

Nanocellulose Production from the Invasive Water Hyacinth for Environmental Protection and Biomass Valorisation

Mehran Mansouri¹; Yahya Hamzeh¹; Mohammad Azadfallah^{1*}; Ali Abdulkhani¹; Reza Oladi¹

*1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Email Address: adfallah@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper	<p>Water hyacinth (<i>Eichhornia crassipes</i>) is a fast-growing invasive aquatic plant that causes severe environmental problems. However, it represents a valuable feedstock for nanocellulose production due to its relatively high cellulose content and low lignin content. This review article analyzes published studies on the properties, performance, and applications of nanocellulose derived from water hyacinth. The extracted nanocellulose typically exhibits nanoscale dimensions, a crystallinity index of approximately 68–73%, and thermal stability in the range of 300–320 °C, indicating its good structural quality. The abundant hydroxyl groups on the nanocellulose surface enhance hydrogen bonding capability and improve interfacial compatibility with polymer matrices. Reported applications include reinforcement of biodegradable polymer films for packaging, improvement of recycled paper strength, use in energy systems such as battery separators and conductive aerogels, and environmental applications such as wastewater treatment and heavy metal adsorption. Overall, water hyacinth can be transformed from an environmental burden into a sustainable source of advanced materials, aligning with circular economy principles. However, further development of environmentally friendly extraction methods and comprehensive techno-economic assessments are still required for large-scale industrial implementation.</p>
Article History:	
Received Date: 2026/05/16	
Revised Date: 2026/06/24	
Accepted Date: 2026/06/29	
Published Date: 2026/07/01	
Keywords: Invasive Plant, Water Hyacinth, <i>Eichhornia Crassipes</i> , Biomass, Lignocelluloses, Nanocellulose	
Cite this article:	Mehran Mansouri , Yahya Hamzeh , Mohammad Azadfallah , Ali Abdulkhani , Reza Oladi (2026) Nanocellulose Production from the Invasive Water Hyacinth for Environmental Protection and Biomass Valorisation , Journal of Environmental Sciences Studies , 11(1) , Pages 11088-11102.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) is one of the most aggressive invasive aquatic plants worldwide and has become a major environmental concern in many freshwater ecosystems. Due to its rapid vegetative propagation and exceptional adaptability, this floating macrophyte can quickly cover large areas of rivers, lakes, reservoirs, irrigation canals, and wetlands. The uncontrolled spread of water hyacinth causes severe ecological, environmental, and socio-economic problems. Dense plant mats formed on water surfaces block sunlight penetration, thereby reducing photosynthetic activity in submerged aquatic plants and disrupting aquatic food chains. In addition, decomposition of the accumulated biomass significantly decreases dissolved oxygen concentration, leading to hypoxic conditions that negatively affect fish populations and aquatic biodiversity. The obstruction of waterways also interferes with irrigation systems, fisheries, hydroelectric facilities, and navigation. Furthermore, stagnant water beneath the dense vegetation provides suitable breeding habitats for mosquitoes and other disease vectors. Despite these negative impacts, water hyacinth has recently gained attention as a promising lignocellulosic biomass resource. The plant contains relatively high cellulose content and comparatively low lignin levels, which facilitate cellulose extraction and reduce the severity of pretreatment processes compared with conventional lignocellulosic resources such as wood. These characteristics make water hyacinth an attractive renewable feedstock for nanocellulose production. Nanocellulose, including cellulose nanocrystals (CNCs) and cellulose nanofibers (CNFs), is considered one of the most important bio-based nanomaterials due to its remarkable physicochemical and mechanical properties. These materials possess high tensile strength, low density, large specific surface area, biodegradability, renewability, and tunable surface chemistry. Such unique characteristics have led to increasing interest in their applications in sustainable packaging, advanced composites, paper reinforcement, environmental remediation, energy storage, biomedical materials, and flexible electronics. In this context, converting invasive water hyacinth into high-value nanocellulose represents an environmentally sustainable approach that simultaneously addresses biomass management and renewable material production within the framework of circular economy principles. This review aims to summarize recent advances in the extraction, characterization, modification, and industrial applications of nanocellulose derived from water hyacinth. In addition, the study discusses the environmental significance of utilizing this invasive biomass and highlights future research opportunities for developing sustainable nanocellulose-based technologies.

Materials and methods

This review study summarizes published research on the extraction, characterization, and applications of nanocellulose derived from water hyacinth, while also highlighting the environmental threats caused by the uncontrolled spread of this invasive aquatic plant. It critically evaluates major production methods, including acid hydrolysis, enzymatic, mechanical, and combined chemical-mechanical treatments. The structural and functional properties of the produced nanocelluloses, as well as their applications in composites, packaging, paper, energy, environmental remediation, and advanced materials, are discussed. Research gaps and future development opportunities are also highlighted.

Results and discussion

The reviewed studies demonstrate that water hyacinth is a highly promising lignocellulosic resource for nanocellulose production due to its relatively high cellulose content and low lignin concentration. These characteristics facilitate cellulose purification and reduce the intensity of chemical pretreatments required during nanocellulose extraction. As a result, water hyacinth can serve as a sustainable alternative to conventional cellulose sources such as wood and agricultural residues. Structurally, nanocellulose derived from water hyacinth exhibits nanoscale dimensions, high specific surface area, and high aspect ratio, which are important parameters for reinforcement applications. The crystallinity index of water-hyacinth-derived nanocellulose is typically reported between 68% and 73%, indicating relatively ordered crystalline structures. High crystallinity contributes significantly to improved stiffness, tensile strength, dimensional stability, and thermal resistance. Thermogravimetric analyses reported in the literature indicate thermal degradation temperatures ranging between 300 and 320 °C, demonstrating suitable thermal stability for various industrial applications. Moreover, the large number of hydroxyl groups present on nanocellulose surfaces enables strong hydrogen bonding interactions and facilitates surface functionalization. Various chemical modification techniques, including TEMPO-

oxidation, acetylation, and graft polymerization, have been investigated to improve compatibility with hydrophobic polymer matrices and introduce additional functionalities such as conductivity or adsorption capacity. In packaging applications, incorporation of nanocellulose into biodegradable polymer films significantly improves tensile strength, elastic modulus, thermal stability, and barrier properties against oxygen and water vapor. These improvements are essential for the development of environmentally friendly alternatives to petroleum-based plastic packaging. In composite systems, nanocellulose acts as an efficient reinforcing nanofiller due to its high aspect ratio and strong interfacial interactions with polymer matrices. In the pulp and paper industry, the addition of water-hyacinth-derived nanocellulose to recycled pulp improves inter-fiber bonding, sheet density, tensile strength, burst resistance, and overall paper quality. This application is particularly important because recycled fibers often experience mechanical degradation after repeated recycling cycles. The reviewed studies also highlight the potential of water-hyacinth nanocellulose in energy-related applications. Cellulose nanofibers have been successfully used as separators in rechargeable batteries due to their porous structure, electrolyte wettability, ion transport capability, and thermal stability. In addition, surface-modified nanocellulose combined with conductive polymers has enabled the fabrication of lightweight conductive materials suitable for sensors, supercapacitors, and flexible electronic devices. Environmental remediation is another important application area. The nanoscale structure and abundant functional groups of nanocellulose provide high adsorption capacity for heavy metals, dyes, oils, and other contaminants. Several studies have reported efficient removal of pollutants such as lead, cadmium, and chromium from wastewater using modified nanocellulose adsorbents derived from water hyacinth. Hydrophobic modifications have also enabled efficient oil–water separation systems for environmental cleanup applications. Although significant progress has been achieved, several challenges still limit commercial scale utilization of water-hyacinth-derived nanocellulose. High moisture content of the biomass, variability in chemical composition, energy-intensive drying processes, and chemical consumption during extraction remain important concerns. Therefore, future studies should focus on developing greener extraction technologies, reducing production costs, improving process scalability, and conducting comprehensive life cycle and techno-economic assessments.

Conclusion

The findings of this review clearly demonstrate that water hyacinth, despite being one of the world's most problematic invasive aquatic weeds, can be effectively converted into a valuable renewable feedstock for nanocellulose production. The produced nanocellulose exhibits favorable structural, mechanical, thermal, and surface properties, making it suitable for a wide range of advanced industrial applications including packaging, composites, paper reinforcement, environmental remediation, energy storage, and functional materials. The valorization of water hyacinth biomass into high-value nanomaterials represents a practical example of sustainable development and circular economy principles, where an environmental problem is transformed into a renewable industrial resource. Such an approach not only contributes to invasive species management but also reduces dependence on fossil-based and non-renewable materials. Globally, water-hyacinth-derived nanocellulose shows strong potential for future multifunctional bio-based technologies. However, further research is still required to optimize environmentally friendly extraction methods, improve economic feasibility, scale up industrial production, and expand commercial applications. With continued technological advancements, nanocellulose derived from water hyacinth may become an important sustainable material for next-generation green industries.



تولید نانوسلولز از گیاه مهاجم سنبل آبی در راستای حفاظت محیط زیست و ارزش افزایی زیست توده

مهران منصوری^۱، یحیی همزه^۱، محمد آزادفلاح^{۱*}، علی عبدالخانی^۱، رضا اولادی^۱

* ۱- گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: adfallah@ut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>سنبل آبی (<i>Eichhornia crassipes</i>) یک گیاه مهاجم با رشد سریع است که مشکلات زیست محیطی گسترده‌ای ایجاد می‌کند، اما به دلیل محتوای مناسب سلولز و لیگنین پایین، منبعی ارزشمند برای تولید نانوسلولز محسوب می‌شود. این مقاله مروری با تحلیل مطالعات موجود، ویژگی‌ها و کاربردهای نانوسلولز حاصل از سنبل آبی را بررسی می‌کند. نانوسلولزهای استخراج شده معمولاً دارای قطر نانومتری، بلورینگی حدود ۶۸ تا ۷۳ درصد و پایداری حرارتی در حدود ۳۰۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد هستند که نشان‌دهنده کیفیت مناسب آن‌هاست. وجود گروه‌های هیدروکسیلی فراوان نیز موجب افزایش پیوند هیدروژنی و بهبود سازگاری در کامپوزیت‌ها می‌شود. این نانومواد در تقویت فیلم‌های پلیمری و بسته‌بندی زیست تخریب پذیر، بهبود خواص کاغذ، کاربردهای انرژی مانند جداکننده باتری و مواد رسانا، و همچنین در تصفیه آب و جذب فلزات سنگین کاربرد دارند. نتایج نشان می‌دهد سنبل آبی می‌تواند از یک معضل زیست محیطی به منبعی برای تولید مواد پیشرفته تبدیل شود. با این حال، توسعه روش‌های پایدار و ارزیابی اقتصادی برای تجاری‌سازی گسترده ضروری است.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰</p> <p>کلید واژه‌ها: گیاه مهاجم، سنبل آبی، کاربرد زیست توده، لیگنوسلولزی، نانوسلولزها،</p>

جهان امروز با چالش‌های گسترده زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های صنعتی و مصرف بی‌رویه منابع تجدیدناپذیر روبه‌رو است. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی آب و هوا، و تجمع زباله‌های پلاستیکی در اقیانوس‌ها، حیات کره زمین و آینده نسل‌های بعدی انسان و سایر موجودات زنده را به طور جدی تهدید می‌کند. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر و توسعه مواد پایدار به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی به‌عنوان یکی از فراوان‌ترین منابع زیستی تجدیدپذیر در جهان، ظرفیت بالایی برای جایگزینی مواد پایه نفتی در حوزه‌های مختلف مواد و انرژی دارند (Abdulkhani et al., 2024). این زیست‌توده‌ها که عمدتاً شامل بقایای گیاهی نظیر چوب، ساقه و برگ‌ها هستند، از سه جزء اصلی سلولز، همی‌سلولزها و لیگنین تشکیل شده‌اند. در کنار منابع رایج زیست‌توده، برخی گونه‌های گیاهی مهاجم نیز به دلیل رشد سریع و گسترش کنترل‌نشده، به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی تبدیل شده‌اند. این گیاهان با برهم زدن تعادل اکوسیستم‌های طبیعی، خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کنند. گیاه زینتی سنبل آبی^۱، بومی مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری آمریکای جنوبی، به‌ویژه حوضه آمازون، یکی از مخرب‌ترین گیاهان مهاجم جهان شناخته می‌شود. این گیاه که به دلیل ظاهر زیبا به طور گسترده در آکواریوم‌ها و تالاب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، به واسطه راندمان بالای فتوسنتز و سرعت زیاد تکثیر، به سرعت در منابع آبی گسترش یافته و سبب انسداد مسیرهای آبی، کاهش اکسیژن محلول در آب، و تهدید تنوع زیستی می‌شود (Wembe et al., 2023). سنبل آبی سال‌ها پیش وارد ایران شده و امروزه در بسیاری از نواحی، به‌ویژه در استان گیلان و تالاب انزلی، گسترش قابل توجهی یافته است؛ موضوعی که نگرانی فعالان محیط‌زیست را به همراه داشته است. با این حال، ویژگی رشد سریع و تولید زیست‌توده فراوان این گیاه (تا حدود ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار در روز) در کنار مقدار زیاد سلولز و درصد نسبتاً کم لیگنین، آن را به منبعی ارزشمند و امیدوارکننده برای تولید مواد زیستی و محصولات دارای ارزش افزوده تبدیل کرده است (Hadad et al., 2009; Sierra-Carmona et al., 2022). از این رو، می‌توان علاوه بر کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از گسترش این گیاه، از آن به‌عنوان منبعی پایدار برای تولید مواد جدید بهره گرفت (Ajithram et al., 2023; Sultana et al., 2024). یکی از بهترین راهکارها برای کاهش خسارات زیست‌محیطی ناشی از سنبل آبی، جمع‌آوری مکانیکی و استفاده هدفمند از آن در کاربردهایی با ارزش اقتصادی مناسب است. این رویکرد، ضمن کنترل گسترش گیاه مهاجم، امکان بهره‌برداری اقتصادی از آن را نیز فراهم می‌سازد. به دلیل پراکندگی گسترده و ترکیب شیمیایی مناسب این گیاه، تا سال ۲۰۲۲ بیش از ۶۰۰ مقاله و گزارش علمی درباره خواص و کاربردهای آن منتشر شده است (Smriti et al., 2023). نتایج مطالعات انجام‌شده و همچنین تحقیقات در حال اجرای نویسندگان این مقاله نشان می‌دهد که اجزای مختلف سنبل آبی را می‌توان با استفاده از روش‌های مکانیکی، شیمیایی یا ترکیبی از این دو، به سلولز تفکیک کرده و در کاربردهای گوناگون مورد استفاده قرار داد (Vale et al., 2024). پژوهش‌های انجام‌شده بر پایه آزمایش‌های عملی و منابع علمی موجود، فناوری‌های متعددی را معرفی کرده‌اند که در آن‌ها از سنبل آبی استفاده می‌شود. از جمله این کاربردها می‌توان به تولید لنت ترمز، کود، زیست‌انرژی، خوراک دام، مواد گیاه‌پالایی، زیست‌پلاستیک‌ها و جاذب‌های آلاینده اشاره کرد (Nandiyanto et al., 2024). در این میان، یکی از مهم‌ترین ظرفیت‌های اقتصادی و صنعتی این زیست‌توده، استخراج سلولز و تولید نانوسلولز از آن و توسعه کاربردهای مرتبط است. نانوسلولز به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون استحکام مکانیکی بالا، نسبت سطح به حجم بسیار زیاد و زیست‌سازگاری مطلوب، به یکی از پرکاربردترین مواد نانومقیاس در حوزه‌هایی مانند کشاورزی پایدار، پزشکی، الکترونیک و مواد پیشرفته تبدیل شده است (Smriti et al., 2023). بنابراین، بررسی قابلیت سنبل آبی به‌عنوان منبعی اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای تولید نانوسلولز، می‌تواند گامی مؤثر در راستای توسعه پایدار و تحقق اقتصاد چرخشی باشد، که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

¹ Water Hyacinth (Eichhornia crassipes)

۲- روش انجام تحقیق

پژوهش حاضر به صورت یک مطالعه مروری نظام‌مند با رویکرد کتابخانه‌ای و تحلیل توصیفی انجام شده است. سنبل آبی به دلیل رشد بسیار سریع، قدرت تکثیر بالا و گسترش کنترل نشده در زیست‌بوم‌های آبی، امروزه به عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان مهاجم آبی در جهان شناخته می‌شود. توسعه گسترده این گیاه در منابع آبی، پیامدهای زیست‌محیطی متعددی از جمله انسداد مسیرهای آبی، کاهش میزان اکسیژن محلول در آب، اختلال در اکوسیستم‌های آبی و تهدید تنوع زیستی را به همراه داشته و نگرانی‌های فراوانی را در میان پژوهشگران و فعالان محیط‌زیست ایجاد کرده است. با این وجود، ویژگی‌های ساختاری و ترکیب شیمیایی مناسب این گیاه، به‌ویژه محتوای قابل توجه سلولز و مقدار نسبتاً پایین لیگنین، سبب شده است که سنبل آبی به عنوان یک زیست‌توده لیگنوسلولزی ارزشمند مورد توجه قرار گیرد. در نتیجه، طی سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه شناسایی ویژگی‌ها، فرآوری و توسعه کاربردهای مختلف این گیاه انجام شده است. از این منظر، در سال‌های اخیر، توسعه کاربردهای صنعتی و تولید محصولات دارای ارزش افزوده از سنبل آبی، به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای کنترل و مدیریت گسترش این گیاه مهاجم مطرح شده است. در این میان، استخراج سلولز و تولید نانوسلولز از سنبل آبی، به دلیل قابلیت فرآوری مناسب و کاربردهای گسترده نانوسلولز در حوزه‌های مختلف صنعتی و فناوری، به‌ویژه ویزه‌ای را به خود اختصاص داده است. بر این اساس، در مقاله حاضر، ویژگی‌ها و ترکیب شیمیایی سنبل آبی، روش‌های استخراج سلولز و نانوسلولز از این گیاه و همچنین مهم‌ترین پیشرفت‌ها و یافته‌های پژوهشی اخیر در این زمینه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. اطلاعات ارائه شده در این مطالعه می‌تواند علاوه بر گسترش دانش علمی و فنی مرتبط با بهره‌برداری از این زیست‌توده، در کنترل مؤثر گسترش سنبل آبی و استفاده اقتصادی و هدفمند از ظرفیت‌ها و مزایای آن نیز نقش مؤثری ایفا کند.

۳- نتایج و بحث

• خصوصیات مورفولوژیک، فیزیکی، شیمیایی گیاه سنبل آبی

سنبل آبی یک گیاه آبی شناور و چندساله از گروه ماکروفیت‌ها است که به دلیل ساختار ویژه اندام‌های رویشی خود به راحتی قابل شناسایی است. برگ‌ها به صورت رزتی آرایش یافته‌اند و دارای دمبرگ‌های متورم، سبک و اسفنجی هستند که نقش مهمی در شناور ماندن گیاه بر سطح آب ایفا می‌کنند. پهنک برگ‌ها عموماً ضخیم، براق و سبزرنگ بوده و شکل آن‌ها از گرد تا تخم‌مرغی متغیر است. ریشه‌ها به صورت متراکم، رشته‌ای و آویزان در آب گسترش یافته و اغلب رنگ بنفش تیره دارند. این سامانه ریشه‌ای گسترده، با افزایش سطح تماس با آب و رسوبات، توانایی جذب مواد غذایی و ذرات معلق را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Al Hadeethi et al., 2017). گل‌های سنبل آبی به شکل گل‌آذین سنبله‌ای ظاهر می‌شوند و معمولاً دارای رنگ بنفش روشن، آبی مایل به بنفش یا سفید هستند. پس از فرآیند گرده‌افشانی، میوه‌ای کپسولی با سه بخش داخلی تشکیل می‌شود که تعداد زیادی بذر در آن قرار دارد. این خصوصیات مورفولوژیک، همراه با توان بالای تولید بذر و رشد رویشی سریع، موجب گسترش وسیع این گیاه در اکوسیستم‌های آبی شده است. همین ویژگی‌ها در سال‌های اخیر سبب شده‌اند که سنبل آبی به عنوان یک منبع زیست‌توده لیگنوسلولزی مورد توجه قرار گیرد و کاربرد آن در حوزه‌هایی مانند زیست‌پالایش، تولید جاذب‌های زیستی و ساخت مواد پیشرفته از جمله نانوسلولز بررسی شود (Al Hadeethi et al., 2017). از مهم‌ترین ویژگی‌های آناتومیکی این گیاه، وجود بافت آترنشیما در دمبرگ‌ها است که دارای فضاهای خالی و حفرات هوایی فراوان می‌باشد. این ساختار متخلخل علاوه بر ایجاد خاصیت شناوری، نفوذپذیری مناسبی برای واکنش‌گرهای شیمیایی فراهم می‌کند و در نتیجه فرآیندهایی نظیر لیگنین‌زدایی و استخراج الیاف را تسهیل می‌نماید (Al Hadeethi et al., 2017; Laishram et al., 2025). به دلیل پراکنش گسترده سنبل آبی در مناطق مختلف جهان، پژوهش‌های متعددی درباره ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کاربردی بخش‌های مختلف این گیاه انجام شده است (George et al., 2023; Jose et al. 2019; Sari et al., 2023). خلاصه‌ای از نتایج این مطالعات در جدول ۱ ارائه شده است (Smriti et al., 2023; Yan & Guo, 2017). علاوه بر ترکیبات لیگنوسلولزی، سنبل آبی دارای مقادیری پروتئین خام، مواد معدنی و رطوبت نیز می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی بخش‌های مختلف سنبل آبی

مقدار	جزء ساختاری
۱۶۷	چگالی کل گیاه (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷۸۲	چگالی ریشه ها (کیلوگرم بر متر مکعب)
۸۱۸	چگالی ساقه ها (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۸-۳۳	سلولز کل گیاه (درصد وزنی)
۲۳-۲	همی سلولزهای کل گیاه (درصد وزنی)
۷-۱۰	لیگنین کل گیاه (درصد وزنی)
۴۳-۶۵	سلولز ساقه (درصد وزنی)
۱۳-۲۹	همی سلولزهای ساقه (درصد وزنی)
۷-۱۰	لیگنین ساقه (درصد وزنی)
۷/۱	خاکستر و سایر مواد (درصد وزنی)

بررسی‌های شیمیایی نشان داده‌اند که بخش ساقه و دمبرگ در مقایسه با سایر قسمت‌های گیاه، مقدار بیشتری سلولز دارد و به همین دلیل در بسیاری از کاربردهای صنعتی و پژوهشی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. حتی در برخی مطالعات، ویژگی‌های این بخش در مقایسه با سایر منابع لیگنوسلولزی مطلوب‌تر گزارش شده است (Yan & Guo 2017). از سوی دیگر، میزان لیگنین در سنبل آبی نسبت به بسیاری از زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی پایین‌تر است، که فرآیند جداسازی اجزای سلولزی و استخراج مواد ارزشمند را ساده‌تر می‌کند (Smriti et al., 2023; Juárez-Luna et al., 2019). تفاوت در مقادیر گزارش شده برای ترکیبات شیمیایی این گیاه عمدتاً به شرایط محیط رشد، محل رویش و همچنین تفاوت در روش نمونه‌برداری از اندام‌های مختلف گیاه مربوط دانسته شده است (Sari et al., 2023). الیاف لیگنوسلولزی حاصل از سنبل آبی را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف شامل فرآیندهای مکانیکی، شیمیایی و یا ترکیبی از این دو استخراج و برای کاربردهای متنوع مورد استفاده قرار داد (Sari et al., 2023). در یکی از مطالعات انجام‌شده، ویژگی‌های ساختاری الیاف این گیاه پس از جداسازی مکانیکی و انجام تیمارهای زیستی هوازی و بی‌هوازی، همراه با خیساندن اجزای گیاه در آب و سپس تیمار قلبایی بررسی شده است که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است (Sari et al., 2023). در این تحقیق، دستگاه ساده مورد استفاده برای جداسازی مکانیکی توانسته است حدود ۱۸ تا ۲۰ کیلوگرم الیاف سلولزی خشک را در هر ساعت از زیست‌توده سنبل آبی تولید کند (Sari et al., 2023).

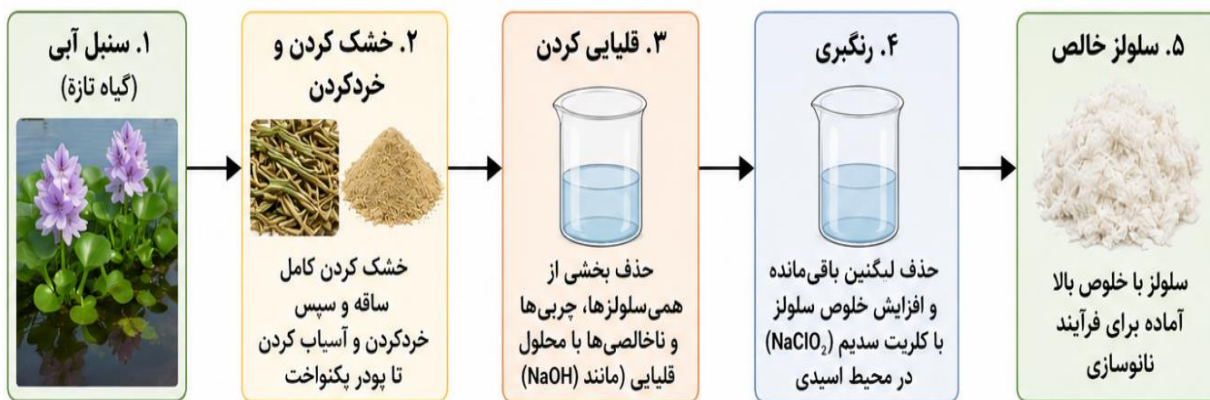
جدول ۲. خواص آناتومیکی و فیزیکی الیاف حاصل از سنبل آبی (Sari et al., 2023; Yan & Guo, 2017)

بازده الیاف (درصد وزنی)	قطر الیاف (میکرون)	طول الیاف (سانتیمتر)	دانسیته خطی (تکس)	مقاومت دستجات الیاف (گرم بر تکس)	مقاومت کششی (مگا پاسگال)	مقدار رطوبت (درصد وزنی)
۱/۲-۲/۳	۷۵-۹۰	۲۰-۳۰	۱/۶-۲/۱	۷/۵-۱۰	۲/۴۱	۷/۸-۸/۵

با وجود قابلیت استخراج الیاف از این گیاه، بازده نسبتاً کم الیاف یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های کاربرد صنعتی آن محسوب می‌شود و همین موضوع، علی‌رغم فراوانی گسترده این گیاه، مانع توسعه وسیع استفاده از پسماند لیگنوسلولزی آن شده است. از نظر ویژگی‌های مورفولوژیکی، الیاف سنبل آبی در مقایسه با بسیاری از منابع لیگنوسلولزی دارای قطر کمتری هستند و این خصوصیت می‌تواند در کاربردهایی مانند بهبود مقاومت خشک و تر کاغذ نقش مؤثری ایفا کند. علاوه بر این، درصد بالای سلولز موجود در این الیاف، موجب ایجاد استحکام کششی مناسب شده و قابلیت استفاده آن‌ها را در تولید فرآورده‌های سلولزی و کامپوزیتی افزایش می‌دهد.

• جمع آوری، پاک سازی زیست توده سنبل آبی و استخراج سلولز آن

سنبل آبی به دلیل سرعت رشد بسیار بالا، توانایی تولید حجم عظیمی زیست توده لیگنوسلولزی را در مدت زمان کوتاه دارد؛ به طوری که برآورد می شود این گیاه بتواند در یک سال حدود ۱۴۰ میلیون گیاه جدید ایجاد کرده و سطحی در حدود ۱/۴ کیلومتر مربع را پوشش دهد. این ویژگی در کنار فراوانی گسترده، هزینه پایین جمع آوری، زیست تخریب پذیری مناسب، محتوای بالای سلولز (حدود ۴۵ تا ۶۴ درصد) و میزان پایین لیگنین (در برخی موارد تا حدود ۴ درصد)، آن را به یک منبع ارزشمند برای استخراج سلولز تبدیل کرده است. در برخی جنبه ها، این زیست توده حتی عملکرد بهتری نسبت به برخی پسماندهای کشاورزی متداول از خود نشان می دهد (Smriti et al., 2023). در یک زنجیره فرآیندی استاندارد برای تبدیل سنبل آبی به سلولز یا هولوسلولز نسبتاً خالص (به عنوان پیش ماده تولید نانوسلولز)، هدف اصلی حذف تدریجی اجزای غیرسلولزی یعنی لیگنین، همی سلولزها، مواد استخراجی و ناخالصی های معدنی است، در حالی که اسکلت سلولزی تا حد امکان حفظ می شود. این مسیر معمولاً به صورت یک توالی پیش تیمار فیزیکی-شیمیایی طراحی می شود (شکل ۱). فرآیند آماده سازی سنبل آبی برای دستیابی به سلولز یا هولوسلولز نسبتاً خالص با مرحله برداشت گیاه از محیط های آبی آغاز می شود. این مرحله معمولاً با چالش همراه است، زیرا گیاه دارای رطوبت بسیار بالا و آلودگی های سطحی (گل، نمک های محلول، مواد آلی تجزیه شده) است. پس از برداشت حذف ریشه ها و بخش های آسیب دیده یا بسیار تجزیه شده و جداسازی مواد خارجی (سنگ، شن، بقایای آلی دیگر) انجام می شود. در این مرحله، زیست توده جمع آوری شده از نظر ناخالصی های فیزیکی مانند گل، شن و بقایای آلی پاک سازی شده و سپس چندین بار با آب شستشو داده می شود تا مواد محلول و آلودگی های سطحی حذف شوند. در ادامه، گیاه وارد مرحله خردسازی مکانیکی شده و به قطعات کوچک تر یا خمیر اولیه تبدیل می شود، تا سطح تماس آن برای واکنش های شیمیایی افزایش یابد. در صورت نیاز، عملیات خشک کردن نیز برای کاهش رطوبت و کنترل شرایط فرآیندی انجام می گیرد. در ادامه، برای حذف ترکیبات غیرسلولزی، معمولاً از پیش تیمارهای شیمیایی نظیر تیمار قلیایی استفاده می شود که موجب حذف بخشی از همی سلولزها، چربی ها و سایر ناخالصی ها می گردد. در صورت نیاز، جهت حذف مواد استخراجی و ترکیبات لیپوفیل مانند مومها، از استخراج سوکسله با حلال های آلی نظیر استون بهره گرفته می شود. پس، از آماده سازی مواد اولیه، زیست توده تحت تیمار قلیایی قرار می گیرد تا همی سلولزهای آن تا حد زیادی حذف شده و بخشی از لیگنین نیز تجزیه شود و در نتیجه ساختار سلولزی متورم تر و قابل دسترس تر گردد. در ادامه، مرحله رنگبری با استفاده از عوامل اکسیدکننده مانند دی اکسید کلر یا پراکسید هیدروژن انجام می شود که هدف آن حذف لیگنین باقی مانده و روشن تر شدن ماده است. در شرایط آزمایشگاهی، این مرحله معمولاً با استفاده از تیمار زیست توده با سدیم کلریت (NaClO_2) در محیط اسیدی صورت می گیرد که نقش مهمی در آماده سازی سلولز خالص برای تولید نانوبلورهای سلولزی ایفا می کند (Jonooobi et al., 2015). پس از شستشو و خنثی سازی، محصول حاصل به صورت هولوسلولز یا سلولز نیمه خالص به دست می آید که دارای خلوص سلولزی بالا و مقدار ناچیزی ناخالصی است و به عنوان ماده اولیه مناسب برای تولید انواع نانوسلولز مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۱. مراحل فراوری اولیه جهت تولید انواع نانو سلولز از مواد لیگنوسلولزی سنبل آبی

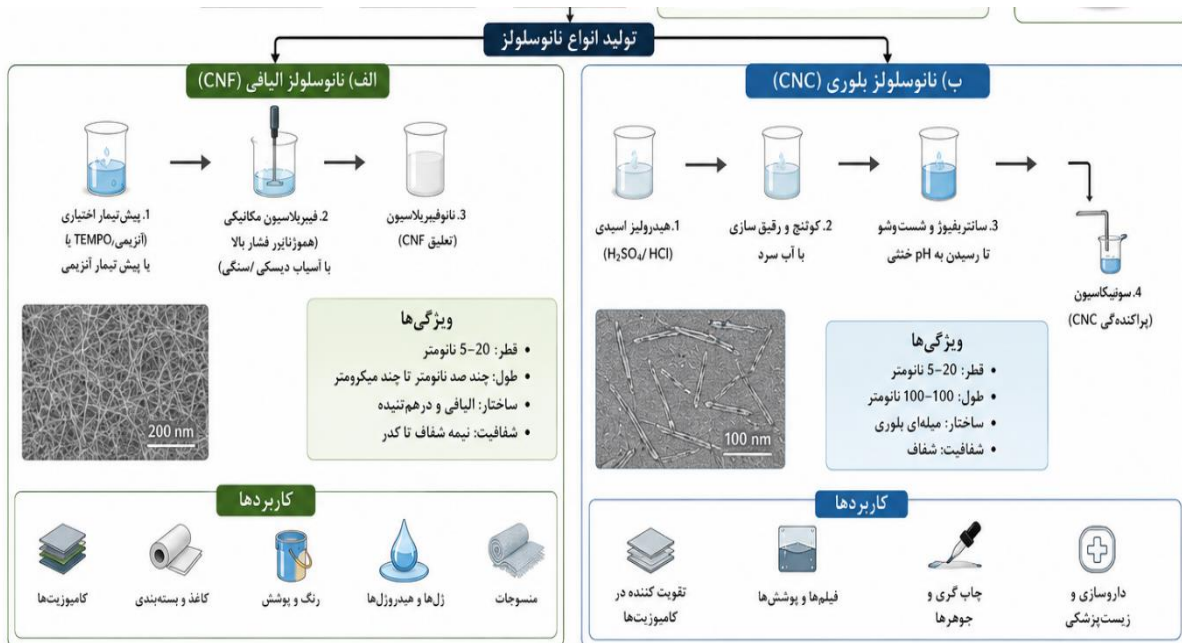
• نانو ذرات سلولزی

نانوسلولزها بر اساس ساختار، عملکرد و روش تولید به سه دسته اصلی شامل نانوبلورهای سلولزی (CNCS)، نانوالیاف سلولزی (CNFs) و سلولز باکتریایی (BC) تقسیم‌بندی می‌شوند [۷]. این مواد معمولاً دارای درجه بلورینگی زیاد (حدود ۵۴ تا ۸۸ درصد)، سطح ویژه زیاد و نسبت طول به قطر قابل توجه هستند، به طوری که قطر آن‌ها در حدود ۳ تا ۵ نانومتر و طول آن‌ها بین ۵۰ تا ۵۰۰ نانومتر گزارش شده است. در میان آن‌ها، نانوبلورهای سلولزی از استحکام کششی بسیار زیاد (حدود ۷۵۰۰ تا ۷۷۰۰ مگاپاسکال)، مدول الاستیسیته در حدود ۱۱۰ تا ۲۲۰ گیگاپاسکال و چگالی تقریبی ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب برخوردارند (Moon et al., 2011). در حال حاضر، تولید صنعتی نانوسلولز عمدتاً مبتنی بر منابع چوبی است؛ با این حال، افزایش تقاضا برای این ماده موجب شده است که منابع غیرچوبی و پسماندهای کشاورزی به‌عنوان گزینه‌های جایگزین اقتصادی و پایدار مورد توجه قرار گیرند. سنبل آبی یکی از این منابع است که توان بالایی در تولید الیاف سلولزی و انواع نانوسلولز از خود نشان داده است. بازار جهانی نانوسلولز در سال ۲۰۲۵ به حدود ۵۰۴/۸ میلیون دلار آمریکا رسیده است و پاسخ‌گویی به این تقاضا نیازمند انتخاب منابع اولیه مناسب و توسعه فرآیندهای پایدار می‌باشد. دلیل این اهمیت آن است که جداسازی همی‌سلولزها و لیگنین از ساختار سلولزی و شکستن پیوندهای بین‌الیافی معمولاً به شرایط فرآیندی شدید نیاز دارد. سنبل آبی این قابلیت را دارد که به‌عنوان منبع تولید هر دو نوع نانوسلولز، یعنی نانوبلورهای سلولزی و نانوالیاف سلولزی مورد استفاده قرار گیرد. فرآیند استخراج نانوسلولز از مواد لیگنوسلولزی معمولاً شامل دو مرحله اصلی است: ابتدا پیش‌تیمار برای حذف ناخالصی‌ها، لیگنین و همی‌سلولزها، که در قسمت قبل مطرح شده است. سپس، مرحله نانوسازی جهت تبدیل سلولز خالص به ساختارهای نانومقیاس. در بسیاری از موارد، به‌کارگیری ترکیبی از روش‌های شیمیایی و مکانیکی بهترین بازده و کیفیت محصول را فراهم می‌سازد (Jonoobi et al., 2015). آنچه مهم است این است که شرایط پیش‌تیمار باید با دقت و بر اساس ملاحظات اقتصادی و فنی انتخاب و انجام شود. پیش‌تیمار ضعیف می‌تواند منجر به باقی‌ماندن لیگنین و کاهش خلوص سلولز شود که در نهایت کیفیت نانوسلولز تولیدی را کاهش می‌دهد. در مقابل، پیش‌تیمار بیش از حد شدید ممکن است باعث تخریب بخشی از سلولز شده و ضمن کاهش بازده، مصرف مواد شیمیایی و انرژی را افزایش دهد.

• استخراج نانوبلورهای سلولزی از سنبل آبی با هیدرولیز اسیدی

ساقه سنبل آبی به دلیل داشتن بیشترین مقدار سلولز در میان بخش‌های مختلف گیاه، در بسیاری از مطالعات به‌عنوان منبع اصلی برای تولید نانوبلورهای سلولزی مورد استفاده قرار گرفته است (Smriti et al., 2023). مرحله اصلی در تولید نانوبلورهای سلولزی، جداسازی این نانوذرات از اجزای غیرسلولزی و بخش‌های غیرکریستالی است (شکل ۲). در این میان، هیدرولیز اسیدی و تیمارهای آنزیمی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده محسوب می‌شوند. در روش هیدرولیز اسیدی، معمولاً از اسیدهایی مانند اسید کلریدریک و اسید سولفوریک استفاده می‌شود. در طی این فرآیند، نواحی آمورف (بی‌شکل) سلولز نسبت به نواحی بلوری حساس‌تر بوده و سریع‌تر توسط اسید تخریب می‌شوند، در حالی که بخش‌های بلوری به دلیل ساختار منظم‌تر خود مقاومت بیشتری دارند. در نتیجه، با حذف فاز آمورف، نانوبلورهای سلولزی به‌عنوان محصول باقی می‌مانند. برای کاهش مصرف انرژی و همچنین بهبود ویژگی‌های نانوذرات تولیدی، اغلب از ترکیب روش‌های شیمیایی و مکانیکی استفاده می‌شود. در این رویکرد، پس از پیش‌تیمار شیمیایی، از روش‌های مکانیکی نظیر فراصوت، هم‌گن‌سازی، خردایش با نیتروژن مایع^۱، آسیاب‌کاری و اختلاط شدید بهره گرفته می‌شود. به‌عنوان نمونه، در یک مطالعه، روشی مبتنی بر هیدرولیز اسیدی همراه با فراصوت برای تولید نانوبلورهای سلولزی ارائه شده است. در این تحقیق، پس از یک پیش‌تیمار قلیایی اولیه، نمونه‌ها ابتدا در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه آسیاب و سپس در حالت تر با سرعت ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند تا سطح ویژه بیشتری برای انجام مؤثر هیدرولیز فراهم شود (Asrofi et al., 2017b). در ادامه، پس از هیدرولیز اسیدی با اسید کلریدریک ۵ مولار و انجام رنگبری با سدیم کلریت و اسید استیک، عملیات فراصوت به مدت ۲ ساعت (با توان نامشخص) برای تولید نانوبلورهای سلولزی از سنبل آبی انجام شد. نتایج نشان داد که شاخص بلورینگی از حدود ۷ درصد در سنبل آبی خام به ۷۳ درصد در محصول نهایی افزایش یافته است (Asrofi et al., 2017b).

^۱ Cryogenic crushing



شکل ۲. مراحل تولید انواع نانو سلولوز از مواد لیگنوسلولوزی سنبل آبی

همگن‌سازی و اعمال فراصوت نقش مهمی در جداسازی تجمعات سلولزی دارد، زیرا الیاف سلولزی تمایل بالایی به تجمع و تشکیل کلوخه دارند. اگرچه این تجمعات لزوماً تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر شاخص بلورینگی ندارند، اما بر ابعاد و یکنواختی نانوذرات اثرگذار هستند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که فراصوت می‌تواند قطر نانوبلورهای سلولزی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد، این موضوع احتمالاً ناشی از جداسازی الیاف منفرد تحت اثر ارتعاشات شدید است. برای مثال، در مورد سنبل آبی، پس از فراصوت‌دهی با توان ۶۰۰ وات به مدت ۱ ساعت، قطر نانوبلورهای سلولزی به حدود ۱۵ نانومتر کاهش یافته است، در حالی که در نبود فراصوت، ساختار حاصل بیشتر به میکروفیبریل‌های کوتاه با قطر حدود ۲ میکرومتر شباهت داشته است (Syafri et al., 2019).

