ی سلولی ماکرو-جلبک‌ها با توجه به گونه‌ی آن‌ها، متفاوت است. بر اساس مطالعه Baghel و همکاران (۲۰۲۱)، مجموعاً ۱۹ گونه ماکروجلبک سبز، حاوی ۱/۵ تا ۳۴ درصد سلولز بر حسب وزن خشک و با میانگین ۹/۶۷٪ درصد وجود دارد. در همین حال، میزان سلولز برای ۴۷ گونه ماکروجلبک قرمز، در حدود ۰/۸۵ تا ۱۸ درصد با میانگین ۴/۷۵ درصد و نیز میزان سلولز بر اساس مطالعه ۱۵ گونه ماکروجلبک قهوه‌ای و بر اساس وزن خشک از ۲/۲ تا ۱۰/۲ درصد با میانگین ۷/۸۸ درصد محاسبه شده است. همچنین گزارش شده است که میزان کل سلولز برای زیست‌توده‌های جلبکی در محدوده‌ی ۰/۸۵ تا ۳۴ درصد قرار دارد. این مقادیر با اطلاعات موجود در مورد دیواره سلولی جلبک‌ها مطابق با گروه آن‌ها همخوانی دارد [۳، ۵ و ۱۳]. تحقیقات نشان داده‌اند که سلولز به دست آمده از گونه‌های مختلف ماکروجلبک‌ها، شباهت‌هایی به سلولز پنبه دارد. این شباهت‌ها بر اساس سه ویژگی مختلف شناسایی شده است:

### تولید D-گلوکز از طریق هیدرولیز

وجود پیوند β-(1,4) از طریق تهیه سلوبیوز اکتااستات مقایسه تشابه بین پیک‌های پراش پرتو ایکس (XRD) سلولز جلبکی و سلولز پنبه [۵ و ۱۳].

### ملاحظات اقتصادی منابع سنتی در برابر جلبک-

#### ها به‌عنوان منبع سلولز میکروکریستالی

امروزه با توجه به پتانسیل روشن و آینده دار جلبک‌ها به‌عنوان منبعی برای توسعه و جداسازی نانوسلولز، زیست-توده دریایی در مقایسه با زیست‌توده لیگنوسلولزی منابع خشکی، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. جلبک‌ها، منابع مهمی از سلولز برای تولید نانو کریستال‌های سلولز با کیفیت بالا هستند. استفاده از جلبک به‌عنوان منبع نانوکریستال سلولز دارای مزایای مختلفی است [۴ و ۶]. جمعیت جلبک‌ها به دلیل سرعت رشد بالا می‌تواند در عرض چند ساعت افزایش یابد و همچنین به دلیل امکان

کوچک‌تر خود (۱۵-۲ نانومتر عرض، ۵۰۰-۱۰۰ نانومتر طول) نسبت به (CNF) (۵۰-۲۰ نانومتر عرض، ۱۵۰۰-۵۰۰ نانومتر طول) و همچنین کریستالیت‌ها بالاتر مشخص می‌شوند [۵، ۱۲، ۱۶ و ۱۷].

اگر در فرآیند استخراج، آلودگی یا ناخالصی‌های دیگری وجود داشته باشد، مرحله پیش‌تصفیه با شستشو ضروری است، اما این مرحله در بسیاری از مواقع غیر-ضروری است. پس از شستشو، برای کاهش اندازه زیست-توده و افزایش سطح تماس مواد اولیه و مواد شیمیایی، آسیاب کردن انجام می‌شود. بسته به گونه‌ی جلبک، در مراحل پیش‌تصفیه برخی تفاوت‌ها وجود دارد. گاهی اوقات برای حذف اجزای غیر سلولزی و آماده‌سازی مواد اولیه برای استخراج بهتر، نیاز به تیمار با محلول‌های قلیایی ملایم است. به‌عنوان مثال، نشان داده شده است که قلیایی‌سازی جلبک با محلول ۷٪ (NaOH) در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت، به‌طور قابل توجهی حلالیت آگار را افزایش داده و به حذف آن از تافله جلبک کمک می‌کند. در فرآیند استخراج سلولز بسیار خالص از جلبک، مرحله‌ی حذف رنگ یا سفید کردن، به دلیل وجود رنگدانه‌های طبیعی رنگی در گونه‌های مختلف جلبک، ضروری است. عوامل اصلی سفیدکننده مورد استفاده (NaClO<sub>2</sub>) و (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) هستند؛ با این حال، به دلیل نگرانی‌های محیط‌زیستی، پراکسید هیدروژن بر کلریت ترجیح داده می‌شود.

در بین روش‌های مختلف هیدرولیز، هیدرولیز اسیدی (AH)، به دلیل اثربخشی آن، معمولاً برای تجزیه سلولز و تبدیل سلولز به نانوکریستال سلولز (CNC) ترجیح داده می‌شود. در این فرآیند، شرایط اسیدی قوی، باعث شکسته شدن زنجیره پلیمری طولانی الیاف سلولز به قطعات ریزتر می‌شود. اسیدهای قوی مانند (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>، HCl و H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)، اغلب در طی این فرآیند به کار می‌روند. با کنترل دقیق شرایط هیدرولیز (مانند قدرت / غلظت اسید، مدت زمان، هم‌زدن و دما)، هیدرولیز انتخابی ماتریس آمورف زنجیره سلولزی صورت می‌گیرد و در عین حال مناطق بسیار کریستالی باقی می‌مانند [۶، ۱۸ و ۱۹].

تیمار میکروبی جهت استخراج نانوسلولز از جلبک‌ها در سال‌های اخیر، تقاضای رو به رشد برای نانوسلولز استخراج شده از جلبک، چوب و زیست‌توده گیاهان لیگنوسلولزی غیرچوبی، موجب اکتشاف روش‌های راحت‌تر

آن‌ها بسیار شبیه به هم هستند. ویژگی‌های نانو سلولزها نه‌تنها می‌توانند با شرایط فرآیند تغییر کنند، بلکه به منابع استخراج نیز بستگی دارند. به‌عنوان مثال، دمای واکنش، زمان و نوع اسید می‌توانند بلورینگی و مورفولوژی نانو کریستال‌های سلولزی تولیدی از جمله شکل آن‌ها را که میله‌ای، کروی و یا سوزنی باشد را تغییر دهند. این شکل‌ها یک عامل مهم در نانو سلولزها می‌باشند، زیرا مرتبط به پیوند هیدروژنی بین مولکولی/درون‌مولکولی و همچنین بلورینگی نانو سلولزها هستند [۱۲].

سلولز معمولاً از منابع مختلف جلبک توسط ترکیبی از سفید کردن، تیمارهای قلیایی و هیدرولیز اسیدی استخراج می‌شود. با این حال، نیاز به جستجوی راه‌های پایدارتر برای بهبود کارایی، زمان و هزینه‌های فرآیند، همراه با استفاده پایدار از منابع و مواد وجود دارد. استفاده از شیمی سبز در فرآیندهای استخراج، با هدف دستیابی به سرعت استخراج سریع‌تر، کاهش مراحل پردازش و کاهش استفاده از حلال‌های خطرناک که می‌توانند برای سلامتی انسان و محیط‌زیست سمی باشند، به رفع این نگرانی‌ها کمک خواهد کرد [۳، ۴ و ۶].

