



بازیافت پروتئین‌ها از فرآورده‌های دریایی: کاربردهای صنعتی، چالش‌ها و فرصت‌ها

مهسا سادات قاضی^{۱*}، آزاده رشیدی مهر^۲، همایون رجیبی پور^۳

۱. دانشجوی دکترای عمومی دامپزشکی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲. استادیار گروه میکروبیولوژی و بهداشت مواد غذایی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۳. دانشجوی دکترای عمومی دامپزشکی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

*مسئول مکاتبات: Mahsaghazii1999@gmail.com

چکیده

افزایش بی‌سابقه جمعیت جهان، همراه با افزایش تقاضا برای مصرف پروتئین حیوانی، صنعت غذا را تحت فشار فزاینده‌ای قرار داده است. با این وجود این، ضایعات ناشی از فرآوری غذاهای دریایی، که اغلب نادیده گرفته می‌شوند، منبع قابل توجهی از پروتئین هستند که می‌توانند به شیوه‌ای پایدار مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، هدف این مقاله بررسی رویکردهای استخراج پروتئین از محصولات جانبی غذاهای دریایی، ارزیابی کاربردهای صنعتی آن‌ها و بررسی چالش‌ها و چشم‌اندازهای مرتبط با این فناوری‌ها است. این بررسی، دیدگاه جامعی در مورد اهمیت بازیافت پروتئین از فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی در پرداختن به تقاضای جهانی پروتئین، کاهش ضایعات مواد غذایی و ارتقای شیوه‌های پایدار ارائه می‌دهد. علاوه بر این، این مقاله بر کاربردهای بالقوه این پروتئین‌ها در صنایع غذایی، خوراک دام، پزشکی و آرایشی و بهداشتی تأکید می‌کند و موانع فنی و اقتصادی موجود برای تجاری‌سازی موفقیت‌آمیز را روشن می‌سازد. با مقیاس‌بندی عملیات صنعتی و ادغام نوآوری‌های فناورانه، این پروتئین‌ها می‌توانند به عنوان یک منبع ارزشمند برای پاسخگویی به نیازهای رو به رشد پروتئین و کمک به اقتصاد چرخشی عمل کنند. در نهایت، همکاری بین محققان، صنعتگران و نهادهای نظارتی جهت استفاده کامل از پتانسیل این منابع پروتئینی الزامی به نظر می‌رسد.

واژگان کلیدی: غذاهای دریایی، استخراج پروتئین، کاهش ضایعات مواد غذایی، بازیافت پروتئین از فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی.

مقدمه

با پیش‌بینی رشد جمعیت به ۹/۷ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰، امنیت غذایی و تغذیه‌ای جهانی به طور فزاینده‌ای چالش برانگیز خواهد بود (FAO, ۲۰۲۲). این مسئله پیچیده نیازمند یک رویکرد چندوجهی است که شامل افزایش تولید مواد غذایی، بهبود کیفیت ارزش غذایی و کاهش ضایعات، ضمن مدیریت همزمان منابع ضروری مانند زمین و آب و سازگاری با تغییرات آب و هوایی (Loboguerrero et al., 2019) می‌شود. داده‌ها نشان می‌دهد که ماهی و غذاهای دریایی ۱۷ درصد از کل پروتئین حیوانی مصرفی و ۷ درصد از کل پروتئین مصرفی را تشکیل می‌دهند. مصرف غذاهای دریایی در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ روندی افزایشی داشته است که ادامه روند رو به رشد سال‌های قبل است (FAO, 2022). با این حال، صنعت غذاهای دریایی با یک چالش مهم در زمینه ضایعات غذا در سطح جهانی و آبرزی پروری مواجه است. سالانه تقریباً ۳۵ درصد از تولید جهانی یا هدر می‌رود یا ضایع می‌شود. این مسئله در سراسر مناطق مختلف، با تخمین ۳۰ تا ۳۵ درصد از کل تولید، فراگیر است. قابل توجه است که آمریکای شمالی و اقیانوسیه بالاترین نرخ‌های ضایعات را نشان می‌دهند که تقریباً به ۵۰ درصد می‌رسد و بیشتر این ضایعات در مرحله مصرف آبریان اتفاق می‌افتد که ۳۰ تا ۷۰ درصد از کل وزن ماهی را تشکیل می‌دهد (Wu et al., 2022). به طور معمول، سرها (۱۲-۱۸ درصد از وزن کل ماهی)، احشا (۹-۱۵ درصد)، استخوان‌ها (۵ درصد) را شامل می‌شوند (FAO, 2022). با وجود اینکه این محصولات جانبی منبع مهمی از پروتئین، لیپیدها و مولکول‌های زیستی هستند، اغلب مورد استفاده قرار نمی‌گیرند (Ganjeh et al., 2023). در مورد سخت‌پوستان، تخمین زده می‌شود که حدود ۷۵ درصد از وزن کل دور ریخته می‌شود که شامل سر، دم



