Packaging Sciences and Techniques
Vol. 16, No. 2, Summer 2025, Serial No. 62
ISSN: 2228-6675 , E-ISSN: 2980-7824

Application of Seaweed-Derived Biopolymers in the Development of Bio-Based, Active, and Intelligent Food Packaging

Seyed Mahdi Ojagh*[1], Reza Rezanejad[2]
[1]Correspondence: Associate Proffesor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email Address: ojagh@ut.ac.ir
[2]Assistant Proffesor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email Address: rezanezhad@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 23 June 2025
Received in revised form: 18 August 2025
Accepted: 11 September 2025
Available online: 21 September 2025

Keywords:
Algal Biopolymers
Marine Polysaccharides
Active Packaging
Intelligent Packaging

ABSTRACT

In recent years, marine algae-derived biopolymers—particularly polysaccharides such as agar, alginate, and carrageenan—have gained significant attention as sustainable alternatives to synthetic polymers in food packaging. These biopolymers are biodegradable, renewable, and biocompatible, capable of forming films and coatings with antimicrobial activity, moisture retention, and UV barrier properties. Despite limitations such as high moisture sensitivity and weak mechanical performance, their properties can be improved through technologies including the addition of nanoparticles, blending with other polymers, incorporation of natural essential oils, and multilayer film design. This review highlights the characteristics of algal biopolymers, strategies to enhance their functional properties, and their applications in active and intelligent packaging. Utilizing these biopolymers offers a promising path toward the development of safe, eco-friendly, and efficient packaging systems in the food industry.

Cite this article: S. M. Ojagh and R. Rezanejad, "Application of Seaweed-Derived Biopolymers in the Development of Bio-Based, Active, and Intelligent Food Packaging," Journal of Packaging Sciences and Techniques, vol. 16, no. 2, pp. 73-85, 2025. DOR: 20.1001.1.22286675.1404.16.62.6.2

Publisher: Imam Hossein University.
© The Author(s).

Abstract

Introduction

In recent years, seaweed-derived biopolymers—particularly polysaccharides such as agar, alginate, and carrageenan—have emerged as sustainable and eco-friendly alternatives to synthetic polymers in food packaging. Marine macroalgae, including red, brown, and green species, are rich in renewable polysaccharides capable of forming biodegradable and biocompatible films with effective gas, water vapor, and UV barriers. These polymers can also impart antimicrobial and antioxidant properties, thus extending the shelf life and safety of packaged foods.

Result and Discussion

Despite their promising functionality, large-scale application of algal polysaccharides faces several industrial challenges, including high extraction and purification costs, lengthy drying processes, poor moisture resistance, brittleness, and limited mechanical strength. Various strategies have been proposed to overcome these drawbacks, such as blending with other biopolymers (e.g., chitosan, starch, gelatin), incorporating nanoparticles (ZnO, TiO_2, Ag, nanocellulose), using natural plasticizers (glycerol, sorbitol), and developing multilayer film architectures. These modifications significantly enhance mechanical strength, barrier efficiency, flexibility, and thermal stability of algal-based films. Moreover, integrating natural bioactive compounds—such as essential oils, anthocyanins, and bacteriocins—has led to the development of active and intelligent packaging systems.

In active packaging, algal biopolymers serve as carriers for antioxidant and antimicrobial agents, controlling their release and thereby inhibiting microbial growth and lipid oxidation. For instance, agar- and alginate-based films containing cinnamon essential oil, nisin, or metallic nanoparticles have demonstrated strong antibacterial activity against *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli*. In intelligent packaging, colorimetric films made from these biopolymers respond to environmental changes (pH, temperature, volatile amines), allowing real-time

freshness monitoring. A notable example is the pectin–sodium alginate–xanthan film containing raspberry pomace extract, which exhibited visible color transitions (pink–red–brown–blue–green) across the pH range 1–13, particularly sensitive within pH 5–10, making it suitable for protein-rich foods.

Conclusion

Overall, algal biopolymers offer a promising pathway toward bio-based, active, and intelligent packaging systems that reduce dependence on fossil resources, minimize plastic pollution, and enhance food safety and sustainability. Future research should focus on optimizing extraction and drying technologies, scaling up industrial processes, and establishing safety and standardization frameworks to facilitate the commercial adoption of these marine-derived biopolymers in the food packaging industry.

«علوم و فنون بسته‌بندی»
سال شانزدهم، شماره ۶۲، تابستان ۱۴۰۴؛ ص ۸۵-۷۳
شاپای چاپی: ۲۲۲۸-۶۶۷۵| شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۷۸۲۴

کاربرد بیوپلیمرهای استخراج‌شده از جلبک‌های دریایی در توسعه بسته‌بندی‌های زیست‌پایه، فعال و هوشمند مواد غذایی

سید مهدی اجاق[1*]، رضا رضانژاد[2]

[1] دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: ojagh@ut.ac.i

[2] استادیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: rezanezhad@ut.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، بیوپلیمرهای استخراج‌شده از جلبک‌های دریایی، به‌ویژه پلی‌ساکاریدهایی مانند آگار، آلژینات و کاراگینان، به‌عنوان جایگزین‌های پایدار برای پلیمرهای مصنوعی در بسته‌بندی مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این بیوپلیمرها زیست‌تخریب‌پذیر، تجدیدپذیر و زیست‌سازگار بوده و قادر به تشکیل فیلم‌ها و پوشش‌هایی با ویژگی‌های ضدمیکروبی، حفظ رطوبت و ممانعت در برابر UV هستند. هرچند این مواد دارای محدودیت‌هایی همچون حساسیت به رطوبت و خواص مکانیکی ضعیف‌اند، ولی به کمک فناوری‌هایی نظیر افزودن نانوذرات، ترکیب با سایر پلیمرها، استفاده از اسانس‌های طبیعی و طراحی فیلم‌های چندلایه، می‌توان خواص آن‌ها را بهبود بخشید. در این مقاله، ضمن مرور ویژگی‌های بیوپلیمرهای جلبکی، به راهکارهای تقویت خواص فیزیکی و کاربردهای آن‌ها در بسته‌بندی فعال و هوشمند پرداخته شده است. استفاده از این بیوپلیمرها می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه سامانه‌های بسته‌بندی ایمن، زیست سازگار و کارآمد در صنعت غذایی باشد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی ترویجی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

کلیدواژه‌ها:
بیوپلیمرهای جلبکی
پلی‌ساکاریدهای دریایی
بسته‌بندی فعال
بسته‌بندی هوشمند

استناد: اجاق، سیدمهدی، رضانژاد،رضا، " کاربرد بیوپلیمرهای استخراج‌شده از جلبک‌های دریایی در توسعه بسته‌بندی‌های زیست‌پایه، فعال و هوشمند مواد غذایی"، نشریه علوم و فنون بسته‌بندی، دوره ۱۶، شماره۶۲، صفحات ۸۵-۷۳، ۱۴۰۴. DOR: 20.1001.1.22286675.1404.16.62.6.2

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).
© نویسندگان.
OPEN ACCESS

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به‌عنوان جایگزینی برای پلاستیک‌های سنتی، محبوبیت بیشتری پیدا کرده‌اند. قابلیت تجزیه‌پذیری یک مزیت واقعی در صنعت بسته‌بندی به شمار می‌آید، به ویژه زمانی که نگهداری کوتاه مدت مواد غذایی مورد نظر می‌باشد [۱]، به راحتی می‌توان بدون نگرانی‌های زیست محیطی به همراه سایر باقی مانده ماده غذایی آن‌ها را دور ریخت تا در طبیعت تجزیه شوند. در توسعه‌ی بسته‌بندی مواد غذایی، پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌های منشأ دریایی، به‌ویژه در تولید فیلم‌ها و پوشش‌ها برای بسته‌بندی‌های بادوام توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۲]. برای افزایش کیفیت مواد غذایی و بهبود ایمنی میکروبی، می‌توان از بسته‌بندی‌های دوستدار محیط‌زیست استفاده کرد که از بیوپلیمرهای دریایی ساخته می‌شوند [۳]. از این پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها برای تولید پوشش‌ها و فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیری که دارای خواص مکانیکی لازم برای محافظت از ماده‌ی غذایی در برابر عوامل مختلف فساد هستند، استفاده می‌شود. این مواد که جهت بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند به صورت محلول‌های مختلف و به روش‌های مختلف جهت بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند. برای ساخت مواد بسته‌بندی از بیوپلیمرهای دریایی، محلول‌های مختلف از آن‌ها تهیه می‌شود و سپس از طریق روش‌هایی مانند تهیه لفاف از آن‌ها، غوطه‌وری، پوشش‌دهی، اسپری کردن و یا برس‌زنی در مواد غذایی به‌کار گرفته می‌شوند [۴،۵].

امروزه، فناوری‌های نگهداری مواد غذایی با چالش‌های فراوانی در افزایش ماندگاری انواع مختلف مواد غذایی از جمله میوه‌ها، سبزیجات، ماهی، گوشت و محصولات یخچالی مواجه هستند [۶،۷،۸,۹]. از مهم‌ترین این چالش‌ها مشکلات زیست محیطی مرتبط با پلیمرهای مصنوعی مورد استفاده به عنوان روکش یا لفاف بسته‌بندی می‌باشد، لذا در سال‌های اخیر، استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی ساخته‌شده از بیوپلیمرها، به‌ویژه بیوپلیمرهای خوراکی با درجه غذایی، به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است [۱۰].

در چند دهه‌ی گذشته، استفاده از پوشش‌ها و فیلم‌های پلیمری طبیعی به‌عنوان مواد بسته‌بندی، به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. بیوپلیمرهای دریایی و به ویژه پلیمرهای جلبکی در توسعه‌ی مواد بسته‌بندی، به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. همانطور که در بالا اشاره شد عمده کاربرد پلیمرهای زیستی با منشأ دریایی برای تولید فیلم‌ها و پوشش‌های بسته‌بندی مواد غذایی (به صورت اسپری، لفاف و یا غوطه‌وری در محلول حاوی پلیمر) است و هدف اصلی از این کار، افزایش ماندگاری مواد غذایی بسته‌بندی شده است [۱۱]، لذا پلی‌ساکاریدهای دریایی با منشأ جلبکی مانند، آلژینات [1]، آگار [2] و کاراگینان [3] و ... که قابلیت محافظت از مواد غذایی در برابر آلودگی و فساد را دارند، می‌توانند در تولید فیلم‌ها و پوشش‌های بسته‌بندی غذایی کاربرد زیادی داشته و موجب افزایش ماندگاری و بهبود ویژگی‌های کیفی مواد غذایی شوند (جدول ۲) [۱۲]. یکی از بیوپلیمرهای بالقوه، از جلبک قرمز استخراج می‌شود و به نام آگار شناخته می‌شود. فیلم آگار به‌عنوان یک جایگزین محبوب و دوستدار محیط زیست برای بسته‌بندی غذایی پلاستیکی شناخته شده است [۷،۱۳،۱۴،۱۵،۱۶]. ویژگی‌های فیلم‌های آگار در سال‌های اخیر به‌طور قابل‌توجهی با استفاده از روش‌های مختلف بهبود یافته‌اند تا دامنه کاربرد آن‌ها گسترش یابد. به‌عنوان مثال، برای تقویت ساختار این فیلم‌ها از نانومواد و افزودن پلاستی‌سایزرها [4] (نرم‌کننده‌ها)، ترکیبات آب‌گریز یا عوامل ضدباکتریایی استفاده شده است (جدول ۳). ترکیبات فعال فراوانی، به‌ویژه اسانس‌های روغنی [5] از جمله نعناع، بابونه، زیره، ترخون، شوید و دارچین به فیلم‌های آگار افزوده شده‌اند. طبق گزارش عبدالله‌زاده و همکاران [۱۷]، این فیلم‌ها در برابر باکتری لیستریا مونوسایتوژنز [6] مؤثر عمل کرده‌اند. در نوعی فیلم آگار بسیار شفاف، آلژینات، کلاژن [7]، نانوذرات نقره و عصاره دانه گریپ‌فروت وجود داشت. این فیلم توانایی قابل‌توجهی در حفظ رطوبت و حذف پرتو فرابنفش (UV) [8] از خود نشان داد. علاوه بر این، فیلم‌های ترکیبی مذکور در برابر باکتری‌های بیماری‌زای مواد غذایی از نوع گرم‌مثبت باکتری لیستریا مونوسایتوژنز و گرم‌منفی ای کوآلی [9] اثر ضدباکتریایی چشمگیری از خود نشان دادند [۱۵]. در مقیاس آزمایشگاهی فعلی و پیش از گسترش به مقیاس صنعتی، در فرایند تولید فیلم‌های آگار، چالش‌هایی وجود دارد که باید برطرف شوند؛ از جمله زمان خشک شدن طولانی، ناتوانی در تولید فیلم‌های پیوسته، و کنترل دقیق ضخامت فیلم. برای تجاری‌سازی مواد بسته‌بندی غذایی مبتنی بر آگار، مطالعات بیشتری در مقیاس صنعتی و تجاری مورد نیاز است [۱۳].

به طور کلی بسته‌بندی‌های ساخته‌شده بر پایه بیوپلیمرهای دریایی دارای ویژگی‌های فناورانه‌ای هستند؛ با این حال، کارایی آن‌ها در حال حاضر نسبت به پلیمرهای مصنوعی کمتر بوده و همچنان

[1] Alginate
[2] Agar
[3] Carrageenan
[4] Plasticizers
[5] essential oils
[6] L. monocytogenes
[7] Collagen
[8] Ultraviolet light
[9] E. coli

توسعه نیافته باقی مانده است [۱۸]. به همین دلیل، بسیاری از پژوهشگران تلاش‌های گسترده‌ای انجام می‌دهند تا با استفاده از بیوپلیمرهای مقرون‌به‌صرفه، در دسترس و تجدیدپذیر راه‌حل‌هایی برای بسته‌بندی مواد غذایی با ویژگی‌های حرارتی و ممانعتی مناسب ارائه دهند [۱۱،۱۹،۲۰،۲۱،۲۲]. در مطالعه حاضر ضمن معرفی بیوپلیمرهای جلبکی و خواص آن ها به راهکارهای مورد استفاده در بهبود خواص این بیوپلمرها جهت استفاده گسترده‌تر در صنعت بسته‌بندی و کاربرد به صورت بسته‌بندی فعال و هوشمند خواهیم داشت.

جدول (۱): رده‌بندی جلبک‌های دریایی، ویژگی‌ها، کاربردها

نوع جلبک	رده	ساختار سلولی	رنگدانه‌ها	ویژگی‌های کلیدی	کاربردهای مهم
میکرو جلبک‌ها	دیاتوم‌ها، دینوفلاژله‌ها، سیانوباکتری‌ها	تک سلولی	کلروفیل a, c; کارتنوئیدها؛ فیکوبیلی‌پروتئین‌ها	فتوسنتز بالا، تولید اکسیژن، سرعت رشد بالا، زیست‌توده باارزش	تولید بیودیزل، مکمل غذایی، آنتی‌اکسیدان، تصفیه آب، داروسازی
ماکرو جلبک‌ها (سبز)	کلروفیت ها	چند سلولی	کلروفیل a و b	شباهت زیاد به گیاهان خشکی، رشد در نواحی کم‌عمق و روشن	تولید مکمل غذایی، داروسازی، بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر
ماکرو جلبک‌ها (قهوه‌ای)	فائوفیت ها	چند سلولی	کلروفیل a ، c؛ فوکوکسانتین (قهوه‌ای)	حاوی آلژینات؛ مقاومت مکانیکی بالا؛ مناسب برای محیط‌های خنک و مواج	استخراج آلژینات، تولید کود زیستی، صنایع غذایی (قوام‌دهنده و بسته‌بندی زیستی)
ماکرو جلبک‌ها (قرمز)	رادوفیت ها	چند سلولی	کلروفیل a ؛ فیکواریترین، فیکوسیانین	رشد در اعماق بیشتر؛ مقاومت به نور کم؛ غنی از کاراگینان و آگار	استخراج آگار و کاراگینان، داروسازی، بسته‌بندی مواد غذایی، آنتی‌باکتریال
سیانوباکتری‌ها	سیانوباکترها	تک سلولی	کلروفیل a ، فیکوسیانین	فتوسنتز بالا، تثبیت نیتروژن، توانایی تولید متابولیت‌های ثانویه مفید	مکمل‌های غذایی (مثلاً اسپیرولینا)، تولید زیست‌سوخت(بیودیزل)، زیست‌داروها