مراحل رایج جداسازی نانوسلولز از ماکروجلبک‌ها به شرح زیر است:

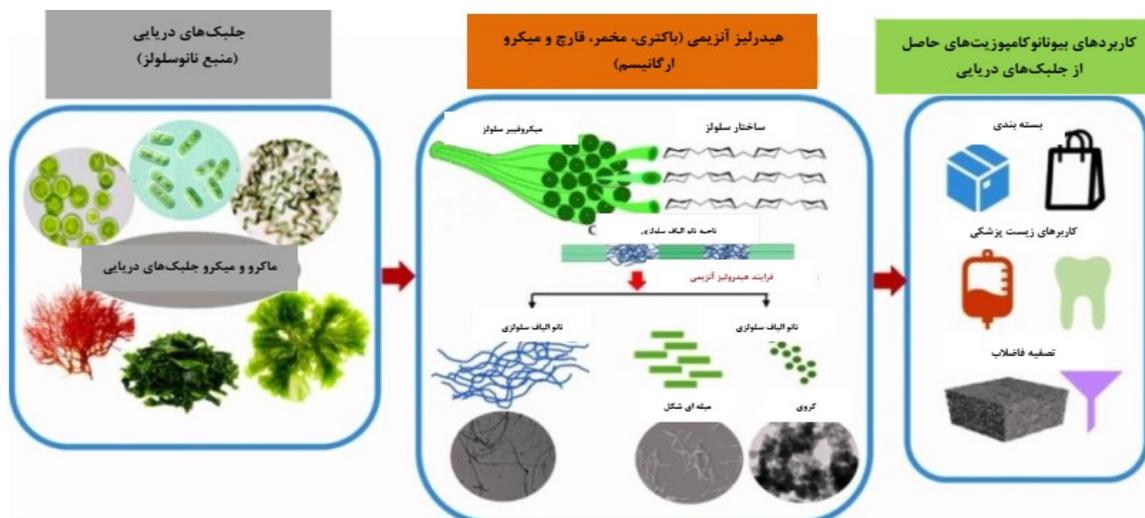
(۱) فرآیند جداسازی فیبرها: به‌عنوان مثال، تیمار قلیایی با استفاده از هیدروکسید سدیم (NaOH) که در آن بیشتر قسمت‌های همی سلولزها، به‌صورت جزئی حل می‌شوند و موم‌های باقیمانده، پکتین و چربی‌های طبیعی حذف می‌گردند. (۲) خالص‌سازی خمیر سلولزی از سایر ناخالصی‌ها، از جمله سفیدسازی اکسایشی شامل پراکسید هیدروژن (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) و کلریت سدیم (NaClO<sub>2</sub>).

(۳) آخرین مرحله که مهم‌ترین مرحله در تعیین انواع نانوسلولز تولید شده است، فرآیند تجزیه مکانیکی برای دیفیبریلاسیون کامل اجزای سلولز به فیبریل‌های منفرد به‌منظور تولید نانوسلولز فیبریله (CNF) می‌باشد. معمولاً عملیات مکانیکی از طریق یک آسیاب سوپر دیسکی، هموژنایزر یا میکروفلودایزر انجام می‌شود تا نظم ساختار سلولز را به هم بزند و (CNF) تولید کند که دارای نسبت ابعاد بسیار بالا و بلورینگی متوسط است. در حالی که نانوسلولز کریستالی (CNC)، از طریق هیدرولیز اسیدی با استفاده از اسیدهای معدنی قوی مانند اسیدکلریدریک و اسیدسولفوریک تولید می‌گردد. معمولاً CNC با اندازه

و غیره، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، قابل انجام است. این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند انواع مختلفی از آنزیم‌ها را تولید کنند که می‌توان آن‌ها را برای فرایند هیدرولیز برای تولید نانوسلولز به کار گرفت. با این-حال، فرایند هیدرولیز ممکن است با توجه به میکروارگانیسم مورد استفاده متفاوت باشد. بر اساس مطالعات، این روش می‌تواند جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای برای تجزیه شیمیایی ارائه دهد، زیرا با فرآیندهای بیولوژیکی سازگار بوده و همچنین می‌تواند، بازده نانو ساختار را افزایش داده و پایداری حرارتی آن را بهبود بخشد. تیمار میکروبی از طریق هیدرولیز آنزیمی، از آنزیمی به نام سلولاز استفاده می‌کند. آنزیم سلولاز، توسط میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها، مخمرها و قارچ‌ها تولید می‌شود و به این ترتیب، می‌توان با کاهش هزینه‌های عملیاتی تولید را افزایش داد [۲۴].

در این زمینه شده است. تولید نانوسلولز، به‌ویژه از طریق روش‌های مکانیکی و شیمیایی، نیاز به فیبریلاسیون مکانیکی و واکنش‌های شیمیایی شدید دارد که باعث آلودگی‌های محیط‌زیستی خواهند شد. فرآیند استخراج میکروبی از طریق هیدرولیز آنزیمی دارای مزایایی همچون زمان استخراج کوتاه‌تر و انرژی کم و کاربرد کمتر حلال‌های شیمیایی است، بنابراین به‌عنوان یک "روش سبز" در نظر گرفته می‌شود [۲۰، ۲۱ و ۲۲]. فناوری‌های آنزیمی جدید قادرند مشکلات زیست‌محیطی را کاهش داده و ویژگی‌های الیاف را بهبود بخشند. تمامی آنزیم‌ها زیست تخریب‌پذیر بوده و توسط تخمیر مواد طبیعی به وجود می‌آیند و اغلب در صنعت به‌عنوان کاتالیزگرهای طبیعی محسوب می‌شوند [۲۳].

هیدرولیز آنزیمی به‌طور کلی با استفاده از میکرو-ارگانیسم‌های مختلف، از جمله باکتری‌ها، مخمرها، قارچ‌ها



شکل ۱- استخراج نانوسلولز میکروبی از منابع جلبکی، از طریق هیدرولیز آنزیمی (تجزیه با استفاده از میکروارگانیسم‌های مختلف)، [۵].

### ویژگی‌های نانوسلولز حاصل از جلبک‌ها

در دهه‌های اخیر، مطالعات منتشر شده در مورد تهیه نانوسلولز از زیست‌توده ماکرو جلبک‌ها یا علف‌های دریایی از طریق روش‌های مختلف افزایش یافته است. ویژگی‌های نانوسلولز می‌تواند بسته به روشی که در طول فرآیند استخراج و جداسازی استفاده می‌شود، متفاوت باشد. منابع سلولزی مختلف نیز، مسئول تعیین خواص محصول نانوسلولز هستند؛ بنابراین، پیش‌بینی و پیشنهاد بهترین شرایط برای تولید نانوسلولز چالش‌برانگیز است. به همین

دلیل، مطالعات زیادی برای مقایسه خواص نانوسلولز حاصل از انواع مختلف منابع سلولزی و بین گروه‌ها و گونه‌های مختلف ماکرو جلبک‌ها انجام شده است. نانوسلولز طیف گسترده‌ای از خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مفید را ارائه می‌دهد. ویژگی‌های برجسته نانوسلولز از طریق مطالعات فیزیکوشیمیایی نانوسلولز، به‌طور گسترده گزارش شده است که می‌توان از بین آن‌ها مقیاس نانو، غیرسمی بودن، سطح ویژه بالا، نسبت ابعاد و استحکام بالا، تبلور، ویژگی‌های مکانیکی و مورفولوژیکی جالب و

پایداری حرارتی مناسب را برشمرد. این ویژگی‌ها، فرصت‌های جدیدی برای توسعه نانوسلولز، به‌ویژه از زیست‌توده‌ی جلبکی، ایجاد می‌کنند [۱۳، ۲۵ و ۲۶]. تا به امروز، مطالعات گسترده‌ای در مورد تهیه نانوسلولز از الیاف مختلف لیگنوسلولزی از جمله پنبه، کتان، رامی و الیاف چوب انجام شده است. این نانو سلولزها معمولاً به-عنوان مرجعی برای مقایسه با نانوسلولز به دست آمده از ماکروجلبک‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

### روش‌های استخراج و سنتز نانوسلولز جلبکی

Plianwong و Sirirak (۲۰۲۴)، به بررسی روش‌های مختلف استخراج نانوکریستال سلولز (CNC) از جلبک سبز (*Cladophora glomerata*)، با استفاده از روش‌های گرمایش معمولی و مایکروویو (MAE) پرداختند. هدف آن‌ها از این مطالعه، یافتن روشی سریع‌تر و کارآمدتر برای تولید (CNC) با حفظ خواص ساختاری و عملکردی آن بود. در این تحقیق، از دو روش برای استخراج (CNC) از کلادوفورا گلومراتا استفاده شد. روش گرمایش معمولی که این روش، شامل مراحل سفید کردن با (NaClO<sub>2</sub>)، تیمار قلیایی و هیدرولیز اسیدی با استفاده از (HCl) یا (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) است و روش مایکروویو (MAE) که این روش شامل مراحل سفید کردن با حلال آلی یا هیدروژن پراکسید (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) و سپس تیمار قلیایی و هیدرولیز اسیدی با استفاده از (HCl) است. نتایج نشان داد که روش (MAE) در مقایسه با روش گرمایش معمولی، زمان استخراج (CNC) را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. نانو سلولزهای استخراج شده با روش (MAE) دارای خواص ساختاری و عملکردی مشابه نانو سلولزهای استخراج شده با روش گرمایش معمولی بودند. همچنین این تحقیق نشان داد که روش ماکروویو (MAE)، روشی امیدوارکننده برای تولید سریع و کارآمد نانوسلولز با حفظ خواص مطلوب آن است. نانو سلولزهای جلبکی استخراج شده با روش (MAE) می‌توانند در کاربردهای مختلفی از جمله پزشکی، دارویی و ترمیم بافت مورد استفاده قرار گیرند [۲۷].

Yousif و همکاران (۲۰۲۴)، در تحقیقی، بر روی توسعه و ارزیابی غشاهای کامپوزیتی نانو سلولزی ساخته شده از ماکروجلبک آب شیرین (*Chara corallina*)، برای حذف یون‌های فلزات سنگین از آب پرداختند. در این مطالعه، نانوسلولز از این جلبک با استفاده از روش‌های شیمیایی از جمله تیمار قلیایی، سفیدسازی، آسیاب کردن و هیدرولیز اسیدی استخراج شد (شکل ۲). شاخص کریستالیتی پراش اشعه ایکس (XRD) نانوسلولز، ۰/۸۵/۶۴٪ به دست آمد. نانو سلولزها به شکل نانو میله دیده شده و سطح ویژه نمونه (CNC) تولید شده، ۵/۸۲۳ مترمربع بر گرم اندازه‌گیری شد. سپس، غشاهای کامپوزیتی نانو سلولزی، با استفاده از چندین لایه از نانوسلولز ساخته شدند. کارایی این غشاها در حذف یون‌های کادمیوم، نیکل و سرب از محلول‌های آبی با استفاده از روش فیلتراسیون خلأ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غشاهای کامپوزیتی نانو سلولزی ساخته شده از جلبک (*Chara corallina*)، توانایی بالایی در حذف یون‌های فلزات سنگین دارند. با افزایش تعداد لایه‌های غشا، بازده حذف نیز افزایش یافت. بیشترین بازده حذف برای یون‌های کادمیوم، نیکل و سرب به ترتیب ۹۸/۲۰٪، ۹۵/۱۵٪ و ۹۳/۸۰٪ بود که با استفاده از پنج لایه غشا و دوز جذب (۲۰ ppm) به دست آمد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که غشاء حاصل از نانوسلولز مشتق شده از جلبک (*Chara corallina*)، می‌تواند به‌عنوان یک جاذب کارآمد و زیست سازگار برای حذف یون‌های فلزات سنگین از آب مورد استفاده قرار گیرد. این غشاهای کامپوزیتی دارای مزایای متعددی از جمله: بازده حذف بالا، هزینه پایین، زیست‌تخریب‌پذیری و قابلیت اصلاح سطح هستند؛ بنابراین، استفاده از این غشاها می‌تواند به‌عنوان یک روش پایدار و مؤثر برای تصفیه آب‌های آلوده به فلزات سنگین، پیشنهاد شود. این پژوهش گامی مهم در جهت توسعه فناوری‌های پایدار برای تصفیه آب و کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی ناشی از فلزات سنگین است [۲۸].

### نانوسلولز جلبکی در کاربردهای تصفیه آب و

#### محیط‌زیست

موجود در ساختار دیواره سلولی این جلبکها مرتبط باشد. به طور کلی، فرآیند تولید شامل استخراج متوالی ترکیبات غیر سلولزی، یک فرآیند سفیدسازی سازگار با محیطزیست با پراکسید هیدروژن و تشکیل ذرات میله‌ای نانومتری با استفاده از فرآیند هیدرولیز اسیدی بود. نانوسلولزهای حاصل، با استفاده از تکنیک‌های مختلف از-



شکل ۲- تهیه غشای بر پایه‌ی نانوسلولز جلبک (Chara corallina) به همراه پلیمرها [۲۸].

جمله طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، پراش اشعه ایکس (XRD)، آنالیز وزن‌سنجی گرمایی (TGA، DTG)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش لیزری و جذب نیتروژن در دمای پایین بررسی شدند. نتایج نشان داد، نانو کریستال‌های سلولزی جلبکی به دست آمده، دارای بازده ۹۱ - ۷۶٪، درجه پلیمریزاسیون ۲۳۰ - ۱۵۰ واحد و شاخص بلورینگی ۸۰ - ۶۹٪ بودند. همچنین مشخص شد که انتخاب اسید در طول تولید به-طور قابل توجهی بر پایداری حرارتی، توزیع اندازه ذرات و تخلخل نمونه‌ها تأثیرگذار می‌باشد. به‌طور قابل توجهی، نانو سلولزهای جلبکی به دست آمده، در شکل محلول‌های ژل‌مانند، پایداری قوی در طول ذخیره‌سازی طولانی مدت نیز نشان دادند. در نهایت مشخص شد که این مواد پتانسیل امیدوارکننده‌ای برای کاربردها در زیست پزشکی، به‌عنوان اجزای متنوع برای هیدروژل‌ها، ماتریس‌ها و پرکننده‌ها در توسعه باندپیچی‌های پزشکی پیشرفته نشان می‌دهند [۲۹].

### پتانسیل نانوسلولز جلبکی در کاربردهای

#### زیست‌پزشکی و دارویی

Bogolitsyn و همکاران (۲۰۲۴)، در پژوهشی، نانو-کریستال سلولز را از دو گونه جلبک قهوه‌ای، (*Laminaria digitata*) و (*Saccharina latissima*) استخراج نمودند (شکل ۳). هدف اصلی این مطالعه، بررسی پتانسیل این جلبک‌ها به‌عنوان منبعی جدید و پایدار برای تولید نانو-سلولز و همچنین مقایسه خواص نانوسلولز استخراج شده از این دو گونه جلبک بوده است. نانوسلولز استخراج شده از این جلبک‌ها به‌صورت نانو میله‌هایی با ابعاد نانومتری و کریستالیت‌ها بالا و سطح ویژه قابل توجهی بودند. همچنین، آنالیز (FTIR) نشان داد که ساختار کریستالی نانوسلولز استخراج شده از این دو گونه جلبک، مشابه با سلولز گیاهان خشکی‌زی می‌باشد. با این حال، تفاوت‌های جزئی در خواص فیزیکی و شیمیایی نانوسلولز استخراج شده از این دو گونه مشاهده شده است که می‌تواند به تفاوت‌های



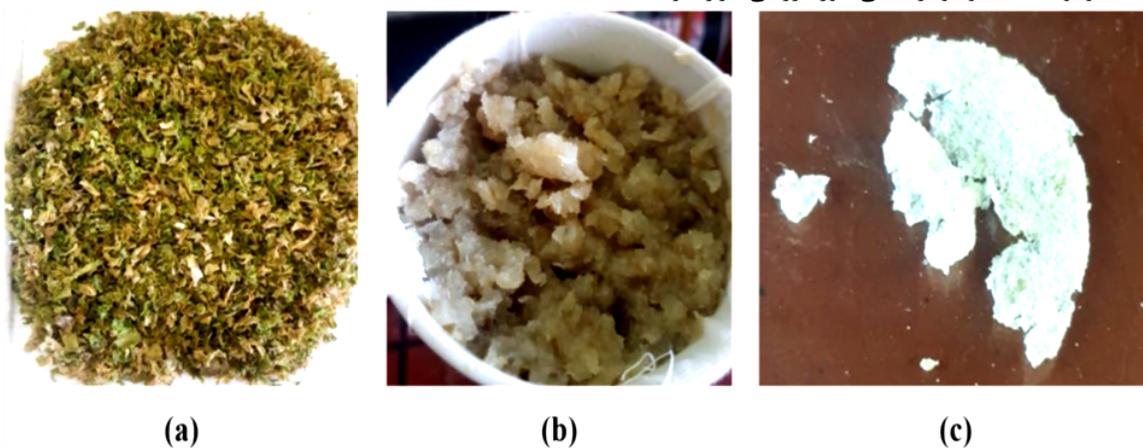
شکل ۳- نمونه‌هایی از جلبک قهوه‌ای، جلبک رنگ‌بری نشده، سلولز جلبکی و نانوکریستال سلولز (CNC). [۲۹].

سلولز از جلبک (*Ulva lactuca*) استخراج شد. فرآیند استخراج شامل مراحل متوالی برای به دست آوردن یک بخش غیرمحلول غنی از سلولز بود. سلولز استخراج شده با

El-Sheekh و همکاران (۲۰۲۳)، به مطالعه‌ی سنتز نانوسلولز با استفاده از زیست‌توده جلبک سبز (*Ulva lactuca*)، پرداختند (شکل ۴). در این پژوهش، در ابتدا

نتایج مهار رشد باکتریایی به ترتیب برای این باکتری‌ها ۴/۰۶، ۴/۶۶، ۴/۹۳ و ۴/۴۳ سانتی‌متر به دست آمد. در این پژوهش، اثر ضد باکتریایی نانوکریستال سلولز با برخی آنتی‌بیوتیک‌ها مقایسه شد و حداقل غلظت مهارکنندگی (MIC) نانوکریستال سلولز برآورد گردید. علاوه بر باکتری‌ها، تأثیر سلولز و نانوکریستال سلولز بر برخی قارچ‌ها مانند آسپرژیلوس فلاووس، کاندیدا آلبیکانس و کاندیدا تروپیکالیس نیز بررسی شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان دادند که نانوکریستال سلولز می‌تواند راه‌حلی عالی برای مقابله با این چالش‌ها باشد. بر همین اساس، نانو-سلولز استخراج شده از جلبک‌ها می‌تواند به‌عنوان یک ماده پزشکی بسیار مهم با قابلیت تطابق با توسعه پایدار مطرح شود [۳۰].

سلولز مرجع مقایسه شده و نتایج مشابهی، به‌ویژه در آنالیز طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیلی فوریه (FTIR) و پراش پرتو ایکس (XRD)، به دست آمد. نانوکریستال سلولز نیز از سلولز استخراج شده با استفاده از هیدرولیز اسیدسولفوریک سنتز شد. برای بررسی مورفولوژی (شکل ظاهری) نانوکریستال سلولز از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. همچنین برای آنالیز ترکیب شیمیایی از پراکنده‌سازی انرژی پرتو ایکس (EDX) بهره گرفته شد. اندازه نانوکریستال سلولز بر اساس آنالیز (XRD) در حدود ۵۰ نانومتر تخمین زده شد. خاصیت ضد باکتریایی نانوکریستال سلولز در برابر باکتری‌های گرم مثبت مانند استافیلوکوکوس اورئوس، کلبسیلا پنومونیه و باکتری‌های گرم منفی مانند اشریشیاکلی و استافیلوکوک‌های کواگولاز منفی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۴- (a) *Ulva lactuca*، (b) سلولز به‌عنوان بخش نامحلول، (c) سلولز خشک [۳۰].

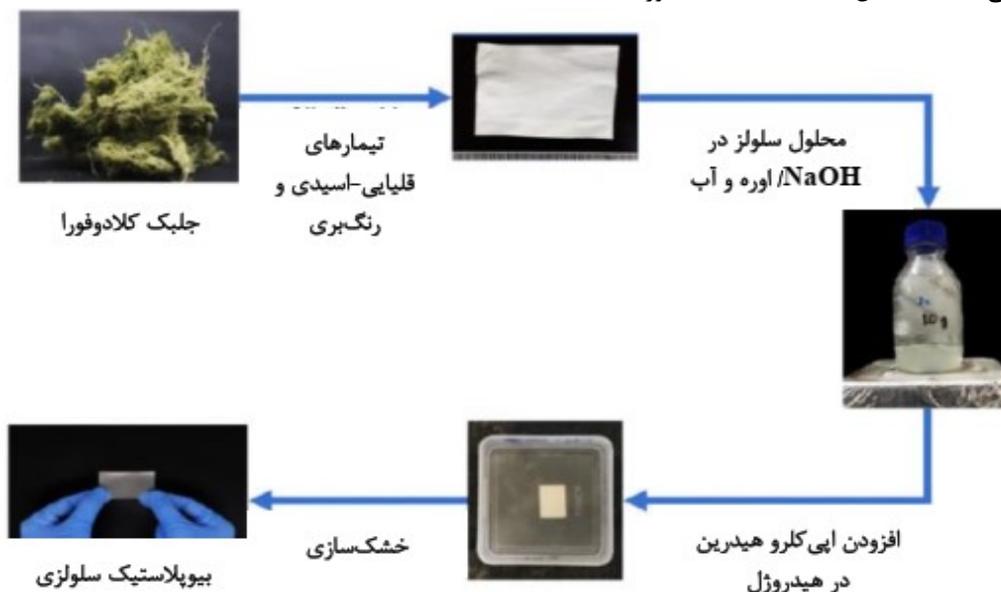
برای تهیه زیست پلاستیک سلولزی ۱۰٪ بود، زیرا زیست‌تخریب‌پذیری خوبی را بیش از ۴۰٪ در عرض پنج روز و کمترین حلالیت در آب را نشان داد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که زیست پلاستیک سلولزی دارای خواص حرارتی و مکانیکی بسیار خوبی نیز بود. خواص مکانیکی زیست پلاستیک سلولزی با پلاستیک‌های تجاری مورد استفاده قابل مقایسه بود، (استحکام کششی ۹/۳۳ مگاپاسکال، کشیدگی ۳۸/۷۳ درصد؛ و مدول الاستیک ۱۰۷/۷۶ مگاپاسکال). از موارد قابل اشاره و مهم این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: ۱- در این تحقیق، سلولز به‌عنوان جزء اصلی برای تولید زیست پلاستیک استفاده شد، در حالی‌که در دیگر مطالعات، عمدتاً از سلولز اصلاح شده یا از سلولز، به‌عنوان پرکننده

#### نانوسلولز جلبکی در توسعه بیوپلاستیک‌ها و فیلم‌های بسته‌بندی

Steven و همکارانش (۲۰۲۲)، در تحقیقی، سلولز را از جلبک (*Cladophora* sp)، مطابق شکل ۵، با بازدهی  $\pm 2.8\%$  و خلوص  $\pm 97\%$  استخراج نمودند. سپس، سلولز استخراج شده از طریق روش هیدرو ژل برای تهیه ماده بیوپلاستیک سلولزی استفاده شد. این مطالعه تأثیر غلظت‌های مختلف (ECH) را بر زیست‌تخریب‌پذیری، خواص حرارتی و مکانیکی زیست پلاستیک سلولزی بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهند که غلظت‌های مختلف (ECH)، به دلیل تعداد پیوندهای عرضی تشکیل شده، بر خواص زیست پلاستیک سلولزی تأثیر می‌گذارند و طبق نتیجه به دست آمده، غلظت بهینه (ECH) مورد استفاده

بیشتر، سلولز یک ماده امیدوارکننده، به‌عنوان جزء اصلی برای تولید زیست پلاستیک با عملکردهای خوب است [۳۱].

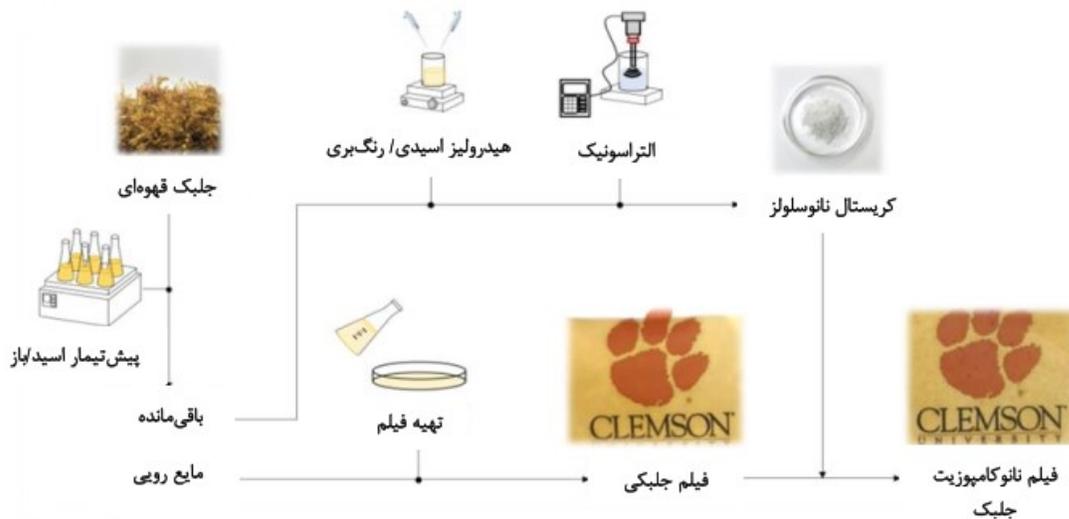
قبل از تولید زیست پلاستیک استفاده شده است. ۲- منبع سلولز از ضایعات زیست‌توده جلبک به دست آمد که برای محیط‌زیست مضر است، بنابراین، به رفع مشکل فعلی کمک می‌کند. ۳- نشان داده شد که به‌منظور مطالعات



شکل ۵- طرح آماده‌سازی بیوپلاستیک‌های سلولزی از (*Cladophora sp.*)، [۳۱].

هیدروژنی افزایش یافته است و همچنین نتایج (XRD)، افزایش بلورینگی پس از افزودن (CNCs) را تأیید نمود. نتایج نشان داد که افزودن (CNCs) به فیلم، منجر به بهبود خواص فیزیکی مانند ضخامت، رطوبت و حلالیت در آب و خواص مکانیکی می‌شود. به‌طور مشابه، خواص ممانعتی در برابر آب، اکسیژن و نور نیز تقویت شدند. همچنین مشخص شد که (CNCs)، خواص حرارتی را در آزمایش‌های (TGA) و (CNCs) بهبود می‌بخشد. محتوای کل فنولیک، اثر حذف رادیکال (DPPH)، نشان داد که فیلم کامبو خواص آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به فیلم سارگاسوم نشان می‌دهد و این امر ارتباطی با افزودن (CNCs) ندارد. در نهایت، نتایج این مطالعه مشخص نمود که فیلم‌های زیست پلیمر نانو کامپوزیت جلبکی حاصل از جلبک‌های قهوه‌ای می‌توانند برای کاربردهای بسته‌بندی مانند فیلم‌های غذایی مورد استفاده برای نگهداری بیشتر، توسعه یابند [۳۲].

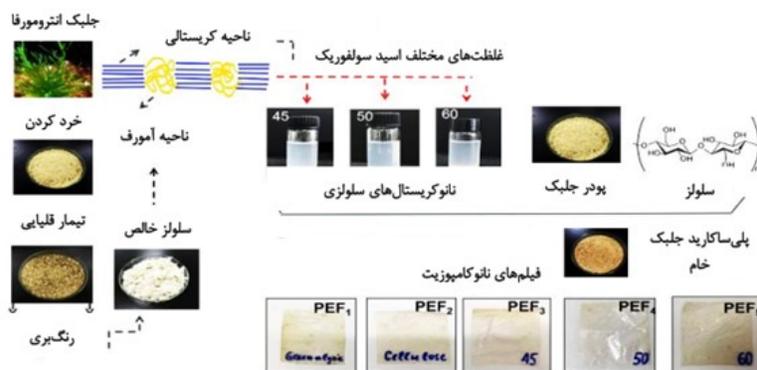
در تحقیقی Doh و همکاران (۲۰۲۰)، فیلم نانو کامپوزیت جلبکی با استفاده از جلبک‌های قهوه‌ای، کامبو (*Laminaria japonica*) سارگاسوم (*Sargassum natans*) تولید نمودند (شکل ۶). در این مطالعه، با استفاده از محلول رویی به‌دست‌آمده پس از پیش تیمار اسیدی - قلیایی، محلول تشکیل‌دهنده فیلم تهیه شد و فیلم زیست پلیمر جلبکی با استفاده از روش ریخته‌گری - تبخیر تشکیل شد. علاوه بر این، نانوسلولز کریستالی (CNCs) از باقی‌مانده‌های فرآیند فرمولاسیون فیلم جدا شد و به فیلم زیست پلیمر جلبکی اضافه شد. خواص فیزیکوشیمیایی فیلم نانو کامپوزیت، برای تعیین قابلیت آن به‌عنوان بستر بسته‌بندی بررسی شد. فیلم کامبو به رنگ قهوه‌ای تیره و فیلم سارگاسوم به رنگ قهوه‌ای روشن قابل مشاهده بود. افزودن (CNCs) تأثیری بر رنگ فیلم‌ها نداشت. مشاهده مورفولوژیکی نشان داد که افزودن (CNCs)، می‌تواند فضای خالی از جمله سوراخ‌ها و ترک‌ها را پر کند. با استفاده از طیف‌های (FTIR) مشخص شد که پیوند



شکل ۶- طرح تهیه فیلم نانو کامپوزیت جلجکی با استفاده از جلبک‌های قهوه‌ای، کامبو (*Laminaria japonica*) و سارگاسوم (*Sargassum natans*)، [۳۲].

تبدیلی فوریه (FTIR)، پراش پرتو ایکس (XRD)، تحلیل وزن‌سنجی گرمایی استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص تبلور و اندازه بلورهای نانو ذرات سلولزی به‌طور عمده به غلظت اسید وابسته است. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نشان داد که نانو ذرات سلولزی به دست آمده با هیدرولیز اسید ۶۰٪ (CNC60)، دارای ساختار سوزنی شکل به طول  $12 \pm 177$  نانومتر و عرض  $1 \pm 3$  نانومتر بودند. این نتایج نشان می‌دهد که نانو ذرات (CNC60)، نسبت ابعاد بالایی دارند و می‌توانند به‌عنوان پرکننده و تقویت‌کننده در ساخت مواد کامپوزیت به کار روند. همچنین تحقیقات تکمیلی نشان داد که افزودن نانو ذرات (CNC60)، به فیلم‌های نانو کامپوزیت ساخته شده از پلی‌ساکاریدهای محلول در آب استخراج شده از این جلبک، بهترین اثر را در بهبود خواص مکانیکی این فیلم‌ها داشته است؛ بنابراین، این مطالعه استراتژی جدیدی را برای استفاده کامل از زیست‌توده (*Enteromorpha prolifera*) برای تولید فیلم‌های با استحکام بالا ارائه می‌دهد. این فیلم‌ها پتانسیل بالایی برای کاربرد در بسته‌بندی مواد غذایی، دارویی و زیست پزشکی دارند [۳۳].

Kazharska و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی روشی نوآورانه برای بهره‌برداری کامل از جلبک سبز (*Enteromorpha prolifera*) که به‌طور معمول به‌عنوان جلبک سبز شکوفه‌زا شناخته می‌شود و تبدیل آن به محصولات جدید با ارزش افزوده پرداختند. هدف اصلی این تحقیق، تولید نانو کریستال‌های سلولز (CNC)، از جلبک دریایی (*Enteromorpha prolifera*) و استفاده از آن‌ها برای تولید فیلم‌های زیست نانو کامپوزیتی و بهبود خواص مکانیکی و ممانعتی فیلم‌های پلیمری با استفاده از نانو کریستال‌های سلولز جلبک به‌عنوان تقویت‌کننده بود. در این مطالعه، ابتدا نانو کریستال‌های سلولز از سلولز استخراج شده از زیست‌توده جلبک دریایی تهیه شده و سپس با پلی‌ساکاریدهای محلول در آب (PE) که از همین جلبک استخراج شده‌اند، ترکیب شدند تا فیلم‌های زیست نانو کامپوزیتی تولید شوند (شکل ۷). برای خالص‌سازی سلولز، ابتدا از تیمارهای قلیایی (NaOH) و سفیدکنندگی ( $H_2O_2$ ) استفاده گردید. سپس، نانو ذرات سلولزی با هیدرولیز اسیدی ( $H_2SO_4$ )، با غلظت‌های مختلف جدا شدند. برای بررسی تغییرات ساختاری و درجه تبلور نانو ذرات سلولزی، از روش‌های طیف‌سنجی مادون‌قرمز



شکل ۷ - تصویر کلی برای تهیه سلولز، نانوسلولز و فیلم‌های بیونانو کامپوزیت با استفاده از زیست توده (*Enteromorpha prolifera*)، [۳۳].

درصد بسته به زمان هیدرولیز (۳۰، ۴۰ و ۸۰ دقیقه) با موفقیت جدا شدند. (CNC) استخراج شده به عنوان نانو مواد پرکننده برای تولید فیلم‌های نانو کامپوزیت بر پایه پلی‌وینیل‌الکل (PVA) با خواص حرارتی و کششی بهبود یافته و شفافیت نوری استفاده شد. نشان داده شد که افزودن ۸ درصد وزنی (CNC) به ماتریس (PVA)، مدول ینگ را ۲۱۵ درصد، استحکام کششی را ۱۵۰ درصد و چقرمگی را ۴۵ درصد افزایش می‌دهد. علاوه بر این، فیلم‌های نانو کامپوزیت همان سطح شفافیت فیلم (PVA) خالص (انتقال حدود ۹۰ درصد در ناحیه مرئی) را حفظ کردند که نشان می‌دهد (CNC) در مقیاس نانومتری پراکنده شده‌اند [۳۴].

El Achaby و همکاران (۲۰۱۸)، در تحقیقی به بررسی استفاده از ضایعات جلجک قرمز به عنوان ماده اولیه برای تولید نانوسلولز کریستالی (CNC) با کیفیت بالا برای تقویت پلیمرها پرداختند (شکل ۸). ضایعات جلجک قرمز با روش‌های قلیایی، سفیدسازی و هیدرولیز اسیدی تیمار شیمیایی شدند تا میکرو فیبرهای سلولز خالص و (CNC) به دست آید. ضایعات خام و مواد سلولزی استخراج شده به طور متوالی در مراحل مختلف تیمار با استفاده از چندین تکنیک آنالیز شدند. (CNC) با شکل سوزنی در مقیاس نانومتری به ترتیب با قطر و طول در محدوده  $2/5 \pm 3/1$  تا  $9/1 \pm 3/1$  نانومتر و  $285/4 \pm 36/5$  تا  $30/3 \pm 315/7$  نانومتر و شاخص بلورینگی در محدوده ۸۱ تا ۸۷



شکل ۸ - مراحل کلی استخراج (CNC) در زمان‌های مختلف هیدرولیز و تصاویر دیجیتال محصولات حاصل [۳۴].

استخراج نمودند. هدف اصلی در این تحقیق، استفاده از نانوسلولز تهیه شده از ماکروجلبک کلادوفورا، جهت بهبود خواص مکانیکی و مقاومتی خمیر (CMP)، به عنوان

نقش نانوسلولز جلجکی در بهبود خواص خمیر و کاغذ Asadi و همکاران (۲۰۱۶)، در تحقیقی، سلولز و نانو-سلولز را از ماکروجلبک سبز رشته‌ای (*Cladophora*)

(SEM) استفاده شد. نتایج نشان داد که اندازه ذرات، حداقل در یکی از ابعاد در محدوده اندازه نانو می‌باشد. همچنین مشخص شد که تیمار ۸ درصد، دارای بیشترین دانسیته، مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدن، مقاومت به عبور هوا و ماتی و تیمار شاهد کمترین مقدار را داشته است. بیشترین مقاومت به پاره شدن، زبری سطح، درجه روشنی و زردی مربوط به تیمار شاهد بوده در حالی که کمترین آن‌ها مربوط به تیمار ۸ درصد بوده است [۳۵]. به منظور ارائه یک دیدگاه جامع و مقایسه‌ای از نانو سلولزهای استخراج شده از گونه‌های مختلف جلبک، جدول ۱ به خلاصه‌ای از ویژگی‌ها و کاربردهای اصلی این نانو مواد می‌پردازد.

تقویت‌کننده و پرکننده بود. جهت تهیه سلولز خالص، نمونه‌های جلبک مذکور، ابتدا تحت تأثیر فرآیند سودا و سپس تحت تأثیر توالی رنگ‌بری قرار گرفتند. سپس سلولز حاصله با روش التراسونیک به نانوسلولز تبدیل شد. نانوسلولز جلبک کلادوفورا در نسبت‌های ۲، ۵ و ۸ درصد با خمیر (CMP) حاصل از چوب پهن برگان مور اختلاط قرار گرفت. در نهایت کاغذ دست‌ساز تهیه و ویژگی‌های مقاومتی آن با خمیر خالص (CMP) حاصل از چوب پهن برگان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. درصد آلفا سلولز خمیر به دست آمده از تیمار قلیایی و رنگ‌بری جلبک کلادوفورا به مقدار ۹۴ درصد اندازه‌گیری شد. برای بررسی شکل ظاهری نانوسلولز از میکروسکوپ الکترونی روبشی

جدول ۱- مقایسه نانو سلولزهای حاصل از ماکرو جلبک‌های مختلف: ویژگی‌ها و کاربردها

منبع	کاربردهای اصلی	روش‌های استخراج	نوع نانوسلولز	گونه جلبک	نوع جلبک
[۲۷]	پزشکی، دارویی، ترمیم بافت	گرمایش معمولی، میکروویو (MAE)	CNC	Cladophora glomerata	جلبک سبز
[۲۸]	حذف فلزات سنگین (Cd, Ni, Pb) از آب	شیمیایی (قلیایی)، سفیدسازی، آسیاب، هیدرولیز اسیدی	CNC	Chara corallina	جلبک سبز
[۳۰]	پزشکی (ماده ضد باکتری)	هیدرولیز اسیدسولفوریک	CNC	Ulva lactuca	جلبک سبز
[۳۱]	بیوپلاستیک، بسته‌بندی	هیدرو ژل	سلولز، بیوپلاستیک سلولزی	Cladophora sp	جلبک سبز
[۳۳]	فیلم‌های نانو کامپوزیتی با استحکام بالا (بسته‌بندی غذا، دارو، زیست پزشکی)	قلیایی، سفیدسازی، هیدرولیز اسیدی (با غلظت‌های مختلف)	CNC	Enteromorpha prolifera	جلبک سبز
[۳۵]	بهبود خواص مکانیکی خمیر کاغذ (CMP)	قلیایی، رنگ‌بری، التراسونیک	CNC	Cladophora	جلبک سبز
[۲۹]	زیست پزشکی (هیدروآئروژل، بانداژ پیشرفته)	استخراج متوالی، سفیدسازی با پراکسید هیدروژن، هیدرولیز اسیدی	CNC	Laminaria digitata, Saccharina latissima	جلبک قهوه‌ای
[۳۲]	فیلم‌های نانو کامپوزیتی بسته‌بندی	پیش تیمار اسیدی-قلیایی (غذایی)	CNC	Laminaria japonica, Sargassum natans	جلبک قهوه‌ای
[۳۴]	تقویت پلیمرها (PVA) بهبود خواص حرارتی و کششی، حفظ شفافیت نوری	قلیایی، سفیدسازی، هیدرولیز اسیدی (با زمان‌های مختلف)	CNC	ضایعات جلبک قرمز	جلبک قرمز

Tropical Forestry and Forest Product (INTROP), Universiti Putra Malaysia: Serdang, Malaysia, pp. 1-9.

- [5]. Zaki, M., HPS, A.K., Sabaruddin, F.A., Bairwan, R.D., Oyekanmi, A.A., Alfatah, T., Danish, M., Mistar, E.M. and Abdullah, C.K., 2021. Microbial treatment for nanocellulose extraction from marine algae and its applications as sustainable functional material. *Bioresource Technology Reports*, 16, p.100811.
- [6]. Samice, S., Ahmadzadeh, H., Hosseini, M. and Lyon, S., 2019. Algae as a source of microcrystalline cellulose. In *Advanced bioprocessing for alternative fuels, biobased chemicals, and bioproducts* (pp. 331-350). Woodhead Publishing.
- [7]. Aliyu, A., Lee, J.G.M. and Harvey, A.P., 2021. Microalgae for biofuels via thermochemical conversion processes: A review of cultivation, harvesting and drying processes, and the associated opportunities for integrated production. *Bioresource Technology Reports*, 14, p.100676.
- [8]. Kim, H.M., Wi, S.G., Jung, S., Song, Y. and Bae, H.J., 2015. Efficient approach for bioethanol production from red seaweed *Gelidium amansii*. *Bioresource technology*, 175, pp.128-134.
- [9]. Otero, P., Carpena, M., Garcia-Oliveira, P., Echave, J., Soria-Lopez, A., Garcia-Perez, P., Fraga-Corral, M., Cao, H., Nie, S., Xiao, J. and Simal-Gandara, J., 2023. Seaweed polysaccharides: Emerging extraction technologies, chemical modifications and bioactive properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(13), pp.1901-1929.
- [10]. Mihhels, K., Yousefi, N., Blomster, J., Solala, I., Solhi, L. and Kontturi, E., 2023. Assessment of the Alga *Cladophora glomerata* as a Source for Cellulose Nanocrystals. *Biomacromolecules*, 24(11), pp.4672-4679.
- [11]. Doh, H., Lee, M.H. and Whiteside, W.S., 2020. Physicochemical characteristics of cellulose nanocrystals isolated from seaweed biomass. *Food hydrocolloids*, 102, p.105542.
- [12]. Zanchetta, E., Damergi, E., Patel, B., Borgmeyer, T., Pick, H., Pulgarin, A. and Ludwig, C., 2021. Algal cellulose, production and potential use in plastics: Challenges and opportunities. *Algal Research*, 56, p.102288.
- [13]. Baghel, R.S., Reddy, C.R.K. and Singh, R.P., 2021. Seaweed-based cellulose: Applications, and future perspectives. *Carbohydrate Polymers*, 267, p.118241.
- [14]. Chemodanov, A., Robin, A. and Golberg, A., 2017. Design of marine macroalgae photobioreactor integrated into building to support seagrass culture for biorefinery and bioeconomy. *Bioresource Technology*, 241, pp.1084-1093.
- [15]. Bar-Shai, N., Sharabani-Yosef, O., Zollmann, M., Lesman, A. and Golberg, A., 2021. Seaweed

## نتیجه گیری

ماکروجلبک‌های دریایی به‌عنوان یک منبع فراوان، تجدیدپذیر و پایدار، پتانسیل بی‌نظیری برای تولید سلولز و نانوسلولز با کیفیت بالا دارند. این مواد زیستی با خواص فیزیکی شیمیایی و مکانیکی برجسته، از جمله استحکام بالا، سطح ویژه وسیع و زیست سازگاری، راه را برای کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف هموار می‌کنند. توسعه روش‌های استخراج سبز و مقرون‌به‌صرفه، مانند هیدرولیز آنزیمی و بهبود فرآیندهای شیمیایی، اهمیت بالایی در تجاری‌سازی و افزایش بهره‌وری این مواد دارد. با این‌حال، تحقق پتانسیل کامل نانوسلولز جلبکی در مقیاس صنعتی، مستلزم پرداختن به چالش‌های مهمی نظیر بهینه‌سازی فرآیندهای تولید انبوه برای کاهش هزینه‌ها و افزایش بازدهی و همچنین غلبه بر موانع مقیاس‌پذیری و رقابت‌پذیری با منابع سنتی است. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی فعلی، استفاده از نانو سلولزهای استخراج شده از جلبک‌ها، نه تنها راهکاری پایدار برای تولید مواد جدید فراهم می‌کند، بلکه به مدیریت پسماندهای جلبکی و کاهش ردپای کربن نیز کمک شایانی می‌نماید. این پژوهش بر نقش حیاتی ماکروجلبک‌ها در آینده بیوپلیمرهای پایدار و کاربردهای نوین آن‌ها تأکید می‌کند و مسیر را برای تحقیقات و توسعه بیشتر در جهت رفع چالش‌های تجاری‌سازی و بهره‌برداری بهینه از این منبع ارزشمند هموار می‌سازد.

## منابع

- [1]. Steven, S., Mardiyati, Y., Shoimah, S.M.A., Rizkiansyah, R.R., Santosa, S.P. and Suratman, R., 2021. Preparation and characterization of nanocrystalline cellulose from *Cladophora* sp. algae. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11(3), pp.1035-1041.
- [2]. Hosseinkhani, H., 2023. Concepts of Biomedical Engineering. in: *Biomedical Engineering*. Wiley-VCH, New York, United States, pp. 1–22.
- [3]. Machado, B., Costa, S.M., Costa, I., Figueiro, R. and Ferreira, D.P., 2024. The potential of algae as a source of cellulose and its derivatives for biomedical applications. *Cellulose*, 31(6), pp.3353-3376.
- [4]. Ilyas, R.A. and Atikah, M.S.N., 2021. Production of nanocellulose from sustainable algae marine biomass. In *Seminar on Advanced Bio-and Mineral based Natural Fibre Composites (SBMC2021)*. Institute of

- characterization and applications. *Nanomaterials*, 10(9), p.1800.
- [27]. Plianwong, S. and Sirirak, T., 2024. Cellulose nanocrystals from marine algae *Cladophora glomerata* by using microwave-assisted extraction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, p.129422.
- [28]. Yousif, Y.M., Hassan, O.M. and Ibraheem, I.J., 2024. Removal of heavy metal ions from water using nanocellulose-based membranes derived from macroalgae *Chara corallina*. *Journal of Degraded & Mining Lands Management*, 11(3), pp. 5793-5803.
- [29]. Bogolitsyn, K., Parshina, A., Aleshina, L., Prusskii, A., Tokko, O., Polomarchuk, D., Bogdanovich, N. and Savrasova, Y., 2024. Nanocrystalline cellulose from Arctic brown algae *Laminaria digitata* and *Saccharina latissima*. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 31, p.100416.
- [30]. El-Sheekh, M.M., Yousuf, W.E., Kenawy, E.R. and Mohamed, T.M., 2023. Biosynthesis of cellulose from *Ulva lactuca*, manufacture of nanocellulose and its application as antimicrobial polymer. *Scientific Reports*, 13(1), p.10188.
- [31]. Steven, S., Fauza, A.N., Mardiyati, Y., Santosa, S.P. and Shoimah, S.M.A., 2022. Facile preparation of cellulose bioplastic from *Cladophora sp.* algae via hydrogel method. *Polymers*, 14(21), p.4699.
- [32]. Doh, H., Dunno, K.D. and Whiteside, W.S., 2020. Preparation of novel seaweed nanocomposite film from brown seaweeds *Laminaria japonica* and *Sargassum natans*. *Food hydrocolloids*, 105, p.105744.
- [33]. Kazharska, M., Ding, Y., Arif, M., Jiang, F., Cong, Y., Wang, H., Zhao, C., Liu, X., Chi, Z. and Liu, C., 2019. Cellulose nanocrystals derived from *Enteromorpha prolifera* and their use in developing bionanocomposite films with water-soluble polysaccharides extracted from *E. prolifera*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134, pp.390-396.
- [34]. El Achaby, M., Kassab, Z., Aboukas, A., Gaillard, C. and Barakat, A., 2018. Reuse of red algae waste for the production of cellulose nanocrystals and its application in polymer nanocomposites. *International journal of biological macromolecules*, 106, pp.681-691.
- [35]. Asadi, F., Nazarnezhad, N., & Attoei, G. A. (2016). Preparation of nano-cellulose from *Cladophora*, fibrous algae, and utilizing it to improve the strength properties of CMP pulp. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 31(4), 695–702. (In Persian).
- cellulose scaffolds derived from green macroalgae for tissue engineering. *Scientific reports*, 11(1), p.11843.
- [16]. Ventura-Cruz, S. and Tecante, A., 2021. Nanocellulose and microcrystalline cellulose from agricultural waste: Review on isolation and application as reinforcement in polymeric matrices. *Food Hydrocolloids*, 118, p.106771.
- [17]. Ghahramani, S., Hedjazi, S., Izadyar, S., Fischer, S. and Abdolkhani, A., 2023. Production of nanocrystals and nanofibrils from unbleached and bleached soda pulp with ECFlight bleaching sequence and comparison of their morphological and thermal properties. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 13(4), pp.457-471. (In Persian)
- [18]. Chen, Y.W., Lee, H.V., Juan, J.C. and Phang, S.M., 2016. Production of new cellulose nanomaterial from red algae marine biomass *Gelidium elegans*. *Carbohydrate polymers*, 151, pp.1210-1219.
- [19]. Saelee, K., Yingkamaeng, N., Nimchua, T. and Sukyai, P., 2016. An environmentally friendly xylanase-assisted pretreatment for cellulose nanofibrils isolation from sugarcane bagasse by high-pressure homogenization. *Industrial Crops and Products*, 82, pp.149-160.
- [20]. Xu, S.Y., Huang, X. and Cheong, K.L., 2017. Recent advances in marine algae polysaccharides: Isolation, structure, and activities. *Marine Drugs*, 15(12), p.388.
- [21]. Ribeiro, R.S., Pohlmann, B.C., Calado, V., Bojorge, N. and Pereira Jr, N., 2019. Production of nanocellulose by enzymatic hydrolysis: Trends and challenges. *Engineering in life sciences*, 19(4), pp.279-291.
- [22]. Bian, H., Chen, L., Dong, M., Fu, Y., Wang, R., Zhou, X., Wang, X., Xu, J. and Dai, H., 2020. Cleaner production of lignocellulosic nanofibrils: Potential of mixed enzymatic treatment. *Journal of Cleaner Production*, 270, p.122506.
- [23]. Asadi, F. and Aryaie Monfared, M.H., 2020. 06 New ways to Improve Energy efficiency in Pulp and Paper Industry. *Iranian Journal of Energy*, 23(2), pp.139-162. (In Persian).
- [24]. Michelin, M., Gomes, D.G., Romani, A., Polizeli, M.D.L.T. and Teixeira, J.A., 2020. Nanocellulose production: exploring the enzymatic route and residues of pulp and paper industry. *Molecules*, 25(15), p.3411.
- [25]. Rashid, E.S.A., Gul, A., Yehya, W.A.H. and Julkapli, N.M., 2021. Physico-chemical characteristics of nanocellulose at the variation of catalytic hydrolysis process. *Heliyon*, 7(6).
- [26]. Trache, D. and Thakur, V.K., 2020. Nanocellulose and nanocarbons based hybrid materials: Synthesis,