



استخراج فوکوئیدان از جلبک قهوه‌ای و کاربرد آن در صنایع غذایی

پریسا لطفی^{۱*}، سجاد پیرسا^۲

۱- دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

کلمات کلیدی:

فوکوئیدان،

استخراج،

ماکرو جلبک قهوه‌ای،

ترکیبات زیست فعال،

صنایع غذایی.

DOI: 10.48311/fsct.2026.118663.83019

* مسئول مکاتبات:

فوکوئیدان یک پلی ساکارید سولفات از جلبک دریایی قهوه‌ای متشکل از چندین مونوساکارید است که در دیواره سلولی جلبک دریایی قهوه‌ای یافت می‌شود و از سلولز مقاوم و همی سلولز تشکیل شده است. این ترکیب فعال زیستی دارای چندین خواص زیست فعال مانند آنتی اکسیدانی، ضد میکروبی، ضد ویروس، کاهنده چربی خون، ضد سرطان و تومور زایی، ضد التهاب و تعدیل کننده سیستم ایمنی است. آن‌ها به دلیل طبیعی بودن و عملاً غیر سمی بودن، به عنوان یک جز ضد میکروبی امیدوارکننده برای کاربردهای مختلف در پزشکی و صنایع غذایی در نظر گرفته می‌شوند. خواص فوکوئیدان به عوامل متعددی از جمله وزن مولکولی و روش استخراج بستگی دارد که وزن مولکولی فوکوئیدان، مرتبط با فعالیت‌های بیولوژیکی و فراهمی زیستی آن، می‌تواند تحت تأثیر فن‌آوری‌های استخراج قرار گیرد که طیف گسترده‌ای از روش‌های استخراج در حال حاضر برای به دست آوردن این پلی ساکاریدها استفاده می‌شود، مانند استخراج مایع فوق بحرانی (SFE)، استخراج مایع تحت فشار (PLE)، استخراج آب زیر بحرانی (SCWE)، استخراج به کمک اولتراسوند (UAE)، استخراج به کمک آنزیم (EAE) و استخراج به کمک مایکروویو (MAE)، با توجه به اینکه تعداد فزاینده‌ای از تحقیقات در چند سال گذشته روند استخراج فوکوئیدان را نشان داده است و استفاده از ترکیب فوکوئیدان یک استراتژی موثر در توسعه فیلم‌های زیست فعال در پوشش‌های غذایی است که سبب کاهش اتکا به مواد پلاستیکی و افزایش ماندگاری محصولات غذایی خواهد شد. این بررسی فرآیندهای مرسوم استخراج و خالص سازی، فعالیت‌های فیزیکی شیمیایی و بیولوژیکی و خصوصیات ساختار و پیشرفت‌های اخیر کاربرد فوکوئیدان در صنعت غذا را ارائه می‌دهد.

۱-مقدمه

به دلیل افزایش آگاهی مصرف کنندگان از مواد غذایی کاربردی، جلبک دریایی به طور فزاینده‌ای به عنوان منبع بالقوه ترکیبات زیست فعال در نظر گرفته می‌شوند. جلبک‌های دریایی بر اساس رنگدانه‌های خود به سه گروه به نام‌های جلبک سبز (*Chlorophyceae*)، قرمز (*Rhodophyceae*) و قهوه‌ای (*Phaeophyceae*) تقسیم می‌شوند. با حدود ۲۰۰۰ گونه، جلبک‌های دریایی قهوه‌ای دومین گروه از نظر فراوانی جلبک‌های دریایی هستند [1] هر گروه دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است و مزایای متفاوتی دارد. مجموعه‌ای متنوع از گونه‌های جلبک دریایی، شامل تقریباً ۹۰۰ گونه سبز، ۴۰۰۰ رنگ قرمز و ۱۵۰۰ گونه قهوه‌ای، در طبیعت وجود دارد. در حال حاضر تقریباً ۲۲۱ گونه در سراسر جهان برداشت می‌شود که شامل ۳۲ گونه *Chlorophyceae*، ۶۴ گونه *Phaeophyceae* و ۱۲۵ گونه *Rhodophyceae* می‌شود که از این میان، جلبک دریایی قهوه‌ای، جنس *Sargassum* بزرگترین منبع طبیعی دریای ویتنامی را تشکیل می‌دهد [2]. جلبک‌های دریایی قهوه‌ای که به طور گسترده در

اقیانوس اطلس یافت می‌شوند عمدتاً از پروتئین، لیپیدها، پلی‌ساکاریدها، رنگدانه‌ها، ویتامین‌ها، فیبرهای غذایی و مواد معدنی تشکیل شده‌اند. عنصر کلیدی در جلبک دریایی قهوه‌ای پلی‌ساکاریدها هستند که عمدتاً شامل سه نوع بیوپلیمر فوکوئیدان، آلژینات و لامینارین می‌باشند [3]. انواع مختلفی از ترکیبات فعال زیستی از این اجزا بدست می‌آیند (شکل ۱)، از جمله فوکوگزانتین، فوکوئیدان، لامینارین، پپتیدها، مانیتول و ترکیبات پلی فنولی که این ترکیبات زیست فعال انواع مختلفی از فعالیت‌های زیستی مانند ضد میکروبی، آنتی اکسیدانی، ضد قارچی، ضد ویروسی، ضد سرطانی، ضد انعقاد، ضد دیابت، ضد HIV، ضد التهابی و غیره را نشان می‌دهند [4]. به طور کلی، محتوای پروتئین در جلبک دریایی بین ۳ تا ۴۵ درصد و محتوای کربوهیدرات بین ۴ تا ۶۷ درصد متغیر است. علاوه بر این، جلبک دریایی به عنوان ماده‌ای با محتوای چربی کم، معمولاً زیر ۸ درصد شناخته شده است که جلبک دریایی قهوه‌ای به طور کلی به عنوان جلبکی با محتوای کربوهیدرات بالا شناخته شده است.

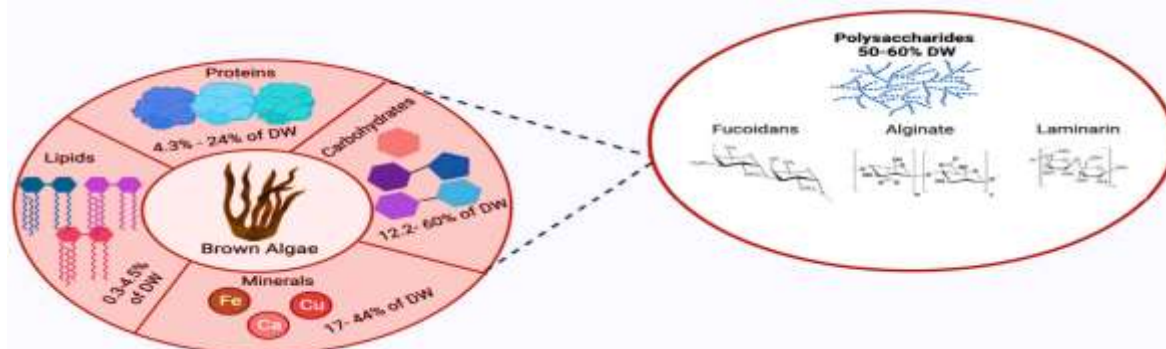


Fig1. Scheme showing the composition of brown algae [5].

گلوکز، گالاکتوز، مانوز و غیره تشکیل شده است. این ترکیب را می‌توان در انواع جلبک‌های دریایی قهوه‌ای از جمله *Laminaria* *sp*، *Fucus sp* و *Sargassum* و غیره یافت [7]. زیست فعالی فوکوئیدان می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند منبع خاص جلبک دریایی قهوه‌ای، سطوح سولفات و فوکوز، انواع مونوساکاریدهای موجود، روش استخراج یا عوامل زیستی و غیرزیستی قرار بگیرد [6]. روش‌های مختلف استخراج بر ماهیت فوکوئیدان‌ها تأثیر می‌گذارد و در عین حال ساختار شیمیایی آنها را تغییر می‌دهد. شرایط استخراج شامل زمان استخراج، دمای استخراج، حلال، زمان چرخه و قدرت استخراج است. به طور معمول، پلی‌ساکاریدهای جلبک دریایی از طریق استخراج آبی در مقادیر مختلف

فوکوئیدان به دلیل خاصیت امولسیون کنندگی به عنوان یک ماده با ارزش در صنایع غذایی نیز محسوب می‌شود و همچنین فوکوئیدان‌ها دارای بالاترین میزان اسید اورونیک و همچنین دارای بالاترین فعالیت در مهار رادیکال‌های آزاد هستند [6]. به طور خاص، تقاضای فزاینده‌ای برای جداسازی پپتیدهای فعال زیستی از جلبک دریایی وجود دارد. حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد از وزن خشک جلبک‌های دریایی قهوه‌ای از فوکوئیدان تشکیل شده است. فوکوئیدان دارای وزن‌های مولکولی متفاوت است، بسته به روش استخراج به طور معمول، ۱۰۰ ~ ۱۰۰۰ کیلو دالتون شناخته شده است. فوکوئیدان، یک پلی‌ساکارید سولفات غنی شده از سولفات ال-فوکوز همراه با مقادیر کمی از مونوساکاریدهای دیگر مانند

استخراج، درجه قرار گرفتن در معرض (تنش مکانیکی)، شوری (تنش اسمزی)، زمان برداشت و نور هستند که بر ساختار فوکوئیدان در گونه‌های جلبکی تأثیر می‌گذارند [12]. عوامل مختلف می‌توانند بر خواص فیزیکی و شیمیایی و بازده و کیفیت فوکوئیدان استخراج شده تأثیر بگذارند، یکی از مهمترین عوامل دمای استخراج است که دمای بالا می‌تواند باعث تخریب ساختاری فوکوئیدان شود و فعالیت زیستی آن را کاهش دهد. یکی دیگر از عوامل مهم pH محیط استخراج است که محیط اسیدی یا قلیایی شدید ممکن است ترکیبات شیمیایی فوکوئیدان را تغییر داده و فعالیت زیستی آن را تحت تأثیر قرار دهد. عامل دیگر نیز زمان استخراج است به این صورت که افزایش زمان استخراج ممکن است منجر به افزایش بازده شود، اما در شرایط نامناسب می‌تواند منجر به تخریب پلی ساکاریدها گردد [13]. ساراوانا و همکاران در سال ۲۰۱۶، فعالیت‌های امولسیون کنندگی فوکوئیدان استخراج شده از *S. japonica* را بررسی کردند. نتایج نشان داد که فوکوئیدان فعالیت امولسیون کنندگی خوبی برای گل آفتاب گردان، روغن سویا و روغن کانولا با فعالیت امولسیون کنندگی بین ۴۰ تا ۶۰ درصد نشان داد [14]. در پژوهشی که توسط Hong Lee همکاران انجام شد، ویژگی‌های مولکولی و فعالیت‌های ضد التهابی فوکوئیدان که از *E. cava* استخراج و با کروماتوگرافی تبادل یونی تکه تکه شدند، مورد بررسی قرار گرفت. فوکوئیدان استخراج شده عمدتاً شامل کربوهیدرات‌ها (۵۱/۸٪)، اسید اورونیک (۱۱/۳٪) و سولفات‌ها (۲۰/۱٪)، با مقادیر کمی پروتئین (۸/۷٪) بود. کروماتوگرافی تبادل یونی منجر به شناسایی سه فوکوئیدان با ترکیبات شیمیایی و وزن مولکولی متفاوت شد. این فوکوئیدان‌های *E. cava* توانایی قابل توجهی در کاهش تولید NO از ماکروفاژهای خام ۲۶۴/۷ نشان دادند، که نشان می‌دهد ممکن است عوامل ضد التهابی قوی باشند. مطالعه حاضر کاربردهای احتمالی این فوکوئیدان‌ها را به عنوان مواد غذایی دارویی، دارویی و عملکردی نشان می‌دهد [15].

pH استخراج می‌شوند، که معمولاً از اسیدها و بازهای قوی یا محلول کلرید سدیم و عملیات هیدروترمال برای استخراج اولیه استفاده می‌کنند. فوکوئیدان به عنوان محلول در آب گرم و همچنین محلول‌های اسیدی و نمکی شناخته شده است، معمولاً برای استخراج فوکوئیدان با حلال آب به دمای بالاتری نیاز است [8]. به همین علت روش‌های استخراج آبی به علت نیاز به حجم زیاد منابع آبی و مواد شیمیایی و همچنین زمان استخراج طولانی (گاهی اوقات در دماهای بالا) و همچنین به علت تولید زباله‌های آلی خطرناک بازده کمی داشته و خیلی کارآمد نیستند و می‌توانند تأثیر مضر بر فعالیت‌های زیستی فوکوئیدان داشته باشند [9]. روش‌های جایگزین امیدوار کننده شامل استخراج به کمک اولتراسوند (UAE)^۱، استخراج به کمک آنزیم (EAE)^۲، استخراج مایع تحت فشار (PLE)^۳، استخراج به کمک مایکروویو (MEA)^۴، استخراج مایع فوق بحرانی (SFE)^۵ و استخراج آب زیر بحرانی (SWE)^۶ می‌توانند فناوری‌های بهتری برای دستیابی به بازده استخراج بالاتری باشند [10]. مطالعه‌ای که توسط هانس و همکاران در سال ۲۰۲۳ انجام شد، در این مطالعه تأثیر تکنیک‌های استخراج سنتی و سبزتر را بر بازده فوکوئیدان، ترکیب مونوساکارید، خواص ساختاری، و فعالیت‌های بیولوژیکی و آزمایشگاهی از *T. conoides* و *P. tetrastrumatica* مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که در بین روش‌های آبی، شیمیایی، SCWE، EAE و UAE، روش SCWE بالاترین بازده فوکوئیدان یعنی ۱۳ درصد را در زمان استخراج کمتر ارائه داد. این مطالعه نشان داد که با استفاده از روش آب زیر بحرانی، بازده فوکوئیدان نسبت به روش اسید معمولی تا ۳۰ درصد افزایش یافت. همچنین وجود محتوای سولفات بالا (۳۲/۹ درصد) و ترکیبات پلی فنلی باعث افزایش ارزش فوکوئیدان و در نتیجه فعالیت آنتی اکسیدانی آن شد که ممکن است از نظر صنعتی به صنایع غذایی و دارویی مرتبط باشد [11].

۲- خواص فیزیکی و شیمیایی فوکوئیدان

فعالیت‌های زیستی فوکوئیدان تحت تأثیر ویژگی‌های مانند درجه سولفات، ترکیب مونوساکارید، موقعیت جغرافیایی، فرآیند

4- Microwave-Assisted Extraction

5- Supercritical Fluid Extraction

6- Subcritical Water Extraction

1 -Ultrasound-assisted extraction

2 -Enzyme Assisted Extraction

3 -Pressurized liquid extraction

۳- استخراج و تولید فوکوئیدان

تعداد فزاینده‌ای از تحقیقات در چندسال گذشته روند استخراج فوکوئیدان را مورد بررسی قرار داده اند. ارزش اقتصادی صنعتی و رشد سریع جلب‌های دریایی منجر به در نظر گرفتن فناوری‌های پیشرفته مانند فناوری‌های مایکروویو و اولتراسوند در افزایش روش‌های فرآوری موجود شده است [16]. این فناوری‌ها با «شیوه‌های عملی» متفاوت، تجزیه دیواره‌های سلولی جلبک‌های دریایی قهوه‌ای را هدف قرار می‌دهند، جایی که بیشتر مولکول‌های فعال زیستی، از جمله فوکوئیدان‌ها، در آن قرار دارند. در واقع این روش‌ها می‌توانند امکان استفاده از آب را به عنوان عامل استخراج با زمان عملیات کوتاه فراهم کنند و همچنین روش‌های مختلف استخراج می‌تواند ساختارهای شیمیایی فوکوئیدان‌ها را تحت تاثیر قرار دهد [17]. علاوه بر این، استخراج به عوامل مختلفی مانند حلال، زمان استخراج، نسبت حلال جامد و قدرت استخراج و زمان چرخه بستگی دارد. دمای استخراج بالاتر حلالیت املاح را افزایش می‌دهد و خواص انتقال آب را بهبود می‌بخشد و همچنین انتشار را افزایش می‌دهد و ویسکوزیته، چگالی و کشش سطحی را کاهش خواهد داد. این متغیر تأثیر مشخصی بر انتخاب پذیری دارد، زیرا قطبیت آب را می‌توان با انتخاب مناسب فشار و دما تنظیم کرد. دماهای بالاتر معمولاً منجر به استخراج سریع و حل شدن مولکول‌های آپلار می‌شود و همچنین تشکیل ترکیبات جدید با فعالیت بهبودیافته مشاهده خواهد شد. دما همچنین در آزادسازی ترکیباتی که بخشی از دیواره‌های سلولی را تشکیل می‌دهند، تعیین‌کننده است [18]. نتایج مطالعات مختلف نشان داده یکی از فاکتورهای مهم در تولید فوکوئیدان زمان استخراج است [19]. در واقع استخراج فوکوئیدان از گونه‌های علف‌های هرز دریایی قهوه‌ای معمولاً شامل تیمارهای چند مرحله‌ای، اسید داغ یا CaCl_2 است که هر مرحله ممکن است چندین ساعت طول بکشد ولی استفاده از روش‌های جایگزین مانند روش استخراج آب زیر بحرانی (SWE) به علت عدم نیاز به حلال شیمیایی و تولید زباله کمتر، می‌تواند عملکرد فوکوئیدان را بهبود ببخشد [20]. استخراج ترکیبات زیستی شامل چندین مرحله (تهیه نمونه، پیش تصفیه، استخراج، بازیافت پلیمر و خالص سازی) و بهینه سازی پارامترها است که روش‌های استخراج را می‌توان به

روش‌های حلال کلاسیک و روش‌های مدرن طبقه‌بندی کرد. روش‌های استخراج مدرن مانند استخراج سیال فوق بحرانی (SFE)، استخراج به کمک اولتراسوند (UAE)، استخراج به کمک آنزیم (EAE) و استخراج به کمک مایکروویو (MAE) با زمان‌های استخراج کوتاه، بازده تولید بالا، و استفاده از حجم‌های استخراج کوچک و حل‌کننده‌های غیر خورنده برای حل متقابل استخراج مشخص می‌شوند [21]. مطالعه‌ای توسط Mohd Fauziee و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شد، که در این پژوهش فوکوئیدان، لامینارین و آلژینات با موفقیت از جلبک‌های دریایی قهوه‌ای مالزی، یعنی *S. polycystum*، *P. boryana* و *T. ornata* استخراج شدند. همه این پلی ساکاریدها ویژگی‌های متمایز خود را نشان دادند. همه این پلی ساکاریدها با فعالیت آبی بین ۰/۶۳ تا ۰/۷۱ نسبتاً پایدار در نظر گرفته شدند و با رنگ مایل به قهوه‌ای ظاهر شدند. تجزیه و تحلیل FTIR^۲ نشان داد که این پلی ساکاریدها گروه‌های عملکردی مختلفی را نشان می‌دهند، همچنین نشان داده شد که پلی ساکاریدهای جلبک‌های دریایی قهوه‌ای مختلف دارای ساختارهای شیمیایی متفاوتی هستند. همچنین همه پلی ساکاریدها فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی متفاوتی از خود نشان دادند، که نتایج این پژوهش نشان داد که فوکوئیدان‌ها دارای فعالیت‌های مهار رادیکال آزاد DPPH قوی هستند، در حالی که لامینارین‌ها فعالیت‌های مهار رادیکال OH قوی را داشتند [22]. در مطالعه‌ای که Laeliocattleya و همکاران در سال ۲۰۲۵ انجام دادند، عصاره فوکوئیدان از *S. echinocarpum* به طور خاص برای بررسی ویژگی‌ها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن استخراج شد. نتایج نشان داد که عصاره فوکوئیدان دارای فوکوز، سولفات و مقادیر کمی گالاکتوز، مانوز، زایلوز و همچنین گروه‌های آمینه و همچنین دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالقوه بود که تحت تأثیر دما و زمان استخراج قرار داشت و ویژگی‌های توپولوژی و مورفولوژی عصاره نیز تحت تأثیر تیمار استخراج قرار گرفت. در واقع دما و زمان استخراج مناسب، منجر به افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی شد. بنابراین این پژوهش نشان داد که بررسی خواص و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالقوه عصاره فوکوئیدان از *S. echinocarpum* می‌تواند جایگزینی برای ایجاد یک آنتی‌اکسیدان طبیعی، به ویژه با استفاده

از جلبک دریایی قهوه‌ای که به طور مطلوب استفاده نشده است، ارائه دهد [23].

۱.۳. استخراج اولتراسونیک (UAE)

یکی از روش‌های ساده و موثر دپلمیریزاسیون فوکوئیدان روش اولتراسوند است که منجر به کاهش وزن مولکولی بدون تغییرات ساختاری قابل توجه در ماکرومولکول‌ها می‌شود. امواج اولتراسونیک سبب بالا بردن راندمان فرآیند انتقال جرم و استخراج می‌شوند و مزایایی از جمله هزینه کم، استفاده راحت، کاهش زمان استخراج، انرژی، مواد شیمیایی و حلال و همچنین افزایش بازده استخراج در مقایسه با استخراج با حلال‌های معمولی می‌شوند [24]. روش استخراج اولتراسونیک برای استخراج فوکوئیدان از جلبک مفید است. این روش ساده است و در مقیاس صنعتی قابل استفاده است. با این حال، استفاده از روش اولتراسونیک در ترکیب با روش‌های شیمیایی (به عنوان مثال، اسیدی، آنزیمی) و فیزیکی (به عنوان مثال، تابش مایکروویو) امکان افزایش بازده محصول مورد نظر را فراهم می‌کند [25]. تجهیزات اولتراسوند می‌تواند حمام اولتراسونیک (صوت غیر مستقیم) یا پروب اولتراسونیک (صوت مستقیم) باشد تفاوت این دو در شرایط عملیاتی و نحوه تاثیر امواج اولتراسوند بر روی نمونه است. حمام اولتراسونیک در فرکانس ۴۰ تا ۵۰ کیلو هرتز و با توان ۵۰ تا ۵۰۰ وات کار می‌کند، اما کاوشگر اولتراسونیک فقط با فرکانس ۲۰ کیلو هرتز کار می‌کند. نمونه‌ها در حمام اولتراسونیک غوطه‌ور می‌شوند، در حالی که پروب اولتراسونیک در نمونه قرار می‌گیرد [26]. امواج اولتراسوند (US)، در فرکانس‌هایی در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ مگاهرتز، از طریق یک محیط الاستیک منتشر می‌شوند و چرخه‌های فشرده‌سازی و انبساط متوالی را القا می‌کنند. این امر باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌شود که منجر به تولید، رشد و فروپاشی حباب‌های پر از گاز و بخار می‌شود. انفجار حباب‌های کاویتاسیون باعث ایجاد ریزتوربولانس، برخورد‌های بین ذره‌ای با سرعت بالا و آشفتگی در ذرات ریز متخلخل خواهد شد که انتشار داخلی را تسریع می‌کند [27]. نیروهای برشی زیاد ناشی از کاویتاسیون در نزدیکی مواد جامد می‌تواند باعث لایه برداری سطحی، فرسایش و ریزش‌سختگی‌ها به مواد متخلخل‌تر شود که دسترسی حلال به ترکیبات هدف را تسهیل می‌کند. اگر چه افزایش دما حلالیت املاح را افزایش می‌دهد، اما برای جلوگیری از تخریب ترکیبات قابل انعطاف، واکنش‌های نامطلوب و کنترل کاویتاسیون به کنترل دقیق نیاز است، زیرا اثرات سونوشیمیایی در دماهای پایین مطلوب

است. به منظور حفظ دما در طول استخراج، از حمام‌های ترموستات شده یا حمام‌های یخ استفاده می‌شود [28].

روش اولتراسوند همچنین می‌تواند انتقال جرم را بهبود بخشد و منجر به بازده محصول بالاتر با کاهش زمان پردازش و مصرف حلال شود. علاوه بر این اثرات فیزیکی، اثرات شیمیایی مربوط به وجود بخار حلال، فشارها و دماهای بالا در داخل حباب کاویتاسیون، به نفع فرآیند استخراج است [18]. قرار گرفتن در معرض اولتراسونیک با فرکانس پایین برای پلیمریزاسیون مواد پلیمری، از جمله مواد طبیعی، قابل استفاده است و برای جداسازی پلیمرهای بیوپلیمرهای مختلف، از جمله پلی ساکاریدها، DNA و غیره بدون تغییر در ساختار شیمیایی آنها استفاده می‌شود، برای کاهش وزن مولکولی پلیمرها از امواج اولتراسونیک با فرکانس ۱۶ کیلو هرتز استفاده می‌شود. پردازش اولتراسونیک بر اساس پدیده کاویتاسیون است. در نتیجه کاویتاسیون، امواج ضربه‌ای، گرمایش موضعی شدید (حدود ۵۰۰۰ درجه سانتیگراد) و فشار بالا (حدود ۱۰۰۰ اتمسفر) ایجاد می‌کند، عواملی که بر سرعت تخریب پلیمر در طول پلیمریزاسیون اولتراسونیک تأثیر می‌گذارند عبارتند از شدت اولتراسونیک، مدت زمان استخراج و غلظت محلول که افزایش شدت اولتراسونیک، حباب‌های کاویتاسیون بیشتری تولید می‌کند که به فرآیند تخریب کمک خواهد کرد [29]. زمان و قدرت اولتراسونیک این را می‌توان اینگونه توضیح داد که افزایش زمان استخراج، سبب تسهیل توانایی پودر جلبک دریایی قهوه‌ای برای تماس با حلال خواهد شد. به طور همزمان، قدرت فراصوت بالاتر که به شکستن سلول‌های جلبک دریایی قهوه‌ای کمک می‌کند منجر به مقدار بیشتری فوکوئیدان آزاد شده در حلال می‌شود. با این حال، زمان استخراج بیش از حد طولانی (بیش از ۵۰ دقیقه) همراه با قدرت مافوق صوت بسیار بالا (بیش از ۳۶۰ وات) باعث تخریب فوکوئیدان می‌شود [30]. تحقیقاتی که بر روی استخراج فوکوئیدان از *Sargassum siliculosum*، *Sargassum mclurei*، *Sargassum muticum* و *Sargassum wightii* انجام شد نشان داد که پتانسیل استخراج با کمک اولتراسوند می‌تواند جایگزینی سریع‌تر و موثرتر نسبت به روش‌های دیگر باشد، همچنین این بررسی‌ها نشان داد که عملکرد فوکوئیدان را می‌توان به طور قابل توجهی با استخراج به کمک اولتراسوند افزایش داد، در حالی که زمان استخراج کاهش یافت [24]. Dwijayanto و همکاران در سال ۲۰۲۵، ویژگی‌های ساختاری و عملکرد استخراج فوکوئیدان

فوکوئیدان تولید میکند. به علت این که امواج اولتراسونیک یک اثر کاویتاسیون دارد که میتواند لیز دیواره سلولی و نفوذ حلال را با کاهش مقاومت انتقال جرم و افزایش انتشار پلی ساکارید بهبود ببخشد و فوکوئیدان تولیدی با هرسه روش فعالیت آنتی اکسیدانی متوسطی از خود نشان دادند [31].

Table 1. Fucoidan extraction yields obtained using the conventional, microwave and ultrasound-assisted extraction methods

Parameter	Conventional	Microwave	Ultrasound
Extraction yield (%)	2.399±0.248	2.494±0.004	2.772±0.154

را از ماتریس نمونه به حلال افزایش می‌دهد. در واقع سیستم مخازن باز مایکروویو تحت فشار اتمسفر می‌تواند در حداکثر دمای تعیین شده توسط نقطه جوش حلال‌ها کار کند. این نوع استخراج مبتنی بر امواج الکترومغناطیسی است که منجر به یک منبع گرمای توزیع شده می‌شود که تخریب دیواره سلولی و آزاد شدن فوکوئیدان را در حلال استخراج آبی افزایش می‌دهد [34]. این روش با موفقیت ترکیبات زیست فعال متنوعی را از جلبک‌های قهوه‌ای، از جمله فوکوئیدان‌ها و پلی فنول‌ها استخراج کرده است که کاهش زمان استخراج مرتبط با MAE با اصول صرفه جویی در انرژی مطابقت دارد و آن را به عنوان یک جایگزین سازگار با محیط زیست برای روش‌های معمولی قرار می‌دهد. MAE شامل ترکیبی از اثرات حرارتی و غیر حرارتی است که به طور هم افزایی برای افزایش استخراج ترکیبات زیست فعال از مواد گیاهی، از جمله جلبک قهوه‌ای، عمل می‌کنند [35]. مکانیسم‌های اولیه درگیر در استخراج مایکروویو شامل اثرات حرارتی است به این صورت که هنگامی که انرژی مایکروویو اعمال می‌شود، باعث گرم شدن سریع و یکنواخت حلال و ماتریس نمونه می‌شود. این گرمایش موضعی منجر به افزایش دما در ماتریس می‌شود که به نوبه خود حلالیت و انتشار ترکیبات زیست فعال را افزایش می‌دهد. افزایش دما می‌تواند باعث ضعیف شدن دیواره‌های سلولی شود و آزاد شدن ترکیبات در حلال استخراج را تسهیل می‌کند [36]. اثر بعدی اثرات غیر حرارتی (گرمایش دی الکتریک) است که در این اثر تشعشعات مایکروویو همچنین با مولکول‌های قطبی درون ماتریس نمونه برهمکنش می‌کند و باعث ایجاد چرخش مولکولی و گرمایش اصطکاکی می‌شود. این پدیده که به عنوان گرمایش دی الکتریک شناخته می‌شود، منجر به گرمایش داخلی سریع خود ماتریس می‌شود. ترکیبات غیر قطبی، مانند لیپیدها و اسانس‌ها، به

Sargassum. sp. با استفاده از روش‌های استخراج معمولی و مایکروویو و اولتراسونیک باهم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که استخراج به کمک اولتراسونیک مطابق با (جدول ۱) بیشترین بازده را داشت همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که که استفاده از روش حمام اولتراسونیک ۲/۵ برابر بیشتر از روش معمولی،

مطالعه‌ای که توسط Antonisamy و همکاران در ۲۰۲۴ انجام شد، تأثیر روش‌های استخراج بر ویژگی‌های ساختاری فوکوئیدان در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استخراج اولتراسونیک محتوای فنلی کل و آلودگی پروتئین را کاهش داده و خلوص فوکوئیدان را بهبود می‌بخشد. روش استخراج مورد استفاده تأثیر معنی داری بر محتوای کربوهیدرات فوکوئیدان استخراج شده نداشت. پایداری حرارتی فوکوئیدان از *S. ilicifolium* کاربردهای صنعتی بالقوه آن را نشان می‌دهد. ماهیت آمورف و حلالیت افزایش یافته فوکوئیدان استخراج شده توسط حمام اولتراسونیک کاربرد قوی در دارورسانی دارد. مقادیر کمتر IC50 مشاهده شده برای فوکوئیدان به دست آمده از طریق روش حمام اولتراسونیک نشان دهنده قدرت بالاتر در مبارزه با استرس اکسیداتیو، التهاب و تکثیر سلول‌های سرطانی است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که روش استخراج نقش مهمی در تعیین زیست فعالی فوکوئیدان ایفا می‌کند. به طور کلی ادغام استخراج اولتراسونیک با سایر فن‌آوری‌های استخراج سبز، این روش را برای استخراج در مقیاس صنعتی ترکیبات فعال زیستی از منابع مختلف مناسب می‌کند [32].

۲.۳. استخراج به کمک مایکروویو (MAE)

استخراج مرسوم پلی ساکارید (CE) به طور کلی با آب، اسید رقیق یا قلیایی رقیق یا استخراج کمک آنزیمی (اختلال در اجزای دیواره سلولی گیاه، مانند سلولز، همی سلولز و پکتین) برای مدت طولانی و در دمای بالا و با استفاده از حجم حلال بزرگ انجام می‌شود در نتیجه از نظر اقتصادی و محیط زیست سازگار نیست [33]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند استخراج به کمک مایکروویو از انرژی برای گرم کردن استفاده می‌کند و یک روش سریع تر و کارآمدتر است و سرعت انتقال جرم املاح

زمان تصفیه کوتاه‌تر و مصرف حلال و انرژی کمتر دارد، بنابراین می‌توان از MAE برای استخراج پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و پلی‌فنول‌ها استفاده کرد [39]. در سیستم گرمایش MAE، امواج مایکروویو توسط نمونه‌ها جذب می‌شوند و به انرژی حرارتی تبدیل می‌شوند که رطوبت سلول‌ها را گرم می‌کند (شکل ۲). بنابراین، برای استخراج ترکیبات زیست فعال حساس به حرارت ممکن است مناسب نباشد. بسته به پیکربندی (باز یا بسته) شدت فرآیند متفاوت است. در حالی که مخازن باز در فشار اتمسفر کار می‌کنند، ظروف بسته تحت شرایط تحت فشار و در دماهای بالاتر استفاده می‌شوند، خواص فیزیوشیمیایی آب با شرایط زیر بحرانی مطابقت دارد مایکروویوهای مخزن باز یک جایگزین بسیار کارآمد و قابل کنترل برای گرمایش همرفتی ارائه می‌دهند، اما عملکرد در تجهیزات بسته باعث ایجاد اختلال بهتر در مجموعه دیواره سلولی می‌شود و در عین حال ساختار فوکوئیدان را حفظ می‌کند [40].

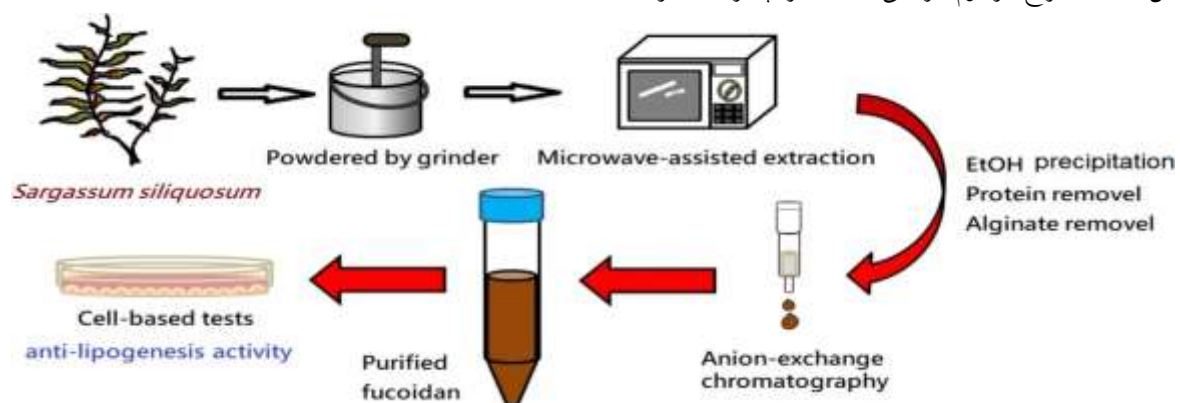


Fig 2. Preparation of fucoidan from brown algae by microwave method

فوکوئیدان، به طور موثر از ضایعات جلبک دریایی قهوه‌ای (*wakame*) با استفاده از روش MAE استخراج شدند. تأثیر دما و زمان استخراج بر عملکرد پروتئین و فوکوئیدان و در نهایت، استخراج مداوم پروتئین‌ها و فوکوئیدان نیز بر اساس شرایط استخراج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که روش MAE پیوسته می‌تواند پروتئین‌های زیست فعال، اجزای محلول در آب (پروتئین‌ها و پپتیدها) و فوکوئیدان را از ضایعات جلبک دریایی قهوه‌ای *U. pinnatifida* سریع‌تر از روش‌های استخراج حرارت معمولی استخراج کند. [38].

در مطالعه که توسط Ahmed Zayed و همکاران در سال ۲۰۲۳ انجام شد. آنها از استخراج به کمک مایکروویو (MAE) به عنوان

دلیل گرمایش انتخابی اجزای قطبی (مانند آب) در ماتریکس، به طور موثرتری استخراج می‌شوند. این اثر غیر حرارتی با شکستن ساختارهای سلولی و ترویج آزادسازی ترکیبات زیست فعال به استخراج کارآمد کمک می‌کند. یکی دیگر از اثرات مرتبط با استخراج مایکروویو، ایجاد حفره و میکرو حباب‌ها در حلال است همانطور که تشعشعات مایکروویو حلال را گرم می‌کند، تبخیر نیز می‌تواند رخ دهد که در نتیجه منجر به تشکیل و متعاقب آن فروپاشی میکرو حباب‌ها می‌شود [37].

MAE یک تکنیک جدید اختلال سلولی است که تشعشعات مایکروویو، با فرکانس ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز، توسط یک میدان الکتریکی و یک میدان مغناطیسی که به صورت عمود در نوسان هستند، تولید می‌شود. گرمایش داخلی مایکروویو کارآمد با تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به گرما توسط دو مکانیسم اصلی، قطبش دی الکتریک و هدایت یونی به دست می‌آید [38]. رسانش یونی به دلیل مقاومت محیط در برابر جریان یون‌ها هنگام اعمال میدان الکتریکی، گرما تولید می‌کند. فناوری MAE در مقایسه با روش‌های استخراج مرسوم مزایایی مانند تکرارپذیری بیشتر در

به طور کلی کارایی گرمایش مایکروویو به خواص دی الکتریک ماده و توانایی آن در جذب انرژی مایکروویو و دفع گرما بستگی دارد. بنابراین، برای ارزیابی اثر دما و زمان تیمار MAE بر عملکرد استخراج شده پروتئین از ضایعات جلبک دریایی *U. pinnatifida*، بهتر است از محدوده دمایی پایین‌تری استفاده شود [41]. روش استخراج به کمک مایکروویو زمان استخراج پایینی دارد و از این رو موجب کاهش هزینه‌ها در مقایسه با سایر تکنیک‌های استخراج معمولی می‌شود. علاوه بر این، MAE را می‌توان به عنوان یک تکنیک سازگار با محیط زیست به دلیل مصرف انرژی کمتر در نظر گرفت [19]. در مطالعه‌ای که توسط Chizuru Sasaki و همکاران در سال ۲۰۲۴ انجام شد، پروتئین و پلی ساکاراید سولفات

یک روش سبز برای استخراج فوکوئیدان از جلبک‌های دریایی قهوه‌ای مختلف، از جمله *F. spiralis*, *Fucus vesiculosus* و *Laminaria saccharina* استفاده کردند. با استفاده از شرایط استخراج یکسان، خصوصیات شیمیایی ناهمگنی فوکوئیدان‌ها را در میان راسته‌های جلبک قهوه‌ای، یعنی *Fucales* و *Laminariales* نشان داد، جایی که فوکوئیدان مشتق شده از *L. saccharina* ویژگی‌های متفاوتی را در رابطه با محتوای قند بالاتر و محتوای فوکوئیدان کمتر، علاوه بر الگوی سولفات کمتر و درجه سولفات منحصراً به فرد نشان داد. با این حال، MAE منجر به تولید محصولات با وزن مولکولی کمتر در مقایسه با استخراج با حلال کلاسیک و سایر روش‌های استخراج سبز به عنوان EAE شد. مراحل قبل از درمان برای حذف ترکیبات فعال زیست فعال استخراج شده بالقوه که احتمالاً با سنجش زیستی فوکوئیدان تداخل داشتند، موفقیت آمیز بود [40]. در پژوهشی که توسط Wang و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شد، فوکوئیدان از یک جلبک ماکرو قهوه‌ای (*Sargassum siliculosum*) با استفاده از استخراج به کمک مایکروویو (MAE) و استخراج به کمک اولتراسوند (UAE) استخراج شد. نتایج کاربرد استفاده از روش MAE تحت شرایط ۷۵۰ وات، ۱۰ دقیقه و نسبت مایع به جامد ۱۵ میلی‌لیتر بر گرم، بازده کل قند ۶/۹۴ درصد در وزن خشک، راندمان استخراج بالاتری را نشان داد. بر اساس گروه قند و سولفات (اجزای اصلی فوکوئیدان)، خلوص محصول پلی ساکارید سولفات نهایی نزدیک به ۰/۸۴ درصد شد و این محصول فوکوئیدان خالص شده فعالیت‌های بیولوژیکی مرتبط با ضد لیپوژن را با ۲/۸۹ درصد کاهش سنتز لیپید را در مقایسه با ماده کنترل آزاد-اسید نشان می‌دهد [24]. Quitain و همکاران در سال ۲۰۱۳ مطالعه‌ای تحت عنوان استخراج مایکروویو-هیدروترمال و تجزیه فوکوئیدان از دی اکسید کربن فوق بحرانی روغن زدایی *Undaria pinnatifida* انجام دادند. آن‌ها بررسی کردند که چگونه MAE بر تجزیه فوکوئیدان در ترکیبات با وزن مولکولی کم تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان داد که برخی از فعالیت‌های بیولوژیکی، مانند فعالیت ضد تکثیر فوکوئیدان، به وزن مولکولی فاکسیون‌های فوکوئیدان بستگی دارد. پلی ساکاریدها با وزن مولکولی پایین فعالیت ضد تکثیر بالاتری نشان دادند و محصولات با محتوای سولفات بالاتر فعالیت آنتی اکسیدانی قوی نشان دادند [42].

۳.۳. استخراج تحت فشار (PLE)

استخراج مایع تحت فشار (PLE) یک تکنیک استخراج خودکار نسبتاً جدید است که از فشار بالا استفاده می‌کند [43]. در استخراج تحت فشار از فشار بالا برای حفظ مایع حلال فراتر از نقطه جوش معمولی و دمای بالا برای استخراج ترکیبات از نمونه‌ها در محیطی بدون اکسیژن و نور، در مدت زمان کوتاه و با استفاده از حلال کمتر استفاده می‌شود و فشار بالا حلال را زیر نقطه جوش خود نگه می‌دارد، بنابراین اعمال دماهای بالاتر از نقطه جوش حلال (در فشار اتمسفر) امکان پذیر است [44]. این روش می‌تواند سرعت استخراج و بازده را با افزایش حلالیت و انتقال جرم بهبود بخشد. در میان حلال‌های مختلف آزمایش شده برای استخراج مایع تحت فشار *Saccharina japonica* (۲۰۰-۸۰ درجه سانتی گراد، ۵-۱۰۰ بار)، هیدروکسید سدیم بهترین بازده فوکوئیدان خام را ارائه داد. استخراج آب گرم تحت فشار یک مورد خاص از استخراج مایع تحت فشار زمانی است که از آب به عنوان حلال استفاده می‌شود [45]. این فناوری مزایای عملیاتی و زیست محیطی ناشی از استفاده از آب و بدون مواد شیمیایی را ارائه می‌دهد و جایگزین مناسب، مقرون به صرفه و ایمن از نظر زیست محیطی را در مقایسه با روش‌های دیگر ارائه می‌دهد. استخراج با کاهش زمان استخراج و نیاز به حلال تسهیل می‌شود [46]. برای استخراج و پلیمریزاسیون پلی ساکاریدها کارآمدتر است و این روش در یک محیط بدون اکسیژن و نور انجام می‌شود، بنابراین، زیست فعال‌ها حفظ می‌شوند. استخراج مایع تحت فشار به طور قابل توجهی بازده استخراج از *Himanthalia elongata* و *fucoidans* را با استفاده از یک حلال استخراج کننده تسریع شده با آب به عنوان حلال در ۱۰۳ بار بهبود بخشید [47]. Dobrin'ci'c و همکاران در سال ۲۰۲۱، پژوهشی برای استخراج پلی ساکاریدها از جلبک‌های قهوه‌ای *F. virsoides* و *C. barbata* با روش‌های MAE و PLE انجام دادند، نتایج این پژوهش نشان داد که تکنیک‌های استخراج پیشرفته، یعنی MAE و PLE، برای استخراج پلی‌ساکاریدهای سولفات از جلبک‌های قهوه‌ای *F. virsoides* و *C. barbata* با موفقیت استفاده و بهینه‌سازی شدند. اگرچه تکنیک‌های استخراج پیشرفته عملکرد پلی ساکارید را بیش از حد بهبود نمی‌بخشد، اما نشان داده شد که زمان استخراج از ۳ ساعت به ۳۰ دقیقه (PLE) یا ۱۰ دقیقه (MAE) کاهش یافت که به صرفه جویی قابل توجهی در انرژی کمک می‌کند. علاوه بر این، پلی ساکاریدهای به دست آمده توسط PLE دارای بالاترین محتوای PDI، فوکوز، و گروه سولفات و کمترین محتوای اسید اورونیک

را نشان داد [50]. در مطالعه‌ای که توسط Shiying Tang و همکاران در سال ۲۰۲۲ انجام شد، استخراج فوکوئیدان از *Kjellmaniella crassifolia* به کمک آنزیم بر اساس مطالعه سینتیکی هیدرولیز آنزیمی سلولز جلبکی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این مطالعه نشان داد که استخراج به کمک آنزیم از نظر بازده و خلوص محصول نسبت به استخراج آب گرم برتری داشت. در شرایط بهینه، عملکرد فوکوئیدان و مجموع محتوای قند کل و محتوای سولفات به ترتیب به ۴/۷۴ درصد و ۹۹/۵۱ درصد رسید. به طور خاص، فوکوئیدان استخراج شده دارای سطح قابل توجهی سولفات بالایی بود که با فعالیت‌های زیستی خاصی از فوکوئیدان مرتبط است و محصول فعالیت آنتی اکسیدانی قابل توجه و وابسته به غلظت را نشان داد [51].

۵.۳. حلال های یوتکتیک عمیق (DESs)

حلال‌های یوتکتیک عمیق (DESs)^۱ دارای آرایش‌هایی هستند که از مخلوط یوتکتیکی از بازها و اسیدهای Brønsted-Lewis ساخته می‌شوند که دارای انواع مختلفی از گروه‌های کاتیونی یا آنیونی است. DES ها به دلیل خواص خاص خود به عنوان نوعی مایع یونی طبقه‌بندی می‌شوند. آنها می‌توانند با یک یا چند کمپلکس به شکل مخلوط یکپارچه شوند تا یک تابع یوتکتیک با نقطه ذوب کمتر از یک ترکیب خاص تشکیل دهند [52]. DES ها سودمند هستند زیرا حاوی نمک‌های آمونیوم چهارتایی غیر سمی هستند و زیست تخریب پذیر و ارزان هستند. علاوه بر این، آنها دارای چندین ویژگی مانند فراریت کم، نقطه ذوب پایین و پایداری حرارتی بالا هستند و همچنین نیازی به مراحل تصفیه ندارند، از ترکیبات کم هزینه ساخته شده‌اند، سمیت کم یا ناچیز دارند و زیست تخریب پذیر هستند و به راحتی قابل بازیافت هستند. اخیراً، DES ها در چندین کاربرد مانند سنتز آلی، کاتالیز، محیط استخراج، واکنش آنزیمی، رسوب الکترونی و کروماتوگرافی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [53]. یکی از ویژگی‌های اصلی DES امکان استفاده به عنوان حلال استخراج کننده برای طیف وسیعی از املاح شیمیایی مختلف است، کاربرد آنها به عنوان حلال در فرآیندهای استخراج به خواص فیزیکی آنها مانند ویسکوزیته، چگالی، امتزاج‌پذیری و قطبیت بستگی دارد. انتخاب حلال‌هایی با

بودند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که MAE و PLE می‌توانند به طور مؤثری به عنوان یک روش بالقوه برای استخراج پلی‌ساکارید از جلبک‌های دریایی قهوه‌ای مورد استفاده قرار گیرند [33] روش استخراج تحت فشار دارای سیستم‌های استخراج و حلال سازگار با محیط زیست، تبعیض کمتر استخراج و زمان کوتاه‌تری بود. مطالعات نوظهور مشاهده کرده‌اند که استفاده از این روش فوکوئیدان‌های بسیار بالاتری تولید می‌کند و یک روش استخراج سازگار با محیط‌زیست است و سیستم‌های حلال، تبعیض استخراج کمتر و زمان کوتاه‌تری دارند و مبنای علمی برای صنعتی‌سازی تولید و استخراج فوکوئیدان فراهم می‌کنند [48].

۴.۳. استخراج به کمک آنزیم (EAE)

استفاده از استخراج آنزیمی برای پلی‌ساکاریدهای جلبک دریایی یک گزینه جذاب است که به ویژگی‌ها و مزایای منحصر به فرد آنزیم‌ها نسبت داده می‌شود. آنزیم‌ها می‌توانند واکنش‌ها را با ویژگی بالا کاتالیز کنند، آنها در یک محیط آبی ملایم عمل می‌کنند که می‌تواند کیفیت عصاره‌ها و فوکوئیدان را حفظ کند، EAE دارای پتانسل عالی برای کاربردهای صنعتی است زیرا به راحتی مقیاس پذیر است [10]. بخش بزرگی از پلی‌ساکاریدهای جلبک دریایی در دیواره سلولی تجمع یافته است که با پروتئین‌ها و سایر پلی‌ساکاریدها در ارتباط هستند که آنزیم‌ها این قابلیت را دارند که دیواره سلولی و پروتئین‌های مرتبط را مختل کنند که در نتیجه سبب دسترسی راحت تر به حلال و انحلال ترکیبات از دیواره سلولی می‌شود که آنزیم‌های تجاری مختلفی برای استخراج پلی‌ساکاریدها از جلبک دریایی استفاده شده است [9]. علی‌رغم مزایای عالی استفاده از استخراج آنزیمی، کاربرد آنها به علت هزینه بالای آنزیم‌ها و زمان طولانی استخراج و فرصت‌های محدود بازیافت آنزیم محدود می‌شود. از طرفی هیچ آنزیمی به طور خاص برای هیدرولیز و استخراج جلبک‌های دریایی مشخص نشده است [49].

Mapholi و همکاران در سال ۲۰۲۳، پتانسیل استخراج آنزیمی با کمک اولتراسوند (UAEE) را برای استخراج فوکوئیدان از *maxima Ecklonia* مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که استخراج آنزیمی با کمک اولتراسوند از نظر بازده کل کربوهیدرات از استخراج به کمک آنزیم و استخراج به کمک اولتراسوند بهتر عمل کرد و بعد از ۲۴۰ دقیقه افزایش ۲۰ درصدی

1 -Deep eutectic solvent

ویسکوزیته کم برای تسهیل اختلاط اما با اختلاف چگالی زیاد از ماتریس به منظور سهولت در جداسازی فازها راحت است [54]. در مطالعه‌ای که توسط Saravana و همکاران در سال ۲۰۱۸ انجام شد، حلال یوتکتیک عمیق همراه با استخراج آب زیر بحرانی پلی ساکاریدهای جلبک دریایی از *Saccharina japonica* مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، یک حلال یوتکتیک عمیق با مقدار کافی آب اضافه شد و به عنوان محیط استخراج مورد استفاده قرار گرفت. اندازه‌گیری‌های FTIR، TGA و DSC تأیید کردند که پلی ساکاریدهای استخراج‌شده دارای ویژگی‌های آلزینات و فوکوئیدان هستند و پلی ساکاریدهای خام فعالیت آنتی اکسیدانی متوسطی از خود نشان دادند همچنین نشان داده شد که مونوساکاریدهای فوکوئیدان دارای محتوای غنی از فوکوز بودند. بنابراین، این فرآیند به عنوان یک فرآیند استخراج تمیز، سریع و موثر نشان داده شد که باعث بهبود عملکرد پلی ساکاریدها از مواد جلبک دریایی شد [55]. در مطالعه‌ی Kyle James و همکاران در سال ۲۰۲۴، که با هدف مقایسه فناوری استخراج متوالی فوکوئیدان و آلزینات سدیم از *Ascophyllum nodosum* با استفاده از حلال گلیسرول و کولین کلرید انجام شد. آن‌ها دریافتند که فوکوئیدان استخراج شده از طریق این فرآیند استخراج با حلال DES در آب حاوی حداکثر ۳۹٪ گلیسرول وزنی است. اگر حلال‌های باقی‌مانده در آلزینات و فوکوئیدان استخراج‌شده به‌طور خام، به‌عنوان یک جزء فعال زیستی ترکیبی و نرم‌کننده برای پلیمرهای آلزینات مورد استفاده قرار گیرند، روش استخراج ترکیبی و حلال می‌تواند به عنوان یک پلیمر ذخیره‌سازی مواد غذایی کم‌هزینه قابل استفاده باشد [56].

۴- کاربرد فوکوئیدان در صنایع غذایی

جلبک‌های قهوه‌ای برای صدها سال بخشی از رژیم غذایی انسان بوده‌اند و در سال‌های اخیر، به دلیل تقاضای فزاینده برای رژیم غذایی سالم به دنبال منابع جایگزین، علاقه تجاری و علمی به جلبک‌های قهوه‌ای افزایش یافته است [57]. حدود ۸۵ درصد از تولید جهانی ماکرو جلبک را محصولات غذایی برای مصرف انسان تشکیل می‌دهد [58]. تنها دو محصول ماکرو جلبکی توسط اتحادیه اروپا به عنوان غذاهای جدید برای استفاده در غذا و مکمل های غذایی مجاز شده اند: عصاره های فوکوئیدان از *F.*

vesiculosus و *U. pinnatifida* و فلروتانن‌های استخراج شده از جلبک قهوه‌ای *E. cava* را می‌توان نام برد. فوکوئیدان‌ها در گونه‌های خوراکی مانند *L. japonica* و *C. okamuranus* نیز یافت می‌شوند [59]. فوکوئیدان‌ها به علت داشتن مزایایی مانند سمیت کم و فراهمی زیستی خوراکی بالا در صنایع غذایی بسیار کارآمد هستند. فقدان سمیت همراه با خواص باکتریواستاتیک نیز امکان استفاده از آنها را در صنایع غذایی فراهم می‌کند، ماندگاری محصولات را افزایش می‌دهد و میکرو فلور طبیعی انسان را در هنگام بلع از بین نمی‌برد [60]. برخی از محققان اثر افزودن جلبک به محصولات گوشتی را مورد مطالعه قرار دادند، نتایج مطالعات نشان داد که افزودن جلبک باعث بهبود مشخصات غذایی محصولات گوشتی و افزایش محتویات معدنی، فیبر غذایی و ترکیبات آنتی اکسیدانی با بهبود مشخصات غذایی محصولات گوشتی می‌شود. در پایان دوره ذخیره سازی، نویسندگان گزارش کردند که جلبک‌ها در برابر واکنش‌های اکسیداسیون با کاهش آلدئیدها، هیدروکربن‌ها، کتون‌ها و الکل‌ها محافظت می‌کنند [61]. همچنین نتایج مطالعات نشان داده که افزودن جلبک قهوه‌ای به محصولات نانوائی، سبب بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای، بافت و ظرفیت آنتی اکسیدانی آن‌ها خواهد شد، زیرا آنها مواد معدنی و محتوای فیبر غذایی را افزایش می‌دهند [62]. پوودا کاستیلو و همکاران (۲۰۱۸) فعالیت زیستی خاص فوکوئیدان، یک ترکیب جدا شده از *Fucus vesiculosus* را به عنوان یک نگهدارنده در یک نوشیدنی پاستوریزه که در یخچال به بازار عرضه می‌شود، بررسی کردند. نتایج نشان داد که فوکوئیدان به عنوان یک ضد میکروبی طبیعی در برابر لیستریا مونوسیتوزنز و سالمونلا تیفی موریوم، فرصت‌های جدیدی را برای استفاده از این ترکیب طبیعی به عنوان یک ماده فعال زیستی برای نگهداری مواد غذایی ایجاد می‌کند [63]. به طور کلی نوشیدنی‌های پایه فوکوئیدان می‌توانند برای تعدیل میکروبیوتای روده برای بهبود سلامت استفاده شوند. گزارش نشان می‌دهد که فرآوری مواد غذایی باعث کاهش غلظت فوکوئیدان در محصول نهایی می‌شود [64].

در مطالعه‌ای دیگر نیز مشاهده شد که نان غنی شده با فوکوئیدان دارای حجم زیاد، خرده‌های نرم تر و فعالیت بیولوژیکی (آنتی اکسیدانی و ضد سرطانی) پس از پخت در مقایسه با گروه کنترل

بود. علاوه بر این، نان غنی شده با فوکوئیدان کاهش شاخص گلیسمی را در مقایسه با نان شاهد نشان داد. تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نشان داد که فوکوئیدان موجود در نان بسیار قابل دسترسی زیستی (یعنی از ۷۷/۱ تا ۷۹/۸٪) در دستگاه گوارش است [64]. یکی دیگر از کاربردهای فوکوئیدان در صنایع غذایی، استفاده از آن ها در امولسیون ها می باشد. امولسیون ها به مخلوطی از مایعات غیر قابل اختلاط اطلاق می شود که حاوی فاز روغن و آب است که برای ارائه ترکیبات زیست فعال آبگریز و آبدوست استفاده می شود. که امولسیون معمولی حاوی روغن، آب و یک سورفکتانت است. برای طراحی امولسیون های مبتنی بر فوکوئیدان، فوکوئیدان به عنوان سورفکتانت یا امولسیفایر عمل می کند [65]. مطالعات مختلف توانایی امولسیون کنندگی فوکوئیدان ها را در امولسیون ها ثابت کردند. فوکوئیدان ها در امولسیون های روغن-آب، آب-روغن، آب-روغن-آب و روغن-آب-روغن استفاده می شوند. فوکوئیدان می تواند برای تولید امولسیون های مختلف مانند نانوامولسیون ها، امولسیون های چند لایه، امولسیون های چندگانه و امولسیون های Pickering استفاده شود. نانوامولسیون ها سیستم های شفاف و از نظر جنبشی پایدار هستند که از روغن، آب و یک امولسیفایر تشکیل شده اند [66]. Oliyaei و همکاران نانوامولسیون های تهیه شده از سطوح مختلف (۵/۰٪، ۱٪ و ۲٪) فوکوئیدان، صمغ عربی و کازئینات سدیم به عنوان امولسیفایر با توئین ۸۰ باهم مقایسه کردند، نتایج آن ها نشان داد که افزایش غلظت امولسیفایرها باعث کاهش اندازه قطرات شد. علاوه بر این، نانوامولسیون حاوی توئین ۸۰ به مدت ۱۵ روز پایدار بود و نانوامولسیون کازئینات سدیم، فوکوئیدان و صمغ عربی پایدار بالایی از خود نشان دادند [67]. فیلم های حاصل از جلبک دریایی را می توان به عنوان پوشش روی میوه ها، سبزیجات و سایر مواد غذایی فاسد شدنی برای افزایش عمر مفید آنها، کاهش از دست دادن رطوبت و جلوگیری از فساد میکروبی استفاده کرد این پوشش ها همچنین می توانند به عنوان بسته بندی فعال مواد غذایی برای تحویل ترکیبات زیست فعال مانند آنتی اکسیدان ها یا ضد میکروبی ها، فرموله شوند و ارزش غذایی و ایمنی محصول غذایی را افزایش دهند [68].

Yusi Lan و همکاران در سال ۲۰۲۴ پوشش هایی مبتنی بر فوکوئیدان استخراج شده را تهیه کردند و اثرات آن ها را بر ماندگاری میوه شلیل مورد ارزیابی قرار دادند، نتایج نشان داد که

استفاده از پوشش فوکوئیدان به صورت یک لایه نگهدارنده متراکم بر روی سطح میوه ها میتواند اثر مثبتی مثل کاهش قابل توجه تعرق، متابولیسم تنفسی، کاهش وزن و فساد در طول نگهداری در دمای اتاق (۲۰°C با رطوبت ۸۰٪) داشته باشد و همچنین به کاهش از دست دادن مواد مغذی میوه کمک کند و در نتیجه کیفیت ذخیره سازی کلی، طعم و مزه میوه های شلیل را افزایش دهد [69]. وانگ و همکاران در مطالعه ای که انجام دادند، فوکوئیدان را با کیتوزان مخلوط کردند و آنتوسیانین های اضافه شده از برگ های چمن کولئوس (*Plectranthus scutellarioides*) را به آن ها اضافه کردند. نتیجه ای این مطالعه نشان داد که افزودن فوکوئیدان در ماتریس کیتوزان منجر به کاهش مقادیر WVP و OP، استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست شد. از سوی دیگر، عصاره ترکیب شده با فوکوئیدان فعالیت ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی بالایی داشت و قادر به تشخیص فساد ماهی قزل آلا در طول زمان نگهداری بود [70]. Malekkolaei و همکاران در سال ۲۰۲۵ مطالعه ای با هدف ارزیابی اثربخشی پوشش های خوراکی کامپوزیتی ساخته شده از کیتوزان و فوکوئیدان در ترکیب با پروتئین هیدرولیزات ماهی کپور (CPH) (*Carassius carassius*) را انجام دادند. نتایج نشان داد که در غلظت های بالاتر، این ترکیبات به طور قابل توجهی خواص شیمیایی و میکروبیولوژیکی فیلدها را بهبود بخشیدند. در نتیجه مشخص شد که پوشش های خوراکی کامپوزیتی حاوی کیتوزان و فوکوئیدان، همراه با نانو پروتئین های هیدرولیز شده از ماهی کپور، به طور موثری ماندگاری و کیفیت فیلدهای ماهی را افزایش می دهند. این یافته ها بر پتانسیل بالای این پوشش های خوراکی در حفظ کیفیت و ایمنی محصولات غذاهای دریایی تأکید می کند [71]. پژوهشی توسط Bing Xu همکاران در سال ۲۰۲۱ با هدف بررسی اثرات پوشش های فوکوئیدان بر ماندگاری میوه های انبه انجام شد. در این پژوهش پوشش های فوکوئیدان با غلظت های مختلف (۱، ۳ و ۵ درصد) برای افزایش ماندگاری میوه های انبه در دمای اتاق (دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، رطوبت ۸۰ درصد) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پوشش هایی که حاوی بالاترین غلظت فوکوئیدان بودند بیشترین اثرات حفاظتی را از خود نشان دادند. با توجه به اینکه میوه های انبه میوه های هوازی تنفسی هستند، نتیجه نشان داد که پوشش های فوکوئیدان با دوزهای بالا توانستند پیک تنفسی را تا سه روز با تاخیر مواجه کنند در نتیجه می توانند به طور موثری عمر مفید میوه های انبه را افزایش دهند [72]. Luo و همکاران در سال

۵- مزایا و محدودیت‌های روش‌های استخراج سبز

به طور کلی همه روش‌های خالص سازی و استخراج، معمولی یا سبز فوکوئیدان که در (جدول ۲) به صورت کامل گردآوری شده است، دارای مزایا و معایبی هستند. در انتخاب فرآیند استخراج باید میزان بازیابی، هزینه، زمان، حجم حلال و افزایش مقیاس را در نظر بگیرد. در شرایط مناسب، استخراج آب ساده‌ترین روش برای استخراج پلی‌ساکارید از گیاهان، میکروب‌ها و جلبک‌ها است. با این حال، حرارت بالا و زمان‌های پردازش گسترده ممکن است پلی‌ساکاریدها و مواد شیمیایی فعال زیستی مهم را تخریب کند. در مقابل، روش‌های استخراج سبز می‌توانند با موفقیت پلی‌ساکاریدها را با زمان درمان کوتاه، مصرف حلال کم، بازده استخراج بالا و سایر ویژگی‌های غنی استخراج کنند [75].

۲۰۱۸، فوکوئیدان استخراج شده را به عنوان یک آنتی اکسیدان طبیعی در سوسیس به سبک چینی در طول نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی گراد به مدت ۱۸ روز استفاده کردند. در مقایسه با نمونه های شاهد، سوسیس‌های فوکوئیدان تغییرات کمتری در pH، روشنی، قرمزی، زردی و خواص حسی نشان دادند [73]. Ping Luo و همکاران در سال ۲۰۲۰ مطالعه‌ای تحت عنوان تأثیر پوشش خوراکی مبتنی بر فوکوئیدان بر سینتیک‌های تجزیه آنتی اکسیدانی میوه توت فرنگی در طی نگهداری سرد انجام دادند. آن‌ها اثر فوکوئیدان از *Laminaria japonica* (FL) بر روی تازه نگه داشتن توت‌فرنگی پس از برداشت را بررسی کردند، نتایج نشان داد که پوشش FL به طور موثری بروز پوسیدگی و کاهش ظرفیت آنتی اکسیدانی درون زرا کاهش داد و زمان ماندگاری توت فرنگی در یخچال را در دمای ۴ درجه سانتی گراد طولانی کرد. به طور کلی این مطالعه ثابت کرد که FL نوعی عامل تازه داری طبیعی برای میوه و سبزیجات پس از برداشت است [74].

Table 2. Extraction and purification of fucoidans

Species	Extraction method	Extraction conditions	Purification	Yield (%)	References
F. evanescens	Enzyme-assisted extraction	Cellulase and alginate lyase was added to the seaweed at 40 °C and pH adjusted to 6 for 24 h.	Anion-exchange chromatography using DEAE-Macroprep resin material.	18.2	[77]
A. nodosum	Enzyme-assisted extraction	Cellulase and β -glucanase was added to the seaweed at 50 °C and pH adjusted to 6 for 3 h	Ultrafiltration using a membrane of 100 kDa.	23.41	[78]
S. latissimi and Alaria esculenta	Enzyme-assisted extraction	cellulase blend Cellic® Ctec2 along with endo-(AMOR-PL7) and exo-acting (AMOR-PL17) alginate lyases was added to seaweeds at different ratios for 24 h (55 °C)	Not required as purified fucoidan was obtained	8-12 (S. latissimi) and 4-15 (A. esculenta)	[79]
N. zanardinii	Enzyme-assisted extraction	Alcalase was added to the seaweed at 50 °C and pH adjusted to 8 for 24 h. Viscozyme was added to the seaweed at 50 °C and pH adjusted 4.5 for 24 h	Dialysis of membrane 8.0 kDa.	4.28-5.58	[80]
F. virsoides	Microwave assisted extraction	Irradiation of seaweed in a microwave vessel at 80 °C for 2 min	Ethanol precipitation	13.19	[81]
A. nodosum	Microwave assisted extraction	Irradiation in a microwave reactor at 120 psi for 1 min.	Ethanol precipitation	14.02	[19]
S. muticum	Ultrasondasisted extraction	Extraction in an ultrasonic bath at room temperature with	Ethanol precipitation followed by size	4.60	[26]

		intensity 1.5A, 40Hz and power 150W for 5–30mins.	exclusion chromatography.		
A. nodosum	Ultrasound assisted extraction	Use of sonicator probe of power 750W, and frequency 20 kHz	Dialysis of membrane size 14 kDa	NR	[82]
Sargassum henslowianum C. Agardh.	Hot-water-assisted ultrasound extraction	Ultrasonicated at 350 W at 60 °C for 45 min. The solution was further extracted in a water bath (80 °C) for 3.5 h	DEAE cellulose 52 column (2.6 × 80 cm) step elution with different concentrations of NaCl	6.25	[83]
C. barbata	Pressurized liquid extraction	Extraction in accelerated solvent extractor of pressure 1500 psi, and a temperature of 100 °C for 5min.	Ethanol precipitation	6.43	[81]

بالقوه می‌تواند کیفیت عصاره‌ها را مختل کند [84]. روش استخراج سیال فوق بحرانی (SFE) شکلی از روش استخراج سبز است. عصاره‌های به دست آمده از این روش دارای درجه خلوص بالا و بدون هیچ گونه آلاینده هستند. عصاره‌های به دست آمده بدون استفاده از حلال‌ها و با حداقل مدت زمان استخراج، روشی ایده‌آل برای استخراج ترکیبات حساس به حرارت هستند، با این حال، این روش دارای معایبی مانند تجهیزات گران قیمت برای کاربردهای فشار بالا است. استخراج مولکول‌های قطبی ممکن است چالش‌هایی مانند هزینه پردازش و مصرف انرژی بالا را داشته باشد. به طور کلی روش استخراج سبز به دلیل هزینه‌های بالای پردازش و مصرف انرژی پرهزینه است. با این حال، استخراج کارآمد را با عملکرد خوب ارائه می‌دهد و به زمان کمتری نیاز دارد [85]. معایب و مزایای روش‌های استخراج فوکوئیدان در جدول ۳ ذکر شده است.

استخراج به کمک مایکروویو (MAE) در زمان کوتاهی انجام می‌شود و هم از حلال‌های آلی و هم آبی در این روش می‌توان استفاده کرد که این یک روش مناسب برای مواد شیمیایی حساس به حرارت است و از فرآیند سنتی سوکسله کاربردی‌تر است. فقط حلال‌هایی که دارای ثابت دی الکتریک بالا و ضریب اتلاف کم هستند برای این روش مناسب هستند. روش MAE خطر انفجار قابل توجهی دارد. روش‌های استخراج به کمک مایکروویو و استخراج سیال فوق بحرانی، علی‌رغم کاهش زمان استخراج، نیاز به سرمایه‌گذاری بالایی دارند، در روش استخراج به کمک آنزیم نیز با چالش انتخاب آنزیم مناسب مواجه هستند. در روش استخراج به کمک اولتراسوند اثربخشی استخراج به ترکیب ماتریکس گیاه بستگی دارد. حلال‌های ترجیحی برای روش اولتراسوند آن‌هایی هستند که کشش سطحی، ویسکوزیته و فشار بخار پایینی دارند. استفاده بیش از حد از سونیکاسیون به طور

Table 3. Advantages and disadvantages of fucoidan extraction methods

Disadvantages	benefits	Extraction methods
Low yield, extraction of unwanted compounds	Simple, safe, no chemicals required	hot water
Structural change, reduction in biological activities	Increase efficiency	dilute acid
High cost	Maintaining the structure of phycocyanin, environmentally friendly	enzymatic
Need for special equipment	Increase efficiency, reduce time	ultrasound
High cost, requires additional purification	Improve purity	organic solvents
Need for precise control of conditions	High speed, increased efficiency	Microwave

۶- نتیجه گیری

جلبک‌های بزرگ حاوی ترکیبات فعال زیستی دارای کاربرد مختلف در صنایع غذایی، آرایشی و بهداشتی و دارویی هستند. آنها پتانسیلی را برای توسعه محصولات کاربردی جدید نشان دادند که می‌تواند تأثیر مثبتی بر سلامت انسان داشته باشد. تکنیک‌های جایگزین استخراج سبز مدرن برای استخراج فوکوئیدان از جلبک قهوه‌ای در این بررسی ارائه شد، روش‌هایی مانند SFE، UAE، و MAE را می‌توان برای جداسازی ترکیبات زیست فعال خاص مانند فوکوئیدان به کار برد. روش‌های عصاره سبز بیشتر برای استخراج ترکیبات فعال زیستی استفاده می‌شوند، این روش‌ها سازگار با محیط زیست، با زمان کمتر و تولید با بازده بالا هستند. جلبک‌های دریایی حاوی آنتی‌اکسیدان‌هایی هستند که اکسیداسیون لیپیدها را کاهش می‌دهند، در نتیجه دوام و ارزش غذایی غذا را افزایش می‌دهند و باعث کاهش رادیکال‌های آزاد می‌شوند و رشد باکتری‌ها را به تاخیر می‌اندازند. مزیت اصلی این روش‌ها این است که استخراج ترکیبات هدف و حلالیت آنها را می‌توان با پارامترهای فرآیند اعمال شده هر روش کنترل کرد. پیشرفت‌های اخیر در ترکیبات زیست فعال جلبک دریایی، کیفیت بسته‌بندی مواد غذایی و خواص عملکردی را بهبود بخشید و نوآوری‌ها و پایداری تولید مواد غذایی را افزایش داد. منشاء طبیعی، زیست تخریب پذیری و پتانسیل برای ترکیب خواص عملکردی آنها را به گزینه‌های جذابی برای صنایع غذایی تبدیل می‌کند. ترکیبات جلبک دریایی منبع خوبی از عوامل ژل کننده، غلیظ کننده و امولسیون کننده در محصولات صنایع غذایی هستند. فیلم‌های مبتنی بر جلبک دریایی در بسته‌بندی پایدار برای محصولات تازه، غذاهای دریایی، نانوائی ها و محصولات شیرینی پزی کارایی عالی از خود نشان دادند. نتایج کلی نشان داد که مواد بسته‌بندی مواد غذایی مبتنی بر جلبک دریایی جایگزین امیدوارکننده و پایداری برای بسته‌بندی‌های پلاستیکی سنتی هستند.

بیانیه تامین مالی

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده‌است.

مشارکت نویسندگان

پریسا لطفی: اعتبار سنجی، تحقیق، منابع، گردآوری داده‌ها، نگارش، بررسی و ویرایش
سجاد پیرسا: مفهوم سازی، روش شناسی، نگارش، بررسی و ویرایش، مدیریت پروژه

بیانیه اخلاقی

این تحقیق کاملاً مطابق با اصول اخلاقی تعیین شده انجام شد. همه شرکت کنندگان پس از آگاهی کامل از اهداف و رویه‌های مطالعه، داوطلبانه در این تحقیق شرکت کردند. رضایت آگاهانه (کتبی یا شفاهی) از هر شرکت کننده اخذ شد و اطلاعات آنها با رعایت کامل محرمانگی مورد بررسی قرار گرفت و آنها حق انصراف از مطالعه در هر مرحله‌ای بدون هیچ پیامدی برای خود محفوظ داشتند.

تضاد منافع

همه نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته شده‌ای ندارند که بتواند بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر بگذارد.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر به دلیل ملاحظات حریم خصوصی در دسترس عموم نیستند، اما در صورت درخواست منطقی از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

۷- منابع

- [1] Sultana, F., Wahab, M. A., Nahiduzzaman, M., Mohiuddin, M., Iqbal, M. Z., Shakil, A., ... & Asaduzzaman, M. (2023). Seaweed farming for food and nutritional security, climate change

mitigation and adaptation, and women empowerment: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 8(5), 463-480.

- [2] Thao My, P. L., Sung, V. V., Dat, T. D., Nam, H. M., Phong, M. T., & Hieu, N. H. (2020). Ultrasound-assisted extraction of fucoidan from Vietnamese brown seaweed *Sargassum mclurei* and testing bioactivities of the extract. *ChemistrySelect*, 5(14), 4371-4380.
- [3] Lomartire, S., & Gonçalves, A. M. (2022). An overview of potential seaweed-derived bioactive compounds for pharmaceutical applications. *Marine Drugs*, 20(2), 141.
- [4] Konstantin, B., Anastasia, P., Nikolay, I., & Daria, P. (2023). Seasonal variations in the chemical composition of Arctic brown macroalgae. *Algal Research*, 72, 103112.
- [5] Flores-Contreras, E. A., Araújo, R. G., Rodríguez-Aguayo, A. A., Guzmán-Román, M., García-Venegas, J. C., Nájera-Martínez, E. F., ... & Parra-Saldivar, R. (2023). Polysaccharides from the *Sargassum* and brown algae genus: extraction, purification, and their potential therapeutic applications. *Plants*, 12(13), 2445.
- [6] Liu, J., Wu, S. Y., Chen, L., Li, Q. J., Shen, Y. Z., Jin, L., ... & Tong, H. B. (2020). Different extraction methods bring about distinct physicochemical properties and antioxidant activities of *Sargassum fusiforme* fucoidans. *International journal of biological macromolecules*, 155, 1385-1392.
- [7] Zhao, D., Xu, J., & Xu, X. (2018). Bioactivity of fucoidan extracted from *Laminaria japonica* using a novel procedure with high yield. *Food chemistry*, 245, 911-918.
- [8] January, G. G., Naidoo, R. K., Kirby-McCullough, B., & Bauer, R. (2019). Assessing methodologies for fucoidan extraction from South African brown algae. *Algal Res* 40, 101517.
- [9] Alboofetileh, M., Rezaei, M., & Tabarsa, M. (2019). Enzyme-assisted extraction of *Nizamuddinina zanardinii* for the recovery of sulfated polysaccharides with anticancer and immune-enhancing activities. *Journal of Applied Phycology*, 31(2), 1391-1402.
- [10] Bordoloi, A., & Goosen, N. J. (2020). A greener alternative using subcritical water extraction to valorize the brown macroalgae *Ecklonia maxima* for bioactive compounds. *Journal of Applied Phycology*, 32(4), 2307-2319.
- [11] Hans, N., Pattnaik, F., Malik, A., & Naik, S. (2023). Comparison of different green extraction techniques and their influence on chemical characteristics of sulfated polysaccharide (fucoidan) from *Padina tetrastomatica* and *Turbinaria conoides*. *Algal Research*, 74, 103199.
- [12] Zayed, A., Finkelmeier, D., Hahn, T., Rebers, L., Shanmugam, A., Burger-Kentischer, A., & Ulber, R. (2023). Characterization and cytotoxic activity of microwave-assisted extracted crude fucoidans from different brown seaweeds. *Marine drugs*, 21(1), 48.
- [13] Mabate, B., Daub, C. D., Pletschke, B. I., & Edkins, A. L. (2023). Comparative analyses of fucoidans from South African brown seaweeds that inhibit adhesion, migration, and long-term survival of colorectal cancer cells. *Marine Drugs*, 21(4), 203.
- [14] Saravana, P. S., Cho, Y. J., Park, Y. B., Woo, H. C., & Chun, B. S. (2016). Structural, antioxidant, and emulsifying activities of fucoidan from *Saccharina japonica* using pressurized liquid extraction. *Carbohydrate Polymers*, 153, 518-525.
- [15] Lee, S. H., Ko, C. I., Ahn, G., You, S., Kim, J. S., Heu, M. S., ... & Jeon, Y. J. (2012). Molecular characteristics and anti-inflammatory activity of the fucoidan extracted from *Ecklonia cava*. *Carbohydrate polymers*, 89(2), 599-606.
- [16] Fitton, J. H., Stringer, D. N., & Karpinić, S. S. (2015). Therapies from fucoidan: An update. *Marine drugs*, 13(9), 5920-5946.
- [17] Cikoš, A. M., Jokić, S., Šubarić, D., & Jerković, I. (2018). Overview on the application of modern methods for the extraction of bioactive compounds from marine macroalgae. *Marine drugs*, 16(10), 348.
- [18] Florez-Fernandez, N., Torres, M. D., González-Muñoz, M. J., & Dominguez, H. (2018). Potential of intensification techniques for the extraction and depolymerization of fucoidan. *Algal research*, 30, 128-148.
- [19] Nguyen, A. N., Van Ngo, Q., Quach, T. T. M., Ueda, S., Yuguchi, Y., Matsumoto, Y., ... & Thanh, T. T. T. (2024). Fucoidan from brown seaweed *Tubularia decurrens*: Structure and structure-anticancer activity relationship. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259, 129326.
- [20] Lorbeer, A. J., Lahnstein, J., Fincher, G. B., Su, P., & Zhang, W. (2015). Kinetics of conventional and microwave-assisted fucoidan extractions from the brown alga, *Ecklonia radiata*. *Journal of Applied Phycology*, 27(5), 2079-2087.

- [21] Zayed, A., & Ulber, R. (2020). Fucoidans: Downstream processes and recent applications. *Marine drugs*, 18(3), 170.
- [22] Fauziee, N. A. M., Chang, L. S., Mustapha, W. A. W., Nor, A. R. M., & Lim, S. J. (2021). Functional polysaccharides of fucoidan, laminaran and alginate from Malaysian brown seaweeds (*Sargassum polycystum*, *Turbinaria ornata* and *Padina boryana*). *International journal of biological macromolecules*, 167, 1135-1145.
- [23] Laeliocattleya, R. A., Yuniarta, Y., Risjani, Y., & Wulan, S. N. (2025). Characterization of 'novel fucoidan' extracted from brown seaweed (*Sargassum echinocarpum* J. Ag.) using Ultrasound-Assisted Extraction (UAE) and its potential antioxidant activity. *Natural Product Research*, 39(7), 1889-1901.
- [24] Wang, S. H., Huang, C. Y., Chen, C. Y., Chang, C. C., Huang, C. Y., Dong, C. D., & Chang, J. S. (2021). Isolation and purification of brown algae fucoidan from *Sargassum siliculosum* and the analysis of anti-lipogenesis activity. *Biochemical Engineering Journal*, 165, 107798.
- [25] Suprunchuk, V. (2021). Ultrasonic-treated fucoidan as a promising therapeutic agent. *Polymers in Medicine*, 51(2), 85-90.
- [26] Flórez-Fernández, N., López-García, M., González-Muñoz, M. J., Vilariño, J. M. L., & Domínguez, H. (2017). Ultrasound-assisted extraction of fucoidan from *Sargassum muticum*. *Journal of Applied Phycology*, 29(3), 1553-1561.
- [27] Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 34, 540-560.
- [28] Lavilla, I., & Bendicho, C. (2017). Fundamentals of ultrasound-assisted extraction. In *Water extraction of bioactive compounds*, 291-316.
- [29] Tecson, M. G., Abad, L. V., Ebajo Jr, V. D., & Camacho, D. H. (2021). Ultrasound-assisted depolymerization of kappa-carrageenan and characterization of degradation product. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105540.
- [30] Ramu, S., Murali, A., Narasimhaiah, G., & Jayaraman, A. (2020). Toxicological evaluation of *Sargassum Wightii* greville derived fucoidan in wistar rats: Haematological, biochemical and histopathological evidences. *Toxicology Reports*, 7, 874-882.
- [31] Dwijayanto, A., Al-Yousefi, A. M. A. A., Puspasari, I., & Markom, M. (2025). Comparative Study on the Extraction of Crude Fucoidan from Brown Seaweed using Conventional, Microwave and Ultrasound-Assisted Methods. *AJARCDE (Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment)*, 9(1), 1-6.
- [32] Antonisamy, A. J., & Rajendran, K. (2024). Comparative study on the extraction methods, characterization, and bioactivity of crude fucoidan, a polysaccharide derived from *Sargassum ilicifolium*. *Biochemical Engineering Journal*, 209, 109398.
- [33] Dobrincic, A., Pedisic, S., Zoric, Z., Jurin, M., Roje, M., Coz-Rakovac, R., & Dragovic-Uzelac, V. (2021). Microwave assisted extraction and pressurized liquid extraction of sulfated polysaccharides from *Fucus virsoides* and *Cystoseira barbata*. *Foods*, 10, 1481.
- [34] Amarante, S. J., Catarino, M. D., Marçal, C., Silva, A. M., Ferreira, R., & Cardoso, S. M. (2020). Microwave-assisted extraction of phlorotannins from *Fucus vesiculosus*. *Marine drugs*, 18(11), 559.
- [35] Cui, R., & Zhu, F. (2021). Ultrasound modified polysaccharides: A review of structure, physicochemical properties, biological activities and food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 107, 491-508.
- [36] Quitério, E., Grosso, C., Ferraz, R., Delerue-Matos, C., & Soares, C. (2022). A critical comparison of the advanced extraction techniques applied to obtain health-promoting compounds from seaweeds. *Marine drugs*, 20(11), 677.
- [37] Liu, Y., Liu, X., Cui, Y., & Yuan, W. (2022). Ultrasound for microalgal cell disruption and product extraction: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 87, 106054.
- [38] Sasaki, C., Tamura, S., Suzuki, M., Etomi, K., Nii, N., Hayashi, J., & Kanemaru, K. (2024). Continuous microwave-assisted step-by-step extraction of bioactive water-soluble materials and fucoidan from brown seaweed *Undaria pinnatifida* waste. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(6), 7673-7682.
- [39] Franca-Oliveira, G., Fornari, T., & Hernández-Ledesma, B. (2021). A review on the

- extraction and processing of natural source-derived proteins through eco-innovative approaches. *Processes*, 9(9), 1626.
- [40] Zayed, A., Finkelmeier, D., Hahn, T., Rebers, L., Shanmugam, A., Burger-Kentischer, A., & Ulber, R. (2023). Characterization and cytotoxic activity of microwave-assisted extracted crude fucoidans from different brown seaweeds. *Marine drugs*, 21(1), 48.
- [41] Magnusson, M., Glasson, C. R. K., Vucko, M. J., Angell, A., Neoh, T. L., & de Nys, R. (2019). Enrichment processes for the production of high-protein feed from the green seaweed *Ulva ohnoi*. *Algal Res* 41, 101555.
- [42] Quitain, A. T., Kai, T., Sasaki, M., & Goto, M. (2013). Microwave-hydrothermal extraction and degradation of fucoidan from supercritical carbon dioxide deoiled *Undaria pinnatifida*. *Industrial & engineering chemistry research*, 52(23), 7940-7946.
- [43] Wang, S. H., Huang, C. Y., Chen, C. Y., Chang, C. C., Huang, C. Y., Dong, C. D., & Chang, J. S. (2021). Isolation and purification of brown algae fucoidan from *Sargassum siliculosum* and the analysis of anti-lipogenesis activity. *Biochemical Engineering Journal*, 165, 107798.
- [44] Wu, S. C. (2017). Antioxidant activity of sulfated seaweeds polysaccharides by novel assisted extraction. *Solubility of Polysaccharides*; Xu, Z., Ed.; IntechOpen: London, UK, 89-108.
- [45] Balboa, E. M., Moure, A., & Domínguez, H. (2015). Valorization of *Sargassum muticum* biomass according to the biorefinery concept. *Marine Drugs*, 13(6), 3745-3760.
- [46] Rizkiyah, D. N., Putra, N. R., Idham, Z., Che Yunus, M. A., Veza, I., Harny, I., ... & Abdul Aziz, A. H. (2022). Optimization of red pigment anthocyanin recovery from *Hibiscus sabdariffa* by subcritical water extraction. *Processes*, 10(12), 2635.
- [47] Saravana, P. S., Cho, Y. J., Park, Y. B., Woo, H. C., & Chun, B. S. (2016). Structural, antioxidant, and emulsifying activities of fucoidan from *Saccharina japonica* using pressurized liquid extraction. *Carbohydrate Polymers*, 153, 518-525.
- [48] Chatzimitakos, T., Athanasiadis, V., Kotsou, K., Mantiniotou, M., Kalompatsios, D., Makrygiannis, I., ... & Lalas, S. I. (2024). Optimization of pressurized liquid extraction (PLE) parameters for extraction of bioactive compounds from *Moringa oleifera* leaves and bioactivity assessment. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(9), 4628.
- [49] Fertah, M. (2017). Isolation and Characterization of Alginate from Seaweed. *Seaweed Polysaccharides*, 11-26.
- [50] Mapholi, Z., & Goosen, N. J. (2023). Optimization of fucoidan recovery by ultrasound-assisted enzymatic extraction from South African kelp, *Ecklonia maxima*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 101, 106710.
- [51] Tang, S., Ma, Y., Dong, X., Zhou, H., He, Y., Ren, D., ... & Wu, L. (2022). Enzyme-assisted extraction of fucoidan from *Kjellmaniella crassifolia* based on kinetic study of enzymatic hydrolysis of algal cellulose. *Algal Research*, 66, 102795.
- [52] Zainal-Abidin, M. H., Hayyan, M., Hayyan, A., & Jayakumar, N. S. (2017). New horizons in the extraction of bioactive compounds using deep eutectic solvents: A review. *Analytica chimica acta*, 979, 1-23.
- [53] Irianto, I., Naryaningsih, A., Trisnawati, N. W., Astuti, A., Komariyah, K., Qomariyah, L., ... & Putra, N. R. (2024). From sea to solution: A review of green extraction approaches for unlocking the potential of brown algae. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48(1), 1-21.
- [54] Cunha, S. C., & Fernandes, J. O. (2018). Extraction techniques with deep eutectic solvents. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 105, 225-239.
- [55] Saravana, P. S., Cho, Y. N., Woo, H. C., & Chun, B. S. (2018). Green and efficient extraction of polysaccharides from brown seaweed by adding deep eutectic solvent in subcritical water hydrolysis. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1474-1484.
- [56] James, K., Ramirez, J., Barner, L., & Moghaddam, L. (2024). Technology comparison for sequential extraction of fucoidan and sodium alginate from *Ascophyllum nodosum* using a glycerol and choline chloride solvent. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, 100707.
- [57] Choi, Y. Y., Lee, S. J., Lee, Y. J., Kim, H. S., Eom, J. S., Kim, S. C., ... & Lee, S. S. (2020). New challenges for efficient usage of *Sargassum fusiforme* for ruminant production. *Scientific reports*, 10(1), 19655.
- [58] Lähteenmäki-Uutela, A., Rahikainen, M.,

- Camarena-Gómez, M. T., Piiparinen, J., Spilling, K., & Yang, B. (2021). European Union legislation on macroalgae products. *Aquaculture International*, 29(2), 487-509.
- [59] Wells, M. L., Potin, P., Craigie, J. S., Raven, J. A., Merchant, S. S., Helliwell, K. E., ... & Brawley, S. H. (2017). Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *Journal of applied phycology*, 29(2), 949-982.
- [60] Potoroko, I. Y., Uskova, D. G., Pajmulina, A. V., & Uday, B. (2019). Ultrasound micronization of fucoidan vegetable ingredient for the use in food production technology. *Bull. South Ural. Univ. Ser. Food Biotechnol*, 7, 58-70.
- [61] Gullón, P., Astray, G., Gullón, B., Franco, D., Campagnol, P. C. B., & Lorenzo, J. M. (2021). Inclusion of seaweeds as healthy approach to formulate new low-salt meat products. *Current Opinion in Food Science*, 40, 20-25.
- [62] Lamont, T., & McSweeney, M. (2021). Consumer acceptability and chemical composition of whole-wheat breads incorporated with brown seaweed (*Ascophyllum nodosum*) or red seaweed (*Chondrus crispus*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(4), 1507-1514.
- [63] Poveda-Castillo, G. D. C., Rodrigo, D., Martínez, A., & Pina-Pérez, M. C. (2018). Bioactivity of fucoidan as an antimicrobial agent in a new functional beverage. *Beverages*, 4(3), 64.
- [64] Koh, H. S. A., Lim, S. E. V., Lu, J., & Zhou, W. (2020). Bioactivity enhancement of fucoidan through complexing with bread matrix and baking. *LWT*, 130, 109646.
- [65] Simonazzi, A., Cid, A. G., Villegas, M., Romero, A. I., Palma, S. D., & Bermúdez, J. M. (2018). Nanotechnology applications in drug controlled release. *Drug Targeting and Stimuli Sensitive Drug Delivery Systems*, 81-116.
- [66] Mwangi, W. W., Lim, H. P., Low, L. E., Tey, B. T., & Chan, E. S. (2020). Food-grade Pickering emulsions for encapsulation and delivery of bioactives. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 320-332.
- [67] Oliyai, N., Moosavi-Nasab, M., & Tanideh, N. (2022). Preparation of Fucoxanthin Nanoemulsion Stabilized by Natural Emulsifiers: Fucoidan, Sodium Caseinate, and Gum Arabic. *Molecules*, 27(19), 6713.
- [68] Jayakody, M. M., Kaushani, K. G., & Vanniarachchy, M. P. G. (2022). Edible Seaweed-Based Biodegradable Films and Coatings for Food and Nutraceutical Applications. *Algal Functional Foods and Nutraceuticals: Benefits, Opportunities, and Challenges*, 429-446.
- [69] Lan, Y., Liu, Y., Li, X., & Wu, S. (2024). Fucoidan-based coatings extend the shelf-life of nectarines. *Food Chemistry: X*, 22, 101479.
- [70] Wang, F., Xie, C., Tang, H., Li, H., Hou, J., Zhang, R., ... & Jiang, L. (2023). Intelligent packaging based on chitosan/fucoidan incorporated with coleus grass (*Plectranthus scutellarioides*) leaves anthocyanins and its application in monitoring the spoilage of salmon (*Salmo salar* L.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 252, 126423.
- [71] Malekkolaei, K. J., Jafarian, S., Javadian, S. R., Mahdavi, S. K., & Bahram, S. (2025). Edible coatings of chitosan and fucoidan with crucian carp protein hydrolysate to extend shelf life of beluga sturgeon fillets. *Heliyon*, 11(4), 42296.
- [72] Xu, B., & Wu, S. (2021). Preservation of mango fruit quality using fucoidan coatings. *Lwt*, 143, 111150.
- [73] Luo, A., Feng, J., Hu, B., Lv, J., Liu, Q., Nan, F., ... & Xie, S. (2018). *Arthrospira* (*Spirulina*) platensis extract improves oxidative stability and product quality of Chinese-style pork sausage. *Journal of Applied Phycology*, 30(3), 1667-1677.
- [74] Luo, P., Li, F., Liu, H., Yang, X., & Duan, Z. (2020). Effect of fucoidan-based edible coating on antioxidant degradation kinetics in strawberry fruit during cold storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(4), 14381.
- [75] Irianto, I., Naryaningsih, A., Trisnawati, N. W., Astuti, A., Komariyah, K., Qomariyah, L., ... & Putra, N. R. (2024). From sea to solution: A review of green extraction approaches for unlocking the potential of brown algae. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48(1), 1-21.
- [76] Mensah, E. O., Kanwugu, O. N., Panda, P. K., & Adadi, P. (2023). Marine fucoidans: Structural, extraction, biological activities and their applications in the food industry. *Food Hydrocolloids*, 142, 1-25.
- [77] Nguyen, T. T., Mikkelsen, M. D., Tran, V. H. N., Trang, V. T. D., Rhein-Knudsen, N.,

- Holck, J., ... & Meyer, A. S. (2020). Enzyme-assisted fucoidan extraction from brown macroalgae *Fucus distichus* subsp. *evanescens* and *Saccharina latissima*. *Marine Drugs*, 18(6), 296.
- [78] James, K., Long, H., O'Hara, I., Williams, B., & Moghaddam, L. (2024). Bio-based film development: Harnessing alginate and fucoidan extracted from *Ascophyllum nodosum* with glycerol and choline chloride-based solvent. *Food Hydrocolloids*, 153, 110013.
- [79] Rhein-Knudsen, N., Reyes-Weiss, D., & Horn, S. J. (2023). Extraction of high purity fucoidans from brown seaweeds using cellulases and alginate lyases. *International Journal of Biological Macromolecules*, 229, 199-209.
- [80] Alboofetileh, M., Rezaei, M., Tabarsa, M., Rittà, M., Donalisio, M., Mariatti, F., ... & Cravotto, G. (2019). Effect of different non-conventional extraction methods on the antibacterial and antiviral activity of fucoidans extracted from *Nizamuddiniazanardinii*. *International journal of biological macromolecules*, 124, 131-137.
- [81] Dobrincic, A., Pedisic, S., Zoric, Z., Jurin, M., Roje, M., Coz-Rakovac, R., & Dragovic-Uzelac, V. (2021). Microwave assisted extraction and pressurized liquid extraction of sulfated polysaccharides from *Fucus virsoides* and *Cystoseira barbata*. *Foods*, 10, 1481.
- [82] Kadam, S. U., Tiwari, B. K., Smyth, T. J., & O'Donnell, C. P. (2015). Optimization of ultrasound assisted extraction of bioactive components from brown seaweed *Ascophyllum nodosum* using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 308-316.
- [83] Lin, P., Chen, S., Liao, M., & Wang, W. (2022). Physicochemical characterization of fucoidans from *Sargassum henslowianum* C. Agardh and their antithrombotic activity in vitro. *Marine Drugs*, 20(5), 300.
- [84] López-Salazar, H., Camacho-Díaz, B. H., Ocampo, M. A., & Jiménez-Aparicio, A. R. (2023). Microwave-assisted extraction of functional compounds from plants: A Review. *BioResources*, 18(3), 6614.
- [85] Cannavacciuolo, C., Pagliari, S., Celano, R., Campone, L., & Rastrelli, L. (2024). Critical analysis of green extraction techniques used for botanicals: Trends, priorities, and optimization strategies-A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 173, 117627.
- [86] Geow, C. H., Tan, M. C., Yeap, S. P., & Chin, N. L. (2021). A review on extraction techniques and its future applications in industry. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 123(4), 2000302.
- [87] Ummat, V., Sivagnanam, S. P., Rai, D. K., O'Donnell, C., Conway, G. E., Heffernan, S. M., ... & Tiwari, B. K. (2024). Conventional extraction of fucoidan from Irish brown seaweed *Fucus vesiculosus* followed by ultrasound-assisted depolymerization. *Scientific Reports*, 14(1), 1-13.



Scientific Research

Extraction of fucoidan from brown algae and its application in the food industry

Parisa Lotfi^{1*}, Sajad Pirsā²

1- PhD Student in Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Urmia University

2- Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Urmia University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History: Received: 2026/01/01 Review: 2026/06/08 Accepted: 2026/06/13	Fucoidan is a sulfated polysaccharide from brown seaweed consisting of several monosaccharides found in the cell wall of brown seaweed and composed of resistant cellulose and hemicellulose. This bioactive compound has several bioactive properties such as antioxidant, antimicrobial, antiviral, hypolipidemic, anticancer and tumorigenic, anti-inflammatory and immunomodulatory. Due to their natural nature and virtually non-toxic nature, they are considered as a promising antimicrobial component for various applications in medicine and food industry. The properties of fucoidan depend on several factors, including molecular weight and extraction method. The molecular weight of fucoidan, related to its biological activities and bioavailability, can be influenced by extraction technologies. A wide range of extraction methods are currently used to obtain these polysaccharides, such as supercritical fluid extraction (SFE), pressurized liquid extraction (PLE), subcritical water extraction (SCWE), ultrasound-assisted extraction (UAE), enzyme-assisted extraction (EAE), and microwave-assisted extraction (MAE). Given that an increasing number of studies have shown the extraction process of fucoidan in the past few years, and the use of fucoidan synthesis is an effective strategy in the development of bioactive films in food coatings, which will reduce the reliance on plastic materials and increase the shelf life of food products. This review presents the conventional extraction and purification processes, physicochemical and biological activities, and structural characterization, and recent advances in the application of fucoidan in the food industry.
Keywords: Fucoidan, extraction, brown macroalgae, bioactive compounds, food industry	
DOI: 10.48311/fsct.2026.118663.83019	
*Corresponding Author E-	