۲- رده‌بندی و پراکنش جغرافیایی جلبک‌های دریایی

جلبک‌های دریایی موجودات اتوتروف[1] (خودپرورد) هستند که در محیط‌های دریایی زندگی می‌کنند و ممکن است ریز (میکرو) یا درشت (ماکرو) باشند. میکروجلبک‌ها شامل دینوفلاژله‌ها[2]، دیاتوم‌ها[3]، و سیانوباکتری‌ها[4] (جلبک‌های سبز–آبی) هستند (جدول ۱) و به‌صورت تک‌سلولی وجود دارند، در حالی که ماکروجلبک‌ها که با نام جلبک‌های دریایی[5] نیز شناخته می‌شوند، چندسلولی بوده و شامل جلبک‌های سبز، قهوه‌ای و قرمز هستند. میکروجلبک‌ها، نقش حیاتی در تنوع زیستی زیردریا و تولید اکسیژن ایفا می‌کنند و به‌عنوان واحدهای بنیادی در بوم سازگان‌های دریایی، دارای کاربردهای صنعتی متنوعی هستند. علاوه بر نقش اکولوژیکی مهم، جلبک‌های دریایی به‌طور مؤثر در صنایع غذایی، دارویی و سوخت‌های زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، آن‌ها منابع مهمی از جذب کربن آبی[6] به‌شمار می‌آیند که در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی نقش دارند. برای بهره‌برداری پایدار و حفاظت از جلبک‌های دریایی، لازم است که رده‌بندی زیستی، ترکیبات زیست‌فعال، و پراکنش محیطی و جغرافیایی آن‌ها به‌درستی شناخته شوند [۲۳،۲۴].

[1] autotroph
[2] dinoflagellida
[3] diatom
[4] cyanobacteria
[5] seaweeds
[6] blue carbon

۳- استفاده از بیوپلیمرهای استخراج‌شده از جلبک‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی

در سال‌های اخیر، استخراج و کاربرد بیوپلیمرهای طبیعی از منابع دریایی، به‌ویژه جلبک‌ها، نگاه‌های زیادی را در توسعه بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر و ایمن برای مواد غذایی به خود جلب کرده است. جلبک‌ها، به‌عنوان منابعی غنی از پلی‌ساکاریدهایی همچون آگار، آلژینات و کاراگینان، امکان تولید فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی را با ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مطلوب فراهم می‌آورند [۲۵].

یکی از پلیمرهای پرکاربرد در این حوزه، آگار استخراج‌شده از جلبک‌های قرمز است که به دلیل شفافیت، ویژگی‌های ممانعتی نسبت به اکسیژن و قابلیت زیست‌سازگاری، در ساخت فیلم‌های بسته‌بندی غذایی عملکرد موفقی داشته است. به گزارش مصطفوی و زئیم (۲۰۲۰)، افزودن ترکیبات فعال مانند نانوذرات نقره، روغن‌های اسانسی (نعناع، بابونه، دارچین)، یا عصاره هسته گریپ‌فروت به فیلم‌های آگار، موجب بهبود خواص ضدباکتریایی این فیلم‌ها در برابر باکتری‌های گرم‌مثبت و گرم‌منفی شده است [۲۵].

جدول(۲): پلی‌ساکاریدهای استخراج‌شده از جلبک‌های دریایی، ویژگی‌ها، کاربرد در بسته‌بندی زیستی

نام پلی‌ساکارید	منبع جلبکی	ویژگی‌های ساختاری و عملکردی	نوع بسته‌بندی قابل تولید	خواص عملکردی در بسته‌بندی
فوکوییدان[۳]	جلبک‌های قهوه‌ای[۲]	پلی‌ساکارید سولفاته با ساختارهای مختلف؛ شامل گلوکورونیک اسید، فوکوز سولفاته، گالاکتوز	پوشش فعال[۱]	خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدویروسی، ضدسرطان، ضدباکتری
کاراگینان	جلبک‌های قرمز[۴]	پلی‌ساکارید سولفاته با سه نوع اصلی: کاپا، آیوتا، و لامبدا	فیلم خوراکی، پوشش زیست‌تخریب‌پذیر	ژل‌دهی، ضخیم‌کنندگی، پایدارسازی، مقاومت در برابر گاز
آلژینات	جلبک‌های قهوه‌ای[۵]	زنجیره‌ای از مانورونیک و گولورونیک اسید؛ یون‌پذیر با Ca^{2+}	فیلم و فیلم‌های هوشمند	ویژگی‌های مکانیکی بالا، نفوذپذیری کم به گاز، زیست‌تخریب‌پذیری بالا
آگار	جلبک‌های قرمز[۶]	زنجیره‌های گالاکتوز متناوب، قابلیت تشکیل ژل قوی	فیلم خوراکی، پوشش زیستی	شفافیت بالا، قابلیت کنترل رطوبت، توانایی حمل ترکیبات فعال
اولوان[۸]	جلبک‌های سبز[۷]	پلی‌ساکارید سولفاته با گلوکورونیک و رامونوز	فیلم زیست‌تخریب‌پذیر، بسته‌بندی فعال	آنتی‌اکسیدان، ضدالتهاب، عملکرد ضدباکتری

[1] Active coating
[2] Brown algae
[3] Fucoidan
[4] Rhodophyta
[5] Phaeophyceae
[6] Gelidium, Gracilaria
[7] Ulva spp
[8] Ulvan

همچنین، این فیلم‌ها خاصیت حفظ رطوبت و جلوگیری از عبور ماوراء بنفش را نیز از خود نشان داده‌اند. از سوی دیگر، مطالعه مروری اخیر توسط امره و همکاران (۲۰۲۵) نشان داده که سایر پلی‌ساکاریدهای جلبکی مانند آلژینات و کاراگینان نیز در کنار آگار، توانایی تشکیل فیلم‌های پایدار را دارند و می‌توان آن‌ها را با سایر بیوپلیمرها (مانند ژلاتین یا پروتئین‌های ماهی) ترکیب کرد تا فیلم‌هایی با ویژگی‌های مکانیکی تقویت‌شده و عملکرد ضدمیکروبی بهتر ایجاد شود. این بیوپلیمرها، به‌ویژه در بسته‌بندی مواد غذایی با ماندگاری پایین مانند ماهی، گوشت، میگو و محصولات تازه، گزینه‌ای کارآمد برای افزایش ایمنی میکروبی، بهبود کیفیت حسی، و افزایش مدت نگهداری هستند [۲۶].

با این‌که پلی‌ساکاریدهای جلبکی در صنایع مختلف، از جمله بسته‌بندی مواد غذایی، کاربردهای متعددی دارند، اما استفاده از آن‌ها با برخی محدودیت‌ها همراه است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به خواص مکانیکی و سدکنندگی ضعیف اشاره کرد که شامل کشسانی پایین، حساسیت بالا به رطوبت، نفوذپذیری زیاد نسبت به بخار آب و اکسیژن، پایداری حرارتی پایین، و شکنندگی نسبی می‌شود [۲۵,۳۲,۳۳,۳۵]. برای بهبود خواص سدی، عملکردی و مکانیکی پلیمرهای پایه‌پلی‌ساکاریدی، راهکارهای مختلفی به‌کار گرفته می‌شود. این راهکارها شامل: اصلاح شیمیایی پلی‌ساکاریدها، استفاده از افزودنی‌های طبیعی یا شیمیایی (مانند پلاستی‌سایزرها، سورفکتانت‌ها[1]، آنتی‌اکسیدان‌ها[2]، عوامل ضدمیکروبی، و عوامل ضدقهوه‌ای شدن)، ترکیب با سایر پلیمرها، طراحی فیلم‌ها چندلایه، و افزودن نانوذرات می‌باشد [۳۲, ۳۴]. کامپوزیت به موادی اطلاق می‌شود که از حداقل دو جزء متفاوت ساخته شده‌اند و خواصی بسیار برتر از هر یک از اجزای منفرد خود دارند. در صورتی که یکی از این اجزا در مقیاس نانومتری باشد، این ماده به‌عنوان نانوکامپوزیت شناخته می‌شود [۳۵]. برای بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی، سدی و عملکردی فیلم های ساخته شده از پلی‌ساکاریدهای جلبکی، این پلی‌ساکاریدها با ترکیبات مختلفی تلفیق می‌شوند. از جمله ترکیباتی که به پلی‌ساکاریدهای جلبکی جهت بهبود ساختار فیلم‌های تهیه شده از آن‌ها اضافه می‌شود می‌توان به بیوپلیمرهایی مانند پلی‌ساکاریدها (کیتوزان، نشاسته، کاپا-کاراگینان، گلوکومانان[3] کنجک) و پروتئین‌ها (ایزوله‌های پروتئین سویا و ژلاتین)، لیپیدها، پلاستی‌سایزرها مانند پلی‌ال‌ها (سوربیتول[4]، گلیسرول[5]، پلی‌اتیلن‌گلایکول[6]، قندها (گلوکز، فروکتوز[7]، ساکارز[8])، نانوذرات مانند نانوذرات فلزی، نانوذرات سلولز، و نانوذرات رسی، عصاره‌های طبیعی مثل اسانس‌ها، روغن علف لیمو، عصاره هسته گریپ‌فروت، عصاره چای سبز و ترکیبات ضدمیکروبی مثل باکتریوسین‌ها[9]، نیسین[10]، سوربات پتاسیم[11] اشاره نمود. این ترکیبات می‌توانند به‌طور مؤثر موجب بهبود ویژگی‌های عملکردی فیلم‌ها و پوشش‌های مبتنی بر پلی‌ساکاریدهای جلبکی شوند [۲۵,۳۳,۳۶].

۴- بیوپلیمرهای جلبکی و کاربردشان در بسته‌بندی فعال

بسته‌بندی فعال، فراتر از نقش محافظتی معمول در برابر شرایط محیطی، نقش مهمی در حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری مواد غذایی ایفا می‌کند [۴۴, ۶۴]. این نوع بسته‌بندی، سامانه‌ای است که در آن بین محصول، بسته‌بندی و محیط اطراف تعامل برقرار می‌شود تا ماندگاری ماده غذایی افزایش یابد؛ این تعامل می‌تواند از طریق رهاسازی ترکیبات مفید برای محصول یا جذب و حذف ترکیبات نامطلوب از ماده غذایی یا محیط داخلی بسته‌بندی صورت گیرد [۴۵,۴۶]. ترکیبات فعال یا افزودنی‌های موجود در سامانه بسته‌بندی فعال(سامانه‌های جاذب/گیرنده فعال)، می‌توانند به حذف عوامل نامطلوب مانند رطوبت، CO_2، O_2، اتیلن و بو از محیط غذا کمک کنند یا خواصی مانند خواص ضدمیکروبی، آنتی‌اکسیدانی و ایجاد طعم داشته باشند [۴۷]. برای ایجاد خواص فعال در فیلم‌های خوراکی، از عصاره‌های طبیعی و ترکیباتی نظیر اسانس‌ها، توکوفرول، بتاکاروتن، اسید آسکوربیک[12]، اسید سیتریک[13]، پلی‌فنول‌ها[14]، نانوذرات و... استفاده می‌شود (جدول ۴) [۴۴, ۴۸]. از بسته‌بندی فعال در نگهداری انواع مختلف مواد غذایی استفاده شده است به عنوان مثال فیلم خوراکی تهیه‌شده از کاپا- و یوتا-کاراگینان، گلیسرول و عصاره آرکتیوم لاپا فعالیت ضداکسیدانی بالایی نشان داد و برای بسته‌بندی میوه‌ها و سبزیجات تازه، مناسب تشخیص داده شد [۴۹].

[1] surfactant
[2] antioxidant
[3] Glucomannan
[4] Sorbitol
[5] Glycerol
[6] Polyethylene glycol
[7] Fructose
[8] Sucrose
[9] Bacteriocins
[10] nisin
[11] potassium sorbate
[12] Ascorbic acid
[13] Citric acid
[14] Polyphenol

جدول (۳): بیوپلیمرهای جلبکی و بهبود ویژگی‌های فیلمی جهت بسته‌بندی

پلی‌ساکارید	کاربرد	ویژگی‌ها	منابع
آگار/نانوذرات ملانین	بسته‌بندی زیستی و آنتی‌اکسیدانی	استحکام کششی بالا، افزایش زاویه تماس آبی، خاصیت آنتی‌اکسیدانی و مسدودکننده UV	[۳۷]
آگار/نانوسلولز یا میکروکریستالین سلولز (MCC)[1]	بیونانوکامپوزیت بسته‌بندی	افزایش استحکام با نانوسلولز؛ کاهش خواص مانع با MCC؛ زاویه تماس افزایش‌یافته	[۳۶]
آگار/آلژینات سدیم/نانوذرات SiO_2	نانوکامپوزیت برای بسته‌بندی مواد غذایی	افزایش استحکام، کاهش نفوذپذیری بخار، زاویه تماس بالا، خاصیت ضد UV و پایداری حرارتی	[۳۸]
آگار/باکتریوسین	فیلم ضدمیکروبی پنیر	کاهش نفوذپذیری بخار، افزایش استحکام، کاهش چشمگیر آلودگی‌ها در یخچال	[۳۹]
کیتوسان/آگار/باکتریوسین	بسته‌بندی آنتی‌باکتریال	افزایش نفوذپذیری، حفظ خواص مکانیکی، مقاومت نوری و ضدباکتریایی بالا	[۴۰]
آلژینات سدیم/نانوذرات طلا–دی‌اکسید تیتانیوم ($Au–TiO_2$)	بسته‌بندی ضدمیکروبی	خاصیت ضدمیکروبی، افزایش زاویه تماس آب و پایداری ، زیست‌تجزیه‌پذیری بهتر	[۴۱]
آلژینات سدیم/نانوکریستال‌های سلولز/نانوذرات اکسید مس (CuO)	بسته‌بندی ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی	خاصیت ضد تریکودرما، کاندیدا آلبیکانز، ای کلای، سالمونلا اورئوس؛ آنتی‌اکسیدان بالا	[۴۲]
آلژینات/نانوذرات گوگرد	بسته‌بندی برای مواد غذایی منجمد	استحکام بالا ، خاصیت ضد UV و بخار، ضدمیکروبی علیه لیستریا مونوسیتوجنز و ای کلای	[۴۳]
اولوان/نانوذرات نقره	ترکیب ضدمیکروبی برای صنایع آرایشی و پزشکی	فعالیت قوی ضدباکتری علیه ای کلای، سالمونلا اورئوس، سودوموناس آئروژینوزا و استافیلوکوکوس اپیدرمیدیس	[۲۷]

ثابت شده است افزودن عصاره طبیعی کلم قرمز، چای آبی یا سیب‌زمینی شیرین به فیلم‌های خوراکی بر پایه کاراگینان، خواص آنتی‌اکسیدانی ایجاد کرد که می‌تواند برای پوشش‌دهی سیب تازه برش‌خورده، کاربرد داشته باشد [۴۸]. همچنین فیلم آنتی‌باکتریال ساخته‌شده از آگار و باکتریوسین حاصل از لاکتوباسیلوس ساکی به‌عنوان جایگزین فیلم آلومینیومی در پنیر پیشنهاد شده است [۳۹]. در مطالعه‌ای فیلم آگار حاوی نانوذرات اکسید روی، نیسین، و اسانس دارچین خاصیت ضدباکتریایی مؤثری در گوشت ماهی چرخ‌کرده نشان داد [۱۷] .

نانوذرات فلزی (مانند Ag ، Au، Zn، ZnO، TiO_2، و CeO_2) در ساخت فیلم‌های کامپوزیتی در بسته‌بندی فعال مواد غذایی به‌کار رفته‌اند [۱۷]. به عنوان مثال افزودن نانوذرات نقره به فیلم آگار فعالیت ضدباکتریایی قوی ایجاد کرده است [۵۰]. در فیلم حاوی پولولان/کاراگینان حاوی دی-لیمونن[2] افزودن نانوذرات CuS فعالیت ضدباکتریایی در برابر عوامل بیماری‌زای غذایی نشان داده است [۲۲]. فیلم پلیمری ضدباکتری ساخته‌شده از آلژینات سدیم و نانوالیاف سلولز حاوی نانوذرات CuO، دارای خواص آنتی‌اکسیدانی (به دلیل حضور آلژینات سدیم) و ضدمیکروبی (به دلیل فعالیت ضد میکروبی نانوذرات CuO) مطلوب بوده و برای بسته‌بندی فعال میوه‌ها و سبزیجات تازه استفاده شده است [۴۲]. نور، به‌ویژه نور فرابنفش (UV)، یکی از عوامل مهم در تسریع فساد و کاهش کیفیت غذا است. فیلم فعال تهیه‌شده از آلژینات/پلی‌وینیل الکل حاوی نانوذرات توانسته است خواص انسداد نور UV و عایق حرارتی مناسبی نشان دهد [۵۱]. همچنین نانوذرات گوگرد نیز خاصیت جلوگیری از عبور UV را دارند و در بسته‌بندی فعال قابل استفاده‌اند [۴۳]. پلاستی‌سایزرهایی

[1] microcrystalline cellulose
[2] D Limonene

مانند گلیسرول یا سوربیتول نیز با بهبود ویژگی‌های مربوط به آب (محتوای رطوبتی، حلالیت، نفوذپذیری بخار آب، انتقال نور مرئی و UV) باعث ارتقای عملکرد فیلم‌های اولوان شده‌اند[۶۲] .

جدول (۴): بیوپلیمرهای جلبکی در تولید بسته های فعال

پلی‌ساکارید	کاربرد	ویژگی‌ها	منابع
آگار / $Zn(NO_3)_2$ / پلی‌گلیسرول / Na_2CO_3	بسته‌بندی فعال	خاصیت ضدمیکروبی علیه *S. aureus* و *C. albicans*	[۳۵]
آگار / نانوذرات ZnO /نیزین / روغن دارچین	نانوکامپوزیت فعال	خاصیت ضدمیکروبی علیه *L. monocytogenes* و باکتری‌های گوناگون	[۱۷]
پولولان / کاراگینان / نانوذرات-D CuS / لیمونن	بسته‌بندی فعال	فعالیت ضدمیکروبی علیه *E. coli* و *L. monocytogenes*	[۲۲]
آلژینات / پلی وینیل الکل / نانوذرات ملانین	بسته‌بندی فعال	افزایش استحکام، کشسانی، ممانعت از UV و بخار، عایق حرارتی بالا	[۵۱]

۵- بیوپلیمرهای جلبکی و کاربردشان در بسته‌بندی هوشمند

بسته‌بندی هوشمند نوعی بسته‌بندی ارتباطی است که در طول حمل‌ونقل، انبارداری، فروش و مصرف بر کیفیت، ایمنی و مکان‌یابی محصول نظارت دارد [۵۲, ۵۳]. هدف بسته‌بندی هوشمند، ارائه‌ی اطلاعات سریع، غیرمخرب و بدون معطلی درباره‌ی کیفیت و ایمنی مواد غذایی بسته‌بندی‌شده به مصرف‌کنندگان است [۵۴]. این نوع بسته‌بندی قادر به استفاده از منطق علمی، شناسایی، حسگری، ثبت، ردیابی و ارتباط است تا ماندگاری محصولات را افزایش دهد؛ کیفیت، ایمنی و ارائه اطلاعات را بهبود بخشد؛ و هشدارهایی در مورد مشکلات احتمالی ارائه کند. فناوری‌های اصلی بسته‌بندی هوشمند شامل سه بخش حامل‌های داده، شاخص‌ها (شامل شاخص‌های حرارتی(دما–زمان)، گازی و تازگی) وحساسه‌ها[1] می‌باشد [۵۴, ۵۵, ۵۶]. شاخص‌های گازی تغییرات در ترکیب گازهای فضای درون بسته را آشکار می‌کنند (مانند O_2 وCO_2). این تغییرات ممکن است در اثر تنفس محصولات تازه، فعالیت میکروبی فسادزا یا نشت از بسته‌بندی ایجاد شود. شاخص‌های دما–زمان برای پایش تغییرات دمایی در محصولاتی مثل غذاهای منجمد در طول زنجیره توزیع به‌کار می‌روند و شاخص‌های تازگی بیشتر در بسته‌بندی گوشت و ماهی به‌کار می‌روند و حضور ترکیبات فرار مرتبط با فساد (مانند دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، ترکیبات نیتروژنی فرار، آمونیاک، آمین‌های زیستی، اسیدهای آلی، اتانول[2] و سموم یا آنزیم‌ها) را از طریق تغییرات رنگی حساس به pH (و یا حساسه و شاخص‌های تعبیه‌شده در بسته‌بندی) نشان می‌دهند.[۵۶, ۵۷, ۵۸, ۵۹]

۶-کاربرد بیوپلیمرهای جلبکی در تهیه فیلم‌های رنگ‌سنج تشخیص تازگی

در مطالعات مختلفی از بیوپلیمرهای جلبکی در تهیه فیلم‌های رنگی جهت تشخیص فساد مواد غذایی استفاده شده است (جدول ۵).

جدول(۵): بیوپلیمرهای جلبکی در تولید بسته‌های هوشمند

پلی‌ساکارید	کاربرد	ویژگی‌ها	منابع
کاراگینان/ عصاره پوست جابوتیکابا	بسته‌بندی هوشمند و فعال	شاخص رنگی، آنتی‌اکسیدانی، کاهش نفوذپذیری، تغییر رنگ با تغییرpH، فعالیت ضد E. coli	[۶۱]
کاپا کاراگینان/ عصاره کلم قرمز	بسته‌بندی هوشمند سیب‌های تازه	آنتی‌اکسیدان، تغییر رنگ باpH، استحکام و کشسانی حفظ‌شده	[۴۹]
پکتین / آلژینات سدیم / زانتان گام / تفاله تمشک	فیلم هوشمند تشخیص تازگی مواد پروتئینی	کاهش نفوذپذیری و رطوبت، افزایش استحکام، خاصیت آنتی‌اکسیدانی بالا، تغییر رنگ با pH (صورتی تا سبز تیره)	[۶۰]
اولوان + گلیسرول یا سوربیتول	بسته‌بندی هوشمند غذایی	افزایش حلالیت، نفوذپذیری بخار، شفافیت، کشسانی و محافظت در برابر نور مرئی وUV با سوربیتول؛ کاهش استحکام کششی	[۶۱]

[1] Sensor

[2] Ethanol

فیلم حساس به تغییرات pH بر پایه کاراگینان و رنگ طبیعی آنتوسیانین [1] برای پایش فساد غذا، به‌ویژه میگو، مناسب تشخیص داده شده است [۵۸]. فیلم رنگ‌سنجی حاوی عصاره تفاله تمشک و پلیمرهای پکتین، آلژینات سدیم و گزانتان، در بازه pH 1–13 ، تغییر رنگ صورتی–قرمز–قهوه‌ای–آبی–سبز تیره قابل‌مشاهده با چشم انسان به‌ویژه در محدوده pH 5–10 نشان می‌دهد. این ویژگی، این فیلم‌ها را مناسب بسته‌بندی هوشمند برای مواد غذایی غنی از پروتئین کرده است. عصاره تفاله تمشک غنی از آنتوسیانین‌ها است. آنتوسیانین‌ها گروهی از فلاونوئیدها با ساختار اصلی فلاوِلیوم هستند که به شدت نسبت به pH محیط حساس‌اند. تغییر pH سبب تغییر حالت یونیزاسیون و بازآرایی شیمیایی حلقه‌های این مولکول می‌شود و در نتیجه جذب نوری و رنگ ادراکی آن‌ها تغییر می‌کند. این تغییرات در پ هاش‌های مختلف به ترتیب زیر می باشد. در محیط های اسیدی (pH≈1–3) آنتوسیانین‌ها عمدتاً به شکل کاتیون فلاویلیوم پایدار هستند که رنگ صورتی/قرمز ایجاد می‌کند. درpH نزدیک خنثی (≈۴–۶) بخشی از مولکول به ساختار کوارنیدال یا شبیه بازکیتون تبدیل شده و طیف رنگی به قرمز متمایل به بنفش یا قهوه‌ای تغییر می‌کند. و در محیط قلیایی (pH>7) تشکیل ساختارهای آنترانیلات [2]/کوئینونوئید و نمک‌های باز چالکونی باعث تغییر رنگ به آبی و در نهایت سبز تیره می‌شود. ماتریس پلی‌ساکاریدی (پکتین، آلژینات سدیم و گزانتان [3]) به عنوان شبکه هیدروژلی عمل کرده و ضمن حفظ رطوبت و افزایش پایداری آنتوسیانین، امکان نفوذ یون‌های H^+/OH^- را فراهم می‌کند. به همین دلیل تغییر رنگ در محدوده pH وسیع (۱–۱۳) و به‌ویژه در بازه ۵–۱۰ با چشم انسان قابل مشاهده است [۵۹, ۶۰]. در مطالعه‌ای فیلمی فعال و هوشمند بر پایه کاراگینان و عصاره پوست جابوتیکابا [4](سرشار از آنتوسیانین و ترکیبات فنولی) توسعه یافته که هم خاصیت آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی دارد و هم برای پایش تازگی مواد غذایی از طریق تغییر رنگ مناسب است [۶۰,۶۱]. کارایی پلیمر زیستی آلژینات حاوی عصاره زولنگ [5] به‌عنوان یک بسته‌بندی فعال ضد اکسیدانی و ضد میکروبی بر ویژگی‌های کیفی و ماندگاری گوشت مرغ در طول ۱۲ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد مطالعه شد. نتایج نشان داد عصاره زولنگ دارای خواص ضد میکروبی و به‌خصوص ضداکسیدانی بود و غلظت عصاره در این خواص اثرگذار بود. بسته‌بندی فعال بر پایه آلژینات توانست از طریق رهایش آهسته و پیوسته عصاره زولنگ، اثر بخشی آن را طی دوره نگهداری حفظ نماید و به‌عنوان یک بسته‌بندی فعال موجب افزایش ماندگاری فیله مرغ در دمای یخچال حداقل به مدت ۳ روز شود [۶۴]. در مطالعه کارایی عصاره گل گاوزبان، پوست سیب قرمز، کلم قرمز، پوست تربچه قرمز، میوه زرشک، پوست ریشه چغندر قرمز، گل پنیرک، و پوست بادمجان سیاه در تغییرات pH جهت استفاده به عنوان شناساگرهای pH که همزمان با فساد و تغییرات pH ماده غذایی تغییر رنگ می‌دهند، مورد بررسی قرار گرفت. پس از تهیه عصاره‌های آبی - اتانولی آن‌ها به‌روش غوطه‌وری، پاسخ رنگی آن‌ها در محدوده pH 3 تا ۱۲، با استفاده از محلول‌های اسید کلریدریک و هیدروکسید سدیم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که عصاره‌های کلم قرمز و پوست تربچه قرمز، نسبت به تغییرات pH حساسیت بیشتری داشتند و این تغییرات را با دقت بالاتری نسبت به سایر عصاره‌ها به نمایش گذاشتند و لذا می‌توانند به‌عنوان شناساگرهای pH طبیعی و مقرون به صرفه، در نمایش به‌موقع فساد در بسته‌بندی‌های هوشمند مواد غذایی، مورد استفاده قرار گیرند [۶۵].

۷- چالش‌های صنعتی و الزامات ایمنی در استفاده از پلی‌ساکاریدهای جلبکی برای بسته‌بندی مواد غذایی

با وجود پیشرفت‌های پژوهشی، انتقال فناوری‌های آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی با موانع متعددی مواجه است .هزینه بالای استخراج و تصفیه پلی‌ساکاریدها همچنان یکی از مهم‌ترین چالش‌ها است؛ به‌ویژه به دلیل نیاز به مراحل متعدد پیش‌تصفیه، پالایش [6] و خالص‌سازی که انرژی‌بر و زمان‌بر هستند [۶۶, ۶۷]. فرآیند خشک‌سازی جلبک نیز به‌عنوان یکی از پرهزینه‌ترین مراحل زنجیره تولید شناخته می‌شود و مصرف بالای انرژی و زمان طولانی، محدودیت جدی برای تولید صنعتی ایجاد می‌کند [۶۸]

از نظر عملکردی، فیلم‌های حاصل از پلی‌ساکاریدهای جلبکی به دلیل هیدروفیلی بالا، پایداری مکانیکی و رطوبتی ضعیف دارند و در مواجهه با رطوبت نسبی بالا دچار تورم و کاهش استحکام می‌شوند. این مسئله استفاده از آن‌ها را به‌ویژه در بسته‌بندی مواد غذایی با رطوبت بالا دشوار می‌کند و نیازمند اصلاحات فرمولاسیونی یا ترکیب با پلیمرهای آب‌گریز است[۶۹, ۷۰].

علاوه بر چالش‌های فنی، ایمنی مواد اولیه موضوعی کلیدی است. جلبک‌های دریایی به دلیل محیط رشد خود می‌توانند به‌طور بالقوه

[1] Anthocyanin
[2] anthranilate
[3] Xanthan
[4] Jabuticaba
[5] Eryngium Caucasicum Extract
[6] Filtration

به فلزات سنگین مانند آرسنیک، کادمیوم و سرب آلوده باشند[۷۲]. بر این اساس، رعایت الزامات مراجع بین‌المللی نظیر EFSA[1] و U.S. FDA[2] برای کنترل آلودگی‌های شیمیایی، فلزات سنگین و آلاینده‌های زیستی الزامی است EFSA در گزارش سال ۲۰۱۸، مقادیر حداکثر مجاز فلزات سنگین در محصولات جلبکی را مشخص کرده است، و FDA نیز دستورالعمل‌های دقیق برای استفاده از ترکیبات جلبکی به‌عنوان مواد افزودنی یا بسته‌بندی مواد غذایی ارائه داده است[۷۲].

۸- نتیجه‌گیری

بیوپلیمرهای جلبکی قابلیت تولید فیلم‌های زیست‌سازگار با ویژگی‌های ممانعتی در برابر گازها و قابلیت درزبندی حرارتی مناسب را دارند که برای بسته‌بندی‌های فعال و هوشمند مواد غذایی بسیار مطلوب است.

با وجود مزایای متعدد پلی‌ساکاریدهای جلبکی در بسته‌بندی زیستی، این ترکیبات با محدودیت‌هایی نیز همراه هستند به عنوان مثال به دلیل آلودگی شدید منابع دریایی به فلزات سنگین، مواد شیمیایی و پلاستیک‌ها، خطراتی در رابطه با سمیت بالقوه بیوپلیمرهای دریایی وجود دارد. بنابراین، لازم است در فرایند استخراج این بیوپلیمرها، روش‌های تصفیه مناسب و دقیق به‌کار گرفته شود. از دیگر محدودیت این بیوپلیمرهای جلبکی می‌توان به خواص مکانیکی ضعیف (شکنندگی، کشش کم)، حساسیت بالا به رطوبت، نفوذپذیری بالا به بخار آب و اکسیژن و پایداری حرارتی پایین اشاره نمود.

برای رفع این محدودیت‌ها، راهکارهای مختلفی ارائه شده است. اصلاح شیمیایی ساختار پلی‌ساکارید، استفاده از مواد افزودنی طبیعی یا شیمیایی (پلاستی‌سایزرها، آنتی‌اکسیدان‌ها، عوامل ضدباکتری و ضدقهوه‌ای شدن، ترکیب با سایر پلیمرها (مانند کیتوزان، نشاسته، پروتئین‌های گیاهی و حیوانی)، طراحی ساختارهای چندلایه و افزودن نانوذرات (فلزی، سلولزی، رس) از جمله راهکارهایی هستند که پیشنهاد شده‌اند. استفاده از نانوکامپوزیت‌های زیستی می‌تواند خواص عملکردی فیلم‌های بسته‌بندی را به‌طور چشمگیری ارتقاء دهد. این نانوکامپوزیت‌ها شامل ترکیب پلی‌ساکاریدهای جلبکی با بیوپلیمرها (کیتوزان، نشاسته، کاراگینان، ژلاتین، پروتئین سویا)، پلاستی‌سایزرها (سوربیتول، گلیسرول، پلی‌اتیلن گلایکول)، نانوذرات (نقره، سلولز، رس)، عصاره‌های طبیعی (روغن لیمو، چای سبز، عصاره گریپ‌فروت) و عوامل ضدباکتری (نیسین، باکتریوسین‌ها، پتاسیم سوربات) می‌باشد که تحت عنوان بسته‌بندی‌های فعال نیز جهت کاربرد در مواد غذایی تولید شده‌اند. همچنین بسته‌بندی هوشمند به کمک حسگرها و شاخص‌های متنوع می‌تواند وضعیت ایمنی و تازگی محصول را به‌طور مستقیم به مصرف‌کننده اطلاع دهد. این سامانه‌ها، به‌ویژه در محصولات فسادپذیر مانند ماهی، گوشت، میگو و میوه‌ها، ابزاری کارآمد برای تضمین کیفیت هستند و در این راستا بیوپلیمرهای جلبکی از منابع امید بخش در توسعه و تولید این نوع بسته‌بندی‌ها با خواص زیست تخریب پذیری می‌باشند.

۹- مراجع

[1] C. Miles, L. DeVetter, S. Ghimire, and D. G. Hayes, "Suitability of biodegradable plastic mulches for organic and sustainable agricultural production systems," HortScience, vol. 52, no. 1, pp. 10–15, 2017, doi: 10.21273/HORTSCI11249-16.

[2] N. Mahmud, J. I. Islam, and R. Tahergorabi, "Marine biopolymers: applications in food packaging," Processes, vol. 9, no. 12, p. 2245, 2021, doi: 10.3390/pr9122245.

[3] K. de la Caba et al., "From seafood waste to active seafood packaging: an emerging opportunity of the circular economy," J. Clean. Prod., vol. 208, pp. 86–98, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.164.

[4] C. L. Murrieta-Martínez et al., "Edible protein films: sources and behavior," Packag. Technol. Sci., vol. 31, no. 3, pp. 113–122, 2018, doi: 10.1002/pts.2360.

[5] J. A. Vázquez et al., "Production of valuable compounds and bioactive metabolites from by-products of fish discards using chemical processing, enzymatic hydrolysis, and bacterial fermentation," Mar. Drugs, vol. 17, p. 139, 2019.

[6] H. J. Kim, S. Roy, and J. W. Rhim, "Gelatin/agar-based color-indicator film integrated with Clitoria ternatea flower anthocyanin and zinc oxide nanoparticles for monitoring freshness of shrimp," Food Hydrocoll., vol. 124, 2022, Art. no. 107294, doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.107294.

[7] R. Priyadarshi, S. Roy, T. Ghosh, D. Biswas, and J.-W. Rhim, "Antimicrobial nanofillers reinforced biopolymer composite films for active food packaging applications: a review," Sustain. Mater. Technol., vol. 32, 2022, Art. no. e00353, doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00353.

[8] S. Roy, R. Priyadarshi, and J. W. Rhim, "Development of multifunctional pullulan/chitosan-based composite films reinforced with ZnO nanoparticles and propolis for meat packaging applications," Foods, vol. 10, no. 11, 2021, Art. no. 2789, doi: 10.3390/foods10112789.

[9] V. Gupta, D. Biswas, and S. Roy, "A comprehensive review of biodegradable polymer-based films and coatings and their food packaging applications," Materials, vol. 15, no. 17, p. 5899, 2022, doi: 10.3390/ma15175899.

[10] M. Kumar, A. Jha, and B. Mishra, Marine Biopolymers for Transdermal Drug Delivery. Singapore: Springer, 2022, pp. 157–207, doi: 10.1007/978-981-16-4787-1_6.

[11] F. Lionetto and C. E. Corcione, "Recent applications of biopolymers derived from fish industry waste in food packaging," Polymers, vol. 13, no. 14, p. 2337, 2021, doi: 10.3390/polym13142337.

[12] B. Malhotra, A. Keshwani, and H. Kharkwal, "Natural polymer based cling films for food packaging," Int. J. Pharm. Pharm. Sci., vol. 7, no. 4, pp. 10–18, 2015.

[13] A. Vejdan, S. M. Ojagh, and M. Abdollahi, "Effect of gelatin/agar bilayer film incorporated with TiO_2 nanoparticles as a UV absorbent

[1] European Food Safety Authority
[2] Food and Drug Administration

[34] T. Senturk Parreidt, K. Müller, and M. Schmid, "Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications," Foods, vol. 7, no. 10, p. 170, 2018, doi: 10.3390/foods7100170.
[35] I. Malagurski et al., "Mineralized agar-based nanocomposite films: Potential food packaging materials with antimicrobial properties," Carbohydr. Polym., vol. 175, pp. 55–62, 2017, doi: 10.1016/j.carbpol.2017.07.064.
[36] S. Shankar and J.-W. Rhim, "Preparation of nanocellulose from micro-crystalline cellulose: The effect on the performance and properties of agar-based composite films," Carbohydr. Polym., vol. 135, pp. 18–26, 2016, doi: 10.1016/j.carbpol.2015.08.082.
[37] S. Roy, J. W. Rhim, and L. Jaiswal, "Bioactive agar-based functional composite film incorporated with copper sulfide nanoparticles," Food Hydrocoll., vol. 93, pp. 156–166, 2019, doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.02.034.
[38] X. Hou et al., "Effect of SiO_2 nanoparticle on the physical and chemical properties of eco-friendly agar/sodium alginate nanocomposite film," Int. J. Biol. Macromol., vol. 125, pp. 1289–1298, 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.09.109.
[39] C. R. Contessa et al., "Development of active packaging based on agar-agar incorporated with bacteriocin of Lactobacillus sakei," Biomolecules, vol. 11, no. 12, p. 1869, 2021, doi: 10.3390/biom11121869.
[40] C. R. Contessa, G. S. da Rosa, and C. C. Moraes, "New active packaging based on biopolymeric mixture added with bacteriocin as active compound," Int. J. Mol. Sci., vol. 22, no. 19, p. 10628, 2021, doi: 10.3390/ijms221910628.
[41] S. Tang et al., "Degradable and photocatalytic antibacterial Au-TiO_2/sodium alginate nanocomposite films for active food packaging," Nanomaterials, vol. 8, no. 11, p. 930, 2018, doi: 10.3390/nano8110930.
[42] K. Saravanakumar et al., "Physical and bioactivities of biopolymeric films incorporated with cellulose, sodium alginate and copper oxide nanoparticles for food packaging application," Int. J. Biol. Macromol., vol. 153, pp. 207–214, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.250.
[43] R. Priyadarshi, H.-J. Kim, and J.-W. Rhim, "Effect of sulfur nanoparticles on properties of alginate-based films for active food packaging applications," Food Hydrocoll., vol. 110, 2020, Art. no. 106155, doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.106155.
[44] C. Vilela et al., "A concise guide to active agents for active food packaging," Trends Food Sci. Technol., vol. 80, pp. 212–222, 2018, doi: 10.1016/j.tifs.2018.08.006.
[45] D. Carina, S. Sharma, A. K. Jaiswal, and S. Jaiswal, "Seaweeds polysaccharides in active food packaging: A review of recent progress," Trends Food Sci. Technol., vol. 110, pp. 559–572, 2021, doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.022.
[46] A. Conte, L. Angiolillo, M. Mastromatteo, and M. A. D. Nobile, "Technological options of packaging to control food quality," in Food Industry, IntechOpen, 2013, doi: 10.5772/53151.
[47] S. A. Varghese, S. Siengchin, and J. Parameswaranpillai, "Essential oils as antimicrobial agents in biopolymer-based food packaging—A comprehensive review," Food Biosci., vol. 38, 2020, Art. no. 100785, doi: 10.1016/j.fbio.2020.100785.
[48] S. Jancikova, D. Dordevic, K. Tesikova, B. Antonic, and B. Tremlova, "Active edible films fortified with natural extracts: Case study with fresh-cut apple pieces," Membranes, vol. 11, no. 9, p. 684, 2021, doi: 10.3390/membranes11090684.
[49] S. Jancikova, D. Dordevic, E. Jamroz, H. Behalova, and B. Tremlova, "Chemical and physical characteristics of edible films, based on κ- and ι-carrageenans with the addition of Lapacho tea extract," Foods, vol. 9, no. 3, p. 357, 2020, doi: 10.3390/foods9030357.
[50] K. Kraśniewska, S. Galus, and M. Gniewosz, "Biopolymers-based materials containing silver nanoparticles as active packaging for food applications—A review," Int. J. Mol. Sci., vol. 21, no. 3, p. 698, 2020, doi: 10.3390/ijms21030698.
[51] M. Yang et al., "High performance of alginate/polyvinyl alcohol composite film based on natural original melanin nanoparticles used as on fish oil photooxidation," Int. J. Food Sci. Technol., vol. 52, no. 8, pp. 1862–1868, 2017, doi: 10.1111/ijfs.13461.
[14] Y. J. Bang, S. Roy, and J. W. Rhim, "A facile in situ synthesis of resorcinol-mediated silver nanoparticles and the fabrication of agar-based functional nanocomposite films," J. Compos. Sci., vol. 6, no. 5, 2022, Art. no. 124, doi: 10.3390/jcs6050124.
[15] M. da Rocha et al., "Effects of agar films incorporated with fish protein hydrolysate or clove essential oil on flounder (Paralichthys orbignyanus) fillets shelf-life," Food Hydrocoll., vol. 81, pp. 351–363, 2018, doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.03.017
[17] E. Abdollahzadeh, H. M. Hosseini, and A. A. I. Fooladi, "Antibacterial activity of agar-based films containing nisin, cinnamon EO, and ZnO nanoparticles," J. Food Saf., vol. 38, no. 3, 2018, Art. no. e12440, doi: 10.1111/jfs.12440.
[18] I. Bose, S. Roy, and V. K. Pandey, "A comprehensive review on significance and advancements of antimicrobial agents in biodegradable food packaging," Antibiotics, vol. 12, p. 968, 2023.
[19] S. Roy and J.-W. Rhim, "Gelatin-based film integrated with copper sulfide nanoparticles for active packaging applications," Appl. Sci., vol. 11, no. 14, p. 6307, 2021, doi: 10.3390/app11146307.
[20] S. Roy and J. W. Rhim, "Carrageenan-based antimicrobial bionanocomposite films incorporated with ZnO nanoparticles stabilized by melanin," Food Hydrocoll., vol. 90, pp. 500–507, 2019, doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.12.056.
[21] S. Roy and J.-W. Rhim, "Gelatin/agar-based functional film integrated with Pickering emulsion of clove essential oil stabilized with nanocellulose for active packaging applications," Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp., vol. 627, 2021, Art. no. 127220, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.127220.
[22] S. Roy and J. W. Rhim, "Preparation of antimicrobial and antioxidant gelatin/curcumin composite films for active food packaging application," Colloids Surf. B Biointerfaces, vol. 188, 2020, Art. no. 110761, doi: 10.1016/j.colsurfb.2019.110761.
[23] P. Bajpai, Characteristics of Algae, in Third Generation Biofuels, Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2019, pp. 11–15.
[24] E. A. Titlyanov, T. V. Titlyanova, X. Li, and H. Huang, Marine Plants of Coral Reefs, in Coral Reef Marine Plants of Hainan Island, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2017, pp. 5–39.
[25] F. S. Mostafavi and D. Zaeim, "Agar-based edible films for food packaging applications—A review," Int. J. Biol. Macromol., vol. 159, pp. 1165–1176, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.05.123.
[26] U. T. Emre, S. Sirin, S. N. Dolanbay, and B. Aslim, "Harnessing polysaccharides for sustainable food packaging," Polym. Bull., pp. 1–47, 2025.
[27] A. Massironi et al., "Ulvan as novel reducing and stabilizing agent from renewable algal biomass: application to green synthesis of silver nanoparticles," Carbohydr. Polym., vol. 203, pp. 310–321, 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.09.109.
[28] V. L. Campo, D. F. Kawano, D. B. da Silva Jr, and I. Carvalho, "Carrageenans: Biological properties, chemical modifications and structural analysis—A review," Carbohydr. Polym., vol. 77, no. 2, pp. 167–180, 2009.
[29] P. Kiuru et al., "Exploring marine resources for bioactive compounds," Planta Med., vol. 80, pp. 1234–1246, 2014.
[30] S. N. Eladl, A. M. Elnabawy, and E. G. Eltanahy, "Recent biotechnological applications of value-added bioactive compounds from microalgae and seaweeds," Bot. Stud., vol. 65, p. 28, 2024.
[31] D.-H. Ngo and S.-K. Kim, "Sulfated polysaccharides as bioactive agents from marine algae," Int. J. Biol. Macromol., vol. 62, pp. 70–75, 2013.
[32] A. R. V. Ferreira, V. D. Alves, and I. M. Coelhoso, "Polysaccharide-based membranes in food packaging applications," Membranes, vol. 6, no. 2, p. 22, 2016, doi: 10.3390/membranes6020022.
[33] R. Theagarajan, S. Dutta, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, "Alginates for food packaging applications," in Alginates, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019, pp. 205–232, doi: 10.1002/9781119487999.ch11.

[62] M. Guidara et al., "Smart ulvan films responsive to stimuli of plasticizer and extraction condition in physico-chemical, optical, barrier and mechanical properties," Int. J. Biol. Macromol., vol. 150, pp. 714–726, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.111.

[63] F. Moghimnejad and D. Khademi Shurmasti, "Monitoring of chemical and microbial indicators of chicken meat with alginate and Eryngium caucasicum extract-based active packaging," Packag. Sci. Art, vol. 15, no. 60, pp. 1–8, 2025. (In Persian).

[64] B. Nowruzi, "A review of the use of algae in active food packaging," Packag. Sci. Art, vol. 15, no. 59, pp. 43–52, 2024. (In Persian).

[65] B. Bazargani-Gilani et al., "Introducing and efficiency of some natural pH-indicators for use in smart food packaging," Packag. Sci. Art, vol. 14, no. 55, pp. 15–23, 2023. (In Persian).

[66] M. Jönsson et al., "Extraction and modification of macroalgal polysaccharides for current and next-generation applications," Molecules, vol. 25, no. 4, p. 930, 2020, doi: 10.3390/molecules25040930.

[67] P. Santhoshkumar, K. S. Yoha, and J. A. Moses, "Drying of seaweed: Approaches, challenges and research needs," Trends Food Sci. Technol., vol. 138, pp. 153–163, 2023, doi: 10.1016/j.tifs.2023.06.003.

[68] P. Kajla et al., "Seaweed-based biopolymers for food packaging: A sustainable approach for a cleaner tomorrow," Int. J. Biol. Macromol., vol. 274, p. 133166, 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.133166.

[69] S. L. Holdt and S. Kraan, "Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation," J. Appl. Phycol., vol. 23, no. 3, pp. 543–597, 2011, doi: 10.1007/s10811-010-9632-5.

[70] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), "Scientific opinion on arsenic in food," EFSA J., vol. 7, no. 10, p. 1351, 2009, doi: 10.2903/j.efsa.2009.1351.

[71] K. Y. Perera et al., "Seaweed polysaccharide in food contact materials (active packaging, intelligent packaging, edible films, and coatings)," Foods, vol. 10, no. 9, p. 2088, 2021, doi: 10.3390/foods10092088

[72] A. Q. Hurtado et al., "Report of the expert meeting on food safety for seaweed—Current status and future perspectives," Food Safety for Seaweed: Current Status and Future Perspectives, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022. [Online]. Available: https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb9043en

food thermal insulating and UV–vis block," Carbohydr. Polym., vol. 233, 2020, Art. no. 115884, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.115884.

[52] S. Kalpana, S. R. Priyadarshini, M. Maria Leena, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, "Intelligent packaging: Trends and applications in food systems," Trends Food Sci. Technol., vol. 93, pp. 145–157, 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.09.008.

[53] K. Y. Perera, S. Sharma, D. Pradhan, A. K. Jaiswal, and S. Jaiswal, "Seaweed polysaccharide in food contact materials (active packaging, intelligent packaging, edible films, and coatings)," Foods, vol. 10, no. 9, p. 2088, 2021, doi: 10.3390/foods10092088.

[54] Y. Ma et al., "Properties and applications of intelligent packaging indicators for food spoilage," Membranes, vol. 12, no. 5, p. 477, 2022, doi: 10.3390/membranes12050477.

[55] P. Müller and M. Schmid, "Intelligent packaging in the food sector: A brief overview," Foods, vol. 8, no. 1, p. 16, 2019, doi: 10.3390/foods8010016.

[56] A. Nešić, G. Cabrera-Barjas, S. Dimitrijević-Branković, S. Davidović, N. Radovanović, and C. Delattre, "Prospect of polysaccharide-based materials as advanced food packaging," Molecules, vol. 25, no. 1, p. 135, 2020, doi: 10.3390/molecules25010135

[57] M. Sohail, D.-W. Sun, and Z. Zhu, "Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety," Crit. Rev. Food Sci. Nutr., vol. 58, no. 15, pp. 2650–2662, 2018, doi: 10.1080/10408398.2018.1449731.

[58] N. A. Ahmad, L. Y. Heng, F. Salam, M. H. Mat Zaid, and S. Abu Hanifah, "A colorimetric pH sensor based on Clitoria sp and Brassica sp for monitoring of food spoilage using chromametry," Sensors, vol. 19, no. 21, p. 4813, 2019, doi: 10.3390/s19214813.

[59] P. Müller and M. Schmid, "Intelligent packaging in the food sector: A brief overview," Foods, vol. 8, no. 1, p. 16, 2019, doi: 10.3390/foods8010016

[60] J. Yang et al., "Colorimetric films based on pectin/sodium alginate/xanthan gum incorporated with raspberry pomace extract for monitoring protein-rich food freshness," Int. J. Biol. Macromol., vol. 185, pp. 959–965, 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.06.198.

[61] L. B. Avila, E. R. C. Barreto, C. C. Moraes, M. M. Morais, and G. S. da Rosa, "Promising new material for food packaging: An active and intelligent carrageenan film with natural jaboticaba additive," Foods, vol. 11, no. 6, p. 792, 2022, doi: 10.3390/foods11060792.