• استخراج آنزیمی نانوبلورهای سلولزی از سنبل آبی

در برخی مطالعات، از آنزیم سلولاز برای تولید نانوبلورهای سلولزی از سنبل آبی استفاده شده است. در مقایسه با هیدرولیز اسیدی، این روش شرایط ملایم‌تری دارد و از نظر زیست‌محیطی نیز مطلوب‌تر است، ضمن اینکه می‌تواند به‌صورت یک مرحله‌ای انجام شود. با این حال، افزایش بیش از حد زمان واکنش می‌تواند منجر به آسیب به نواحی بلوری سلولز نیز شود. در یک مطالعه مشخص شده است که در بازه زمانی ۱۵ تا ۷۲۰ دقیقه برای تیمار آنزیمی، زمان بهینه واکنش حدود ۱۲۰ دقیقه بوده است (Juárez-Luna et al., 2019). در جمع‌بندی این بخش می‌توان گفت که روش غالب برای تولید نانوبلورهای سلولزی از سنبل آبی همچنان هیدرولیز اسیدی است، در حالی که روش‌های نوینی مانند استفاده از کاتالیزور تمپو^۱ برای اکسیداسیون سلولز، استفاده از حلال‌های یونی و نمک‌های فلزی هنوز به‌طور کامل مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار نگرفته‌اند.

• استخراج نانوالیاف سلولزی از سنبل آبی

در تولید نانوالیاف سلولزی معمولاً از اسیدهای قوی استفاده نمی‌شود، زیرا هدف اصلی حفظ طول زنجیره‌های سلولزی و جلوگیری از تخریب بیش از حد ساختار پلیمری است. به همین دلیل، عمدتاً از روش‌های مکانیکی شدید مانند همزن‌های پرسرعت، همگن‌سازی فشار بالا، فراصوت، آسیاب گلوله‌ای، پالایش روتور-استاتور و خردایش سرمایشی با نیتروژن مایع استفاده می‌شود (Smriti et al., 2023). در این میان، بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر تعداد سیکل‌ها، زمان فرآیند و میزان انرژی مصرفی اهمیت زیادی دارد. برای مثال، همگن‌سازی فشار بالا با ایجاد تنش‌های برشی شدید، فاصله بین ریزالیاف‌های سلولزی را افزایش داده و موجب جداسازی آن‌ها و در نتیجه افزایش سطح ویژه نانوالیاف می‌شود. با این حال، افزایش بیش از حد تعداد سیکل‌های همگن‌سازی می‌تواند منجر به کاهش درجه بلورینگی و درجه پلیمریزاسیون سلولز شده و در نهایت پایداری حرارتی محصول را نیز کاهش دهد (Smriti et al., 2023). این موضوع نشان می‌دهد که افزایش شدت فرآیند مکانیکی لزوماً به معنای بهبود کیفیت محصول نیست. در یک مطالعه، پس از تیمار قلیایی سنبل آبی، از مخلوط‌سازی پرسرعت استفاده

^۱ 2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl radical (TEMPO)

شد. نتایج نشان داد که مخلوط‌سازی به مدت ۱۵ دقیقه منجر به تولید نانوالیاف با قطر حدود ۱۰۰ نانومتر شده است، در حالی که افزایش زمان به ۲۵ دقیقه باعث کاهش قطر به حدود ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر و بهبود استحکام کاغذ حاصل گردیده است (Asrofi et al., 2017a). در مطالعه دیگری، پس از رنگبری و اعمال هیدرولیز اسیدی دو مرحله‌ای، تیمار فراصوت انجام شد که در نتیجه آن، شاخص بلورینگی از حدود ۵ درصد در ماده خام به حدود ۸۰ درصد در نانوالیاف سلولزی افزایش یافت (Asrofi et al., 2018). همچنین استفاده از اکسیداسیون تمپو پیش از فرآیند آسیاب‌کاری موجب کاهش قطر نانوالیاف، کاهش مصرف انرژی، افزایش استحکام کامپوزیت‌های حاصل و تقویت پیوندهای هیدروژنی شده است (Tanpichai et al., 2019). از سوی دیگر، برخی تیمارهای شیمیایی به صورت منفرد یا ترکیبی عملکرد بهتری در حذف لیگنین و حفظ سلولز نشان داده‌اند. به عنوان مثال، ترکیب کلریت سدیم و پراستیک اسید قادر است مقدار قابل توجهی از لیگنین را حذف کند، در حالی که تخریب سلولز در این شرایط نسبتاً محدود باقی می‌ماند. همچنین، روش‌هایی نظیر کربوکسی‌متیلاسیون، سولفات‌کردن و سوکسینیل‌اسیون هنوز به طور گسترده برای سنبل آبی بررسی نشده‌اند و می‌توانند از موضوعات مهم پژوهشی آینده باشند. در جمع‌بندی بحث تولید انواع نانوسلولز از سنبل آبی می‌توان گفت که مشابه سایر منابع لیگنوسلولزی، برای تولید نانوبلورهای سلولزی از سنبل آبی عمدتاً از روش‌های شیمیایی، به ویژه هیدرولیز اسیدی، استفاده می‌شود. در حالی که برای تولید نانوالیاف سلولزی بیشتر روش‌های مکانیکی یا ترکیبی شیمیایی - مکانیکی به کار می‌رود. مزیت مهم سنبل آبی، محتوای پایین لیگنین آن است که امکان استخراج نانوسلولز را با مصرف کمتر آب و مواد شیمیایی، زمان کوتاه‌تر و هزینه پایین‌تر فراهم می‌کند. با این وجود، پیش‌تیمارهای مختلف شامل روش‌های مکانیکی و شیمیایی نقش مهمی در حذف یا کاهش ناخالصی‌ها، لیگنین و همی‌سلولزها داشته و در نهایت به آزادسازی سلولز خالص و آماده‌سازی ساختار آن برای تولید نانوذرات کمک می‌کنند. در این میان، پیش‌تیمارهای زیستی مانند استفاده از آنزیم‌های تجزیه‌کننده لیگنین و همچنین روش‌های فیزیکی-شیمیایی نظیر انفجار بخار آب (Saputra et al., 2025) و انفجار دی‌اکسید کربن که از نظر زیست‌محیطی مطلوب‌تر هستند، که تاکنون برای سنبل آبی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

• مقایسه انواع نانوسلولز حاصل از سنبل آبی با سایر منابع لیگنوسلولزی

در جدول ۳، ویژگی‌های نانوسلولزهای مختلف شامل نانوبلورهای سلولزی و نانوالیاف سلولزی استخراج‌شده از سنبل آبی ارائه شده است (Smriti et al., 2023). یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی کیفیت نانوسلولز، قطر ذرات است. نتایج نشان می‌دهد که نانوسلولزهای حاصل از سنبل آبی معمولاً دارای قطر متوسط بوده و از این نظر در محدوده‌ای مشابه با نانوسلولزهای تولیدشده از سایر منابع لیگنوسلولزی قرار می‌گیرند.

جدول ۳. خواص نانوسلولزهای استخراج‌شده از گیاه سنبل آبی (Smriti et al., 2023).

نوع نانوسلولز	روش استخراج	قطر نانوذرات (نانومتر)	درصد بلورینگی
نانوبلورهای سلولزی	هیدرولیز اسیدی با اسید کلریدریک	۱۰-۴۰	۷۳
	هیدرولیز آنزیمی	۱۵/۶-۲۹/۴	۷۱
نانوالیاف سلولزی	اکسیداسیون تمپو	۵-۱۰	۸۶/۶
	همگن‌سازی فشار بالا	۱۹	۱۹

در کنار قطر، درجه بلورینگی نیز یکی از شاخص‌های مهم کیفیت به شمار می‌رود، زیرا با استحکام و خواص مکانیکی نانوسلولز ارتباط مستقیم دارد. بر اساس گزارش‌های مختلف، بلورینگی نانوسلولز سنبل آبی در حدود ۶۸ تا ۷۳ درصد قرار دارد که این مقدار در مقایسه با بسیاری از منابع گیاهی دیگر، در سطح مطلوب یا حتی بالاتر ارزیابی می‌شود. همچنین در یک مطالعه، دمای تخریب حرارتی اصلی نانوسلولز حاصل از سنبل آبی حدود ۳۱۹ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است که نسبت به بسیاری از نانوسلولزهای استخراج‌شده از سایر زیست‌توده‌های گیاهی مقدار بالاتری محسوب می‌شود (Smriti et al., 2023). به طور کلی، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نانوسلولز استخراج‌شده از سنبل آبی از نظر مورفولوژی، درجه بلورینگی، پایداری حرارتی و سهولت استخراج، عملکرد قابل قبولی دارد و در مقایسه با منابع لیگنوسلولزی رایج، می‌تواند گزینه‌ای مناسب و قابل توجه برای تولید نانوسلولز باشد (Smriti et al., 2023).

• کاربردهای زیست توده سنبل آبی و نانوذرات سلولزی حاصل از سنبل آبی

تاکنون، اصلی ترین کاربرد بالقوه گزارش شده برای نانوسلولز استخراج شده از سنبل آبی، استفاده از آن به عنوان عامل تقویت کننده در کامپوزیتها بوده است. با این حال، نتایج پژوهش های جدید نشان می دهد که این ماده ظرفیت بالایی برای کاربرد در حوزه های متنوع تر نیز دارد (Islam et al., 2021) در شکل ۳، دامنه بالقوه کاربردهای مواد فیبری و نانوسلولزهای حاصل از سنبل آبی نمایش داده شده است که بیانگر گستردگی نقش این مواد در مصارف رایج و فناوری های نوین است.



شکل ۳. کاربردهای بالقوه زیست توده سنبل آبی و نانوذرات سلولزی حاصل از آن

نانوسلولز سنبل آبی به دلیل ویژگی هایی مانند استحکام مکانیکی بالا، وزن کم، سطح ویژه زیاد و قابلیت ایجاد پیوندهای هیدروژنی، توانایی قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی پلیمرها دارد. بر همین اساس، مطالعات متعددی بر استفاده از این نانوسلولزها برای تقویت فیلم های نشاسته ای متمرکز بوده اند؛ با هدف توسعه بسته بندی های زیست تخریب پذیر و جایگزینی پلاستیک های متداول با کامپوزیت های سازگار با محیط زیست. نتایج این تحقیقات نشان داده است که افزودن نانوسلولز سنبل آبی موجب افزایش چشمگیر استحکام کششی فیلم ها شده و محصول نهایی علاوه بر بهبود خواص مکانیکی و حرارتی، قابلیت تجزیه زیستی نیز داشته و برای کاربرد در بسته بندی مواد غذایی مناسب است (Asrofi et al., 2018). علاوه بر فیلم های نشاسته ای، استفاده از نانوبلورهای سلولزی سنبل آبی در ماتریس های پلیمری مختلف مانند پلیمرهای طبیعی، الاستومرها، اتیلن-وینیل استات و فیلم های پلی وینیل استات-ژلاتین نیز موجب افزایش قابل توجه مقاومت کششی و مدول الاستیک شده و هم زمان کاهش جذب آب و نفوذپذیری بخار آب را به همراه داشته است (Behera et al., 2025; Tanpichai & Wimolmala, 2022). در مطالعه ای دیگر، افزودن نانوالیاف سنبل آبی به خمیر کاغذ باز یافتی موجب بهبود استحکام مکانیکی، افزایش پایداری حرارتی و ارتقای کیفیت کاغذ تولیدی شده است؛ موضوعی که اهمیت بالایی در صنعت بسته بندی دارد (Sahlie et al., 2022). فراتر از نقش تقویت کنندگی، پژوهش ها نشان داده اند که اصلاح سطحی نانوالیاف سنبل آبی با پلی پیرول می تواند منجر به تولید آئروژل های رسانا با هدایت الکتریکی در محدوده ۰/۱ تا ۲۳/۶ زیمنس بر سانتی متر شود که این ویژگی، پتانسیل کاربرد در تجهیزات الکترونیکی، حسگرها و میکروالکترونیک را فراهم می کند (Tanpichai et al., 2019). همچنین، نانوکاغذهای تولید شده از این نانوالیاف دارای استحکام کششی حدود ۳/۷۳ مگاپاسکال و ضریب انبساط حرارتی پایین هستند که آن ها را برای کاربردهای مهندسی پیشرفته مناسب می سازد (Tanpichai et al., 2019). در حوزه انرژی نیز، استفاده از نانوالیاف سنبل آبی به عنوان جداکننده در باتری ها موجب بهبود ترشوندگی سطح، تسهیل انتقال یون ها و در نتیجه ارتقای عملکرد الکتروشیمیایی باتری ها شده است (Beg et al., 2021).

از سوی دیگر، بررسی‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که در فرآیند جذب فلزات سنگین مانند سرب از پساب‌های صنعتی، نانوالیاف سلولزی سنبل آبی عملکرد بهتری نسبت به نانوبلورهای سلولزی دارند و ظرفیت جذب بالاتری را ارائه می‌دهند (Ramos-Vargas et al., 2020). در جمع‌بندی می‌توان گفت کاربردهای نانوسلولز حاصل از سنبل آبی تاکنون در حوزه‌های متنوعی از جمله صنایع کامپوزیت، پلیمرها، لاستیک و نانوکاغذ، انرژی (جداکننده‌های باتری و مواد رسانا)، محیط زیست (تصفیه آب، جذب روغن و نفت و حذف فلزات سنگین) و همچنین صنعت بسته‌بندی (فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌تخریب‌پذیر) مورد بررسی قرار گرفته است (Bajpai & Nemade, 2024).

۴- چالش‌ها و چشم‌انداز آینده

با وجود رشد قابل توجه پژوهش‌ها در زمینه استخراج و کاربردهای انواع مختلف نانوسلولز از سنبل آبی در سال‌های اخیر، این حوزه همچنان در مراحل اولیه توسعه قرار دارد و ظرفیت بالایی برای تحقیقات بنیادی، بهینه‌سازی فرآیندها و تجاری‌سازی صنعتی دارد. به عبارت دیگر، سنبل آبی هنوز به‌طور کامل به‌عنوان یک منبع صنعتی پایدار برای تولید نانوسلولز تثبیت نشده است (Sultana et al., 2024). یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود، تمرکز گسترده پژوهش‌ها بر هیدرولیز اسیدی است. این روش اگرچه کارآمد است، اما محدودیت‌های قابل توجهی از جمله مصرف بالای اسید، نیاز به مراحل شست‌وشوی متعدد، تولید پساب‌های اسیدی، خوردگی تجهیزات و هزینه بالای بازیافت مواد شیمیایی را به همراه دارد. از این رو، توسعه روش‌های جایگزین پایدارتر و سازگار با محیط زیست ضروری است. روش‌هایی مانند اکسیداسیون تمپو، استفاده از حلال‌های یونی، حلال‌های یوتکتیک عمیق، فرآیندهای آنزیمی، روش‌های الکتروشیمیایی، تیمارهای پلاسمایی و رویکردهای ترکیبی سبز می‌توانند به‌طور قابل توجهی مصرف انرژی و مواد شیمیایی و اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. چالش مهم دیگر، محدود بودن اغلب مطالعات به مقیاس آزمایشگاهی است. در بسیاری از این پژوهش‌ها، داده‌های دقیقی درباره هزینه واقعی تولید، مصرف انرژی، مصرف آب، هزینه خشک‌سازی، هزینه حمل زیست‌توده و مدیریت پساب ارائه نشده است. نبود این اطلاعات، ارزیابی اقتصادی و امکان‌سنجی صنعتی را با دشواری مواجه می‌سازد. علاوه بر این، تغییرپذیری ویژگی‌های زیست‌توده سنبل آبی و هزینه‌های مرتبط با مقیاس‌پذیری صنعتی از دیگر موانع مهم در مسیر توسعه کاربردی این ماده محسوب می‌شوند. در این میان، استفاده از رویکرد پالایشگاه زیستی یکپارچه^۱ می‌تواند نقش کلیدی در تجاری‌سازی پایدار این زیست‌توده ایفا کند (Abdulkhani et al., 2024; Ahmed et al., 2025).

۵- نتیجه‌گیری

سنبل آبی، که اغلب به‌عنوان یک علف هرز مهاجم و مشکل‌ساز زیست‌محیطی شناخته می‌شود، در واقع می‌تواند به‌عنوان منبعی ارزان، در دسترس و غنی برای تولید نانوسلولز مورد استفاده قرار گیرد. از مهم‌ترین مزایای آن می‌توان به محتوای مناسب سلولز، مقدار پایین لیگنین، فراوانی بالا، هزینه پایین تأمین ماده اولیه و همچنین نقش مثبت آن در پاکسازی محیط زیست از طریق برداشت گیاه اشاره کرد. نانوسلولز حاصل از این منبع نیز خواص مطلوبی در بهبود استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها نشان داده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که یک معضل زیست‌محیطی می‌تواند به فرصتی ارزشمند برای تولید مواد پیشرفته تبدیل شود. اگرچه در بسیاری از مطالعات گذشته، استخراج نانوسلولز عمدتاً مبتنی بر روش‌های شیمیایی و به‌ویژه هیدرولیز اسیدی بوده است، اما در راستای توسعه پایدار، حرکت به سمت روش‌های سازگارتر با محیط زیست ضروری است. در این میان، فرآیندهای زیستی مانند هیدرولیز آنزیمی می‌توانند گزینه‌ای امیدبخش باشند، زیرا علاوه بر کاهش مصرف مواد شیمیایی خطرناک، موجب کاهش آلودگی زیست‌محیطی و هزینه‌های فرآیندی نیز می‌شوند. به‌طور کلی، مطالعات نشان می‌دهند که سنبل آبی به دلیل نسبت مناسب سلولز و لیگنین پایین، گزینه‌ای مناسب برای استخراج نانوسلولز است. تبدیل این زیست‌توده از یک تهدید اکولوژیک به ماده‌ای ارزشمند برای تولید نانوکامپوزیت‌های شفاف، الکترودهای باتری‌های سدیم-یون و سایر مواد پیشرفته، نمونه‌ای روشن از موفقیت رویکرد اقتصاد چرخشی به شمار می‌رود. در نهایت، ادغام فرآیند استخراج نانوسلولز با سیستم‌های تولید کاغذ و تولید کمپوست می‌تواند از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر بوده و گامی مؤثر در مسیر توسعه پایدار محسوب شود.

¹ Integrated Biorefinery

- Abdulkhani, A., Khorasani, Z., Hamzeh, Y., Momenbeik, F., Zadeh, Z. E., Sun, F., ... & Zhang, X. (2024). Valorization of bagasse alkali lignin to water-soluble derivatives through chemical modification. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(7), 8639-8647.
- Ahmed, S., et al. (2025). Nanocellulose: A novel pathway to sustainable agriculture, environmental protection, and circular bioeconomy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 285, 137979.
- Ajithram, A., Jappes, J. W., Chithra, G. K., & Daphne, R. (2023). Serious environmental threat water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) plant natural fibress: Different extraction methods and morphological properties for polymer composite applications. *Materials Today: Proceedings*.
- Al Hadeethi, M. A., et al. (2017). Anatomical features of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms growing in Iraq. In *Proceedings of the 8th International Conference on Agricultural, Environment, Biology and Medical Sciences (AEBMS-2017)* (pp. n.p.). Dubai, UAE.
- Asrofi, M., Abrial, H., Kasim, A., & Pratoto, A. (2017a). XRD and FTIR studies of nanocrystalline cellulose from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) fiber. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 29, 9-16.
- Asrofi, M., Abrial, H., Kasim, A., & Pratoto, A. (2017b). Characterization of the microfibrillated cellulose from water hyacinth pulp after alkali treatment and wet blending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 204, 012018.
- Asrofi, M., Abrial, H., Kasim, A., Pratoto, A., Mahardika, M., & Hafizulhaq, F. (2018). Mechanical properties of a water hyacinth nanofiber cellulose reinforced thermoplastic starch bionanocomposite: Effect of ultrasonic vibration during processing. *Fibers*, 6(40).
- Bajpai, S., & Nemade, P. R. (2024). Silane and fluorine free facile hydrophobicization of water hyacinth biomass for oil-water separations. *Chemosphere*, 358, 142164.
- Beg, M., Sun, D., Popescu, C.-M., et al. (2021). Processing and characterization of water hyacinth cellulose nanofibres-based aluminium-ion battery separators. In *Proceedings of the 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Portsmouth, UK.
- Behera, D., Pattnaik, S. S., Patra, S. S., Barick, A. K., Pradhan, J., & Behera, A. K. (2025). Development and characterization of water hyacinth reinforced thermoplastic starch as sustainable biocomposites. *RSC Sustainability*, 3(4), 1807-1818.
- George, S., et al. (2023). Extraction and characterization of fibers from water hyacinth stem using a custom-made decorticator. *Journal of Natural Fibers*, 20(2), 2212927.
- Hadad, H. R., et al. (2009). Nickel and phosphorous sorption efficiencies, tissue accumulation kinetics and morphological effects on *Eichhornia crassipes*. *Ecotoxicology*, 18, 504-513.
- Islam, M. N., Rahman, F., Papri, S. A., Faruk, M. O., Das, A. K., Adhikary, N., ... & Ahsan, M. N. (2021). Water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.) as an alternative raw material for the production of bio-compost and handmade paper. *Journal of Environmental Management*, 294, 113036.
- Jonoobi, M., Oladi, R., Davoudpour, Y., et al. (2015). Different preparation methods and properties of nanostructured cellulose from various natural resources and residues: A review. *Cellulose*, 22, 935-969.
- Jose, J., et al. (2019). Nanocellulose based functional materials for supercapacitor applications. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 4, 333-340.
- Juárez-Luna, G. N., Favela-Torres, E., Quevedo, I. R., & Batina, N. (2019). Enzymatically assisted isolation of high-quality cellulose nanoparticles from water hyacinth stems. *Carbohydrate Polymers*, 220, 110-117.
- Laishram, C., et al. (2025). Fibers from ornamental crops: An alternative to commercial fibers. *Journal of Scientific Research and Reports*, 31(4), 130-141.
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40, 3941-3994.
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., Hofifah, S. N., et al. (2024). Progress in the utilization of water hyacinth as effective biomass material. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 24521-24568.
- Ramos-Vargas, S., Huirache-Acuña, R., Quiñones, G. R., & Cortés-Martínez, R. (2020). Effective lead removal from aqueous solutions using cellulose nanofibers obtained from water hyacinth. *Water Supply*, 20, 2715-2736.
- Sahlie, M. E., Zeleke, T. S., & Yihun, F. A. (2022). Water hyacinth: A sustainable cellulose source for cellulose nanofiber production and application as recycled paper reinforcement. *Journal of Polymer Research*, 29, 1-11.

- Saputra, A. M. A., Piliang, A. F. R., et al. (2025). Optimising cellulose nanofiber extraction from water hyacinth stems: Effects of steam explosion pretreatment and ultrasonication time. *JCIS Open*, 17, 100129.
- Sari, N. H., Suteja, S., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2023). A review on cellulose fibers from *Eichhornia crassipes*: Synthesis, modification, properties and composites. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2162179.
- Sierra-Carmona, C. G., et al. (2022). Alternative uses of water hyacinth (*Pontederia crassipes*) from a sustainable perspective: A systematic literature review. *Sustainability*, 14, 3931.
- Smriti, S. A., Haque, A. N. M. A., Khadem, A. H., et al. (2023). Recent developments of nanocellulose extraction from water hyacinth: A review. *Cellulose*, 30(14), 8617-8641.
- Sultana, S., Sonia, Z. A., Mahmud, M., Mottakin, M., Bin Haider, J., Ahmed, S., & Hossen, M. M. (2024). An investigation of cellulose, hemicellulose, and lignin co-extraction from water hyacinth. *Adv. J. Chem. Sect. A*, 7, 75-88.
- Syafri, E., Yulianti, E., Abral, H., et al. (2019). Effect of sonication time on thermal stability, moisture absorption, and biodegradation of water hyacinth nanocellulose filled composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 6223-6231.
- Tanpichai, S., & Wimolmala, E. (2022). Facile TEMPO-mediated oxidation for cellulose nanofibers and nanocomposites. *Journal of Natural Fibers*, 19, 10094-10110.
- Tanpichai, S., Biswas, S. K., Witayakran, S., & Yano, H. (2019). Water hyacinth: A sustainable lignin-poor cellulose source for cellulose nanofibers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7, 18884-18893.
- Vale, A. C., Leite, L., Pais, V., et al. (2024). Extraction of natural-based raw materials towards sustainable man-made organic fibers. *Polymers*, 16(24), 3602.
- Wembe, B. D., et al. (2023). Extraction and physicochemical and thermomechanical characterizations of water hyacinth fibers. *International Journal of Polymer Science*, 6652978.
- Yan, S., & Guo, J. Y. (2017). *Water hyacinth: Environmental challenges, management and utilization*. CRC Press