و اسکلت بیرونی آن‌ها می‌شود (Mutalipassi *et al.*, 2021). این محصولات جانبی، با ارزش غذایی بالا، به طور کافی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و منجر به خسارات اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی می‌شوند (Mutalipassi *et al.*, 2021). با افزایش مداوم علاقه به توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی یا دورانی، توجه فزاینده‌ای به پتانسیل فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی وجود دارد. فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی گزارش شده‌اند که حاوی حدود ۶۰ درصد پروتئین (Sasidharan and Venugopal, 2020) از جمله پروفایل‌های اسید آمینه ضروری هستند که ارزش غذایی معادل یا حتی بالاتر از منابعی مانند گوشت و تخم مرغ (Sasidharan and Venugopal, 2020; Liu *et al.*, 2021) را ارائه می‌دهند. این موقعیت، محصولات جانبی را به عنوان منابع پروتئینی با کیفیت بالا برای مصرف انسان تبدیل می‌کند. با این حال، بازیابی پروتئین از منابع غذاهای دریایی به دلیل حساسیت آن‌ها به فساد سریع، یک چالش باقی می‌ماند که منجر به غلظت بالای اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه اکسید شده و محصولات اکسیداسیون ثانویه (Ganjeh *et al.*, 2021; Altintzoglou *et al.*, 2021) می‌شود.

پیشرفت‌های اخیر در زمینه فناوری به طور قابل توجهی پتانسیل استفاده تجاری از این پروتئین‌ها را افزایش داده است و با تلاش‌های جهانی برای کاهش ضایعات غذا، افزایش تولید مواد غذایی و به حداقل رساندن ردپای زیست‌محیطی غذا همسو شده است (FAO, 2022). مطالعه حاضر بر پروتئین‌های ماهیچه، هیدرولیزات‌های پروتئینی، پپتیدهای فعال زیستی، کلاژن و ژلاتین به دست آمده از محصولات جانبی غذاهای دریایی متمرکز است.

بازیافت پروتئین از فرآورده‌های جانبی آبرزیان

بازیافت کارآمد پروتئین، اساساً متأثر از ویژگی‌های ذاتی آن‌هاست. تکنیک‌های گوناگونی برای بازیابی پروتئین از فرآورده‌های جانبی آبرزیان به کار گرفته می‌شوند که این تکنیک، بسته به ویژگی‌های پروتئین مانند حالیت (فلوکولاسیون)، اندازه ذرات (مانند اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون) و دانسیته (مانند سانتریفیوژ) متغیر هستند.

تکنیک‌های بر پایه حالیت پروتئین

فلوکولاسیون (flocculation) پروتئین در آب حاصل از فرآوری آبرزیان

پروتئین‌های موجود در آب فرآوری میگو و ماهی را می‌توان با استفاده از روش فلوکولاسیون بر اساس بار و حالیت آن‌ها بازیابی کرد. فلوکولانت‌ها شامل پلی‌ساکاریدهای باردار مانند آلژینات، کاراگینان و کربوکسی‌متیل سلولز هستند (Forghani *et al.*, 2020). انتخاب فلوکولانت‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در تعامل با پروتئین‌ها صورت می‌گیرد. هنگامی که فلوکولانت‌ها به سیستم افزوده می‌شوند، تجمع پروتئین‌ها را تسریع کرده و منجر به تشکیل ذرات بزرگ‌تر و قابل جداسازی می‌شوند (Forghani *et al.*, 2020). مراحل بعدی سانتریفیوژ، فرآیند بازیابی پروتئین را بیشتر تقویت می‌کند. برای مثال، کاراگینان به عنوان یک فلوکولانت برای بازیابی پروتئین از آب شستشوی ماهی قزل‌آلا به کار رفته است.

روش انحلال/رسوب‌دهی ایزوالکتریک (ISP)

اصل: روش ISP، که به عنوان فرآیند تغییر pH نیز شناخته می‌شود، یک تکنیک مفید برای بازیابی پروتئین‌های ماهیچه از فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی است (Surasani, 2018). این فرآیند بر اساس حالیت متفاوت پروتئین‌های ماهیچه در سطوح pH بسیار اسیدی یا قلیایی استوار است. پروتئین‌های ماهیچه از محصولات جانبی غذاهای دریایی با استفاده از pH بسیار پایین اسیدی (≥ 3) یا pH بسیار بالای قلیایی ($\leq 10/5$) حل می‌شوند. ناخالصی‌هایی مانند پوست، استخوان، غضروف و چربی با استفاده از سانتریفیوژ از پروتئین‌های حل شده جدا می‌شوند. سپس pH مایع رویی (که حاوی پروتئین‌های حل شده است) تا نقطه ایزوالکتریک (pI) پروتئین تنظیم می‌شود. در متن اشاره شده است که pI برای پروتئین‌های ماهیچه حدود 5/5 است (Zhang *et al.*, 2024). در نقطه ایزوالکتریک، بار خالص پروتئین صفر می‌شود که منجر



به کاهش حلالیت و در نتیجه رسوب پروتئین می‌شود، پروتئین رسوب کرده سپس جمع‌آوری می‌شود. برخلاف روش‌های جداسازی مکانیکی سنتی که به تفاوت‌های فیزیکی متکی هستند، روش ISP را می‌توان برای منابع پیچیده‌تر پروتئین‌های ماهیچه که شامل سر و اندام‌های داخلی می‌شوند، به کار برد.

-استخراج با حلال آلی

بازیابی پروتئین با استفاده از استخراج با حلال آلی به خواص مختلف پروتئین مانند آبگریزی، حلالیت و وزن مولکولی بستگی دارد (Kamal et al., 2021). این روش امکان انحلال و بازیابی انتخابی پروتئین‌ها از ماتریس‌های بیولوژیکی پیچیده، مانند محصولات جانبی غذاهای دریایی را فراهم می‌کند. استخراج با حلال آلی برای اهداف خاص، به ویژه برای پروتئین‌هایی که در آب کم محلول هستند، استفاده می‌شود. این روش استخراج امکان جداسازی پروتئین‌های هدف یا گروه‌های پروتئینی از مخلوط‌های پیچیده را بر اساس حلالیت منحصر به فرد و خواص آبگریزی آن‌ها در حلال‌های آلی مختلف امکان‌پذیر می‌کند (Kumoro et al., 2021). علاوه بر این، حلال‌های آلی امکان جداسازی بر اساس وزن مولکولی، اصلاح خواص عملکردی، حذف آلاینده‌ها و یافتن کاربردهای خاص مانند بازیابی پروتئین‌ها از فرآورده‌های جانبی خاص فرآوری مواد غذایی را فراهم می‌کنند. انتخاب روش به ویژگی‌های پروتئین، اهداف استخراج و ملاحظات ایمنی و تأثیرات زیست‌محیطی بستگی دارد.

اولترافیلتراسیون مبتنی بر پروتئین

اولترافیلتراسیون فرایندی غشایی است که برای تغلیظ یا خالص‌سازی مولکول‌های بزرگ (معمولاً با وزن مولکولی از 1 تا 500 کیلودالتون) از محلول‌های آبی استفاده می‌شود. اصل اولترافیلتراسیون شامل عبور دادن محلول از یک غشای نیمه‌تراوا با اندازه منافذ مشخص است. آب و مولکول‌های کوچک‌تر از اندازه منافذ از غشا عبور می‌کنند (تراوش می‌کنند)، در حالی که مولکول‌های بزرگ‌تر حفظ می‌شوند. نرخ تراوش به فشار اعمال شده در سراسر غشا و همچنین اندازه و توزیع اندازه منافذ بستگی دارد. از نظر تاریخی، اولترافیلتراسیون برای بازیابی پروتئین از آب پنیر که محصول جانبی تولید پنیر است، استفاده می‌شد. با این حال، اولترافیلتراسیون به یک فناوری ارزشمند برای بازیابی پروتئین از غذاهای دریایی و سایر منابع تبدیل شده است. پروتئین‌های بازیابی‌شده با اولترافیلتراسیون دارای ارزش غذایی بالا هستند و معمولاً حاوی تمام اسیدهای آمینه ضروری هستند (Amini et al., 2021).

تکنیک‌های افزایش انتقال جرم جهت بهبود استخراج

هیدرولیز آنزیمی

هیدرولیز آنزیمی یک فرایند تثبیت‌شده برای بازیابی پروتئین است که شامل شکستن پیوندهای پپتیدی در پروتئین‌ها با استفاده از آنزیم‌ها است. آنزیم‌های مورد استفاده در این فرایند معمولاً پروتئازها هستند، دسته‌ای از آنزیم‌ها که پیوندهای پپتیدی را کاتالیز می‌کنند. پروتئازها می‌توانند از منابع مختلفی از جمله گیاهان (پاپائین، بروملین)، حیوانات (تریپسین، کیموتریپسین) و میکروارگانیسم‌ها (پروتئازهای باکتریایی و قارچی) به دست آیند. در این فرایند، پروتئین‌های پیچیده به پپتیدها و اسیدهای آمینه کوچک‌تر تجزیه می‌شوند. ویژگی‌های خاص پروتئاز مورد استفاده، مانند ویژگی سوبسترا و شرایط عملیاتی (pH، دما) بر درجه هیدرولیز و ترکیب پپتیدهای حاصل تأثیر می‌گذارد. هیدرولیز کنترل‌شده پروتئین می‌تواند خواص عملکردی و تغذیه‌ای پروتئین را بهبود بخشد. به عنوان مثال، هیدرولیز می‌تواند حلالیت، ویسکوزیته، امولسیون‌کنندگی و پایداری فوم پروتئین‌ها را افزایش دهد. علاوه بر این، پپتیدهای حاصل ممکن است فعالیت‌های بیولوژیکی مختلفی از خود نشان دهند، مانند خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و ضد فشار خون (Martínez-Maqueda et al., 2021). هیدرولیز آنزیمی به طور گسترده در صنعت مواد غذایی برای تولید پروتئین‌های هیدرولیز‌شده از منابع مختلف مانند پروتئین‌های شیر، پروتئین‌های سویا و پروتئین‌های ماهی استفاده می‌شود. پروتئین‌های هیدرولیز‌شده ماهی کاربردهای بالقوه‌ای در فرمولاسیون مواد غذایی، به‌ویژه در محصولات



غذایی نوزادان و خوراک دام نشان داده‌اند. با این حال، درجه هیدرولیز و رفتارهای رئولوژیکی هیدرولیزات‌های پروتئین به شدت تحت تأثیر شرایط SDS-PAGE قرار دارند (Ahmmed et al., 2022).

2-5 استخراج پروتئین به کمک التراسوند

استخراج پروتئین به کمک التراسوند (UAE) یک روش استخراج نسبتاً جدید است که از امواج التراسوند با فرکانس بالا (20 کیلوهرتز تا 100 مگاهرتز) برای افزایش بازده و کارایی استخراج پروتئین از منابع مختلف استفاده می‌کند. این تکنیک شامل اعمال امواج التراسوند با شدت بالا به یک مخلوط حلال-ماده جامد است. امواج فراصوت باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌شوند، که شامل تشکیل، رشد و فروپاشی حباب‌های کوچک در مایع است. فروپاشی این حباب‌ها به طور موضعی شرایط شدید مانند دماهای بالا، فشارهای بالا و نیروهای برشی ایجاد می‌کند. این شرایط می‌تواند ساختار سلولی را مختل کنند، نفوذ حلال را افزایش دهند و انتقال جرم پروتئین‌ها را به حلال استخراج تسهیل کنند (Chou et al., 2021). مزایای التراسوند شامل زمان استخراج کوتاه‌تر، مصرف حلال کمتر، راندمان استخراج بالاتر و بهبود کیفیت پروتئین استخراج‌شده است. کارایی UAE به پارامترهای مختلفی مانند فرکانس فراصوت، شدت، زمان استخراج، دما و نوع حلال بستگی دارد (Phung et al., 2021). UAE با موفقیت برای استخراج پروتئین از منابع مختلف دریایی مانند ماهی، فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی و جلبک‌ها استفاده شده است. علاوه بر این، UAE نشان داده است که در حفظ خواص عملکردی و تغذیه‌ای پروتئین‌های استخراج‌شده در مقایسه با روش‌های استخراج سنتی مؤثر است.

استخراج پروتئین با پالس میدان الکتریکی

استخراج پروتئین با پالس میدان الکتریکی (PEF) یک فناوری غیرحرارتی است که پتانسیل بالایی در استخراج پروتئین از منابع مختلف از جمله ماهی و محصولات جانبی غذاهای دریایی نشان داده است. PEF شامل اعمال پالس‌های کوتاه میدان الکتریکی با شدت بالا (از 1 تا 80 کیلوولت بر سانتی‌متر) به ماده غذایی بین دو الکترود برای مدت زمان کوتاهی (از میکروثانیه تا میلی‌ثانیه) است. این ولتاژ بالا باعث اختلال در غشای سلولی می‌شود و در نتیجه نفوذپذیری غشا افزایش می‌یابد و منجر به انتشار ترکیبات داخل سلولی از جمله پروتئین‌ها می‌شود. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که تیمار PEF می‌تواند بازده استخراج پروتئین از محصولات جانبی ماهی را به طور قابل توجهی در مقایسه با نمونه‌های تیمارنشده بهبود بخشد. به عنوان مثال، یک مطالعه افزایش قابل توجهی (1/7٪) در بازده استخراج پروتئین از سر ماهی سالمون تیمارشده با PEF در مقایسه با نمونه‌های تیمارنشده نشان داد. پروتئین‌های استخراج‌شده از طریق PEF خواص عملکردی و کف‌کنندگی بهتری را در مقایسه با پروتئین‌های استخراج‌شده به روش‌های سنتی نشان داده‌اند.

استخراج به کمک امواج مایکروویو (MAE)

استخراج به کمک امواج مایکروویو (MAE) یک روش استخراج سریع، کارآمد و نوآورانه است که از انرژی مایکروویو برای افزایش استخراج ترکیبات از منابع مختلف استفاده می‌کند. این روش شامل قرار دادن مخلوط ماده جامد-حلال در معرض تابش الکترومغناطیسی با فرکانس 300 مگاهرتز تا 300 گیگاهرتز است. انرژی مایکروویو توسط مولکول‌های قطبی موجود در حلال و ماده نمونه جذب می‌شود. این جذب انرژی منجر به گرمایش سریع و یکنواخت می‌شود که باعث اختلال در ساختار سلولی می‌شود و انتقال جرم ترکیبات هدف از ماتریس جامد به حلال را افزایش می‌دهد (Ganjeh et al., 2019). در مقایسه با روش‌های استخراج سنتی، MAE مزایای متعددی از جمله زمان استخراج کوتاه‌تر، مصرف حلال کمتر، بازده استخراج بالاتر و بهبود کیفیت عصاره را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، MAE می‌تواند اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد و از نظر مصرف انرژی مقرون به صرفه باشد. MAE با موفقیت برای استخراج پروتئین از منابع مختلف از جمله محصولات جانبی غذاهای دریایی استفاده شده است. این فرایند با اختلال در ماتریس سلولی و تسهیل انتقال جرم، استخراج پروتئین را تسریع می‌کند. گرمایش انتخابی ناشی از انرژی مایکروویو، تبخیر حلال و افزایش فشار داخلی را افزایش می‌دهد، که به شکستن ساختار سلولی و آزادسازی پروتئین‌ها کمک می‌کند.



کاربردهای صنعتی پروتئین‌های مشتق‌شده از فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی

پروتئین‌های هیدرولیز‌شده ماهی به دلیل خواص عملکردی‌شان، از جمله ظرفیت کف‌کنندگی و پایداری امولسیون، و همچنین ارزش غذایی‌شان، به عنوان جایگزینی امیدوارکننده برای پودرها و امولسیون‌های تخم‌مرغ ظاهر شده‌اند. علاوه بر این، هیدرولیزات‌های پروتئین ماهی در کاهش تجمع چربی در کبد موش‌های تغذیه‌شده با رژیم غذایی پرچرب مؤثر نشان داده‌اند. بنابراین، استفاده از هیدرولیزات‌های پروتئین ماهی در فرمولاسیون مواد غذایی پتانسیل بهبود بافت و کاهش محتوای چربی محصولات غذایی را دارد.

پروتئین‌های هیدرولیز‌شده، مشتق‌شده از ماهی، پوست، استخوان‌ها و تاندون‌ها، به دلیل ارزش غذایی‌شان مورد توجه قرار می‌گیرند. این پروتئین‌ها معمولاً از طریق هیدرولیز آنزیمی پروتئین‌های ماهی تولید می‌شوند. در طول هیدرولیز، پروتئین‌های بزرگ به پپتیدها و اسیدهای آمینه کوچک‌تر تجزیه می‌شوند که می‌توانند به راحتی توسط بدن انسان جذب شوند. روش‌های مختلفی برای تولید هیدرولیزات‌های پروتئین ماهی استفاده شده است، از جمله هیدرولیز اسیدی یا قلیایی، تیمار با فشار بالا، تیمار با امواج فراصوت و هیدرولیز آنزیمی (Kim et al., 2020). هیدرولیز آنزیمی به دلیل شرایط واکنش ملایم، کنترل‌پذیری و حفظ ارزش غذایی پروتئین‌های هیدرولیز‌شده، روش ترجیحی است. هیدرولیزات‌های پروتئین ماهی کاربردهای بالقوه‌ای در صنایع غذایی و دارویی دارند. در صنعت غذا، از آن‌ها برای بهبود بافت، طعم و ارزش غذایی محصولات غذایی استفاده می‌شود. هیدرولیزات‌های پروتئین ماهی همچنین به دلیل خواص عملکردی‌شان، مانند ظرفیت نگهداری آب و روغن، ظرفیت کف‌کنندگی و پایداری امولسیون، ارزشمند هستند. علاوه بر این، پپتیدهای مشتق‌شده از پروتئین ماهی فعالیت‌های بیولوژیکی مختلفی از خود نشان داده‌اند، مانند خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و ضد فشار خون. بنابراین، هیدرولیزات‌های پروتئین ماهی به عنوان مواد تشکیل‌دهنده ارزشمند در توسعه غذاهای کاربردی و مواد مغذی ظاهر شده‌اند.

کلاژن، پروتئین ساختاری اصلی در پوست، استخوان‌ها و بافت‌های همبند بسیاری از حیوانات از جمله ماهی است. کلاژن دریایی، به دست آمده از گونه‌های مختلف ماهی، مقادیر زیادی اسیدهای آمینه ضروری و غیرضروری دارد، که آن را به یک ماده مغذی ارزشمند تبدیل می‌کند (Sinthusamran et al., 2014). علاوه بر این، کلاژن دریایی به دلیل ساختار مولکولی‌اش، که شامل گروه‌های باردار و بخش‌های آب‌گریز است، خواص عملکردی متعددی از خود نشان می‌دهد. این خواص شامل توانایی تشکیل فیلم، پایداری فوم و فعالیت سطحی است. ژلاتین، یک پروتئین مشتق‌شده از کلاژن از طریق هیدرولیز جزئی، نیز کاربردهای گسترده‌ای در صنایع غذایی و دارویی دارد. ژلاتین دریایی به دلیل حالیت بهتر، دمای ژل شدن پایین‌تر و خواص ایمنی برتر در مقایسه با ژلاتین مشتق‌شده از پستانداران مورد توجه قرار گرفته است. پروتئین‌های هیدرولیز‌شده و پپتیدهای فعال زیستی دریایی به دلیل ارزش غذایی و فواید سلامتی‌شان به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار می‌گیرند. پروتئین‌های دریایی منبع غنی از اسیدهای آمینه ضروری هستند که برای سلامت و تندرستی انسان بسیار مهم هستند. علاوه بر این، هیدرولیزات‌های پروتئین دریایی طیف وسیعی از فعالیت‌های بیولوژیکی را از خود نشان می‌دهند، از جمله خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد فشار خون، ضد میکروبی و ضد سرطان (Kim et al., 2020). پپتیدهای فعال زیستی، که قطعات خاصی از پروتئین‌ها هستند، در سال‌های اخیر به دلیل پتانسیل‌شان در ارتقای سلامت انسان و پیشگیری از بیماری‌ها مورد مطالعه گسترده قرار گرفته‌اند. پپتیدهای مشتق‌شده از منابع دریایی، مانند ماهی، جلبک‌ها و بی‌مهرگان دریایی، خواص تغذیه‌ای و درمانی متعددی از خود نشان داده‌اند. به عنوان مثال، برخی از پپتیدهای دریایی دارای فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی قوی هستند، که می‌تواند به محافظت از سلول‌ها در برابر آسیب ناشی از رادیکال‌های آزاد کمک کند. علاوه بر این، برخی از پپتیدهای دریایی نشان داده‌اند که عملکرد ایمنی را بهبود می‌بخشند و پاسخ‌های التهابی را تعدیل می‌کنند. خواص عملکردی متنوع پپتیدهای دریایی، از جمله فعالیت‌های ضد فشار خون، ضد ترومبوتیک، ضد دیابت، ضد هایپرلیپیدمیک، بهبود عملکرد ایمنی و ضد سرطان، پتانسیل آن‌ها را به عنوان مواد تشکیل‌دهنده کاربردی در صنایع غذایی و دارویی برجسته می‌کند. به طور خاص، پپتیدهای مشتق‌شده از ماهی و محصولات جانبی آن به دلیل خواص ضد فشار خون و آنتی‌اکسیدانی‌شان به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در آسیا، کشورهایی مانند چین و کره در توسعه محصولات غذایی کاربردی مبتنی بر پپتیدهای دریایی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند.



چالش‌ها

بررسی کاربردهای صنعتی پروتئین‌های حاصل از محصولات جانبی غذاهای دریایی، چالش‌ها و فرصت‌های نوآورانه متعددی را به همراه دارد. این بخش به چالش‌های واقعی در کاربردهای صنعتی پروتئین‌های بازیابی‌شده از محصولات جانبی غذاهای دریایی می‌پردازد. کیفیت، ترکیب و وضعیت مواد اولیه محصولات جانبی غذاهای دریایی می‌تواند بر اساس گونه، سن، وضعیت تغذیه‌ای، جنسیت، فصل، روش فرآوری و شرایط نگهداری متفاوت باشد (Wu et al., 2022). این تغییرپذیری بر بازده و کیفیت پروتئین بازیابی‌شده تأثیر می‌گذارد. برای غلبه بر این موضوع، توسعه تکنیک‌های فرآوری قوی و سازگار مهم است. فناوری‌های نوآورانه، مانند فرآوری با فشار بالا و PEF، برای افزایش استخراج و حفظ پروتئین مورد بررسی قرار می‌گیرند. در سطح صنعتی، اجرای اقدامات کنترل کیفیت دقیق و سیستم‌های نظارت آنی می‌تواند پارامترهای فرآوری را استاندارد کرده و تغییرپذیری مواد اولیه را جبران کند. استفاده از یک رویکرد یکپارچه که ترکیبی از فناوری‌های پیشرفته و کنترل‌های کیفیت دقیق برای بهینه‌سازی استفاده از محصولات جانبی غذاهای دریایی، تضمین پایداری و اقتصادی در صنعت فرآوری غذاهای دریایی، مهم است. یکی از چالش‌های استفاده از پروتئین‌های ایزوله و هیدرولیز شده غذاهای دریایی در کاربردهای غذایی، بوی ماهی آنها است. می‌توان از استراتژی‌های مختلفی برای کاهش این طعم‌ها استفاده کرد. به عنوان مثال، هنگام استفاده از EAE، بهینه‌سازی هیدرولیز آنزیمی با تنظیم انواع آنزیم، زمان هیدرولیز و دما نیز می‌تواند در کنترل طعم، مفید باشد. برای موفقیت در انتقال فناوری، باید چالش‌های فنی، اقتصادی، بازاریابی و ایمنی به‌طور همزمان مدیریت شوند تا محصولی پایدار، ایمن و موردپذیرش بازار تولید شود.

فرصت‌ها

علیرغم چالش‌ها، اکتشاف فرآوری محصولات جانبی غذاهای دریایی درهای جدیدی را به سوی کاربردهای متنوع در صنایع مختلف از جمله غذا، پزشکی زیستی، تغذیه حیوانات و لوازم آرایشی گشوده است. با الهام از اصول اقتصاد چرخشی، روش‌های نوآورانه برای فرآوری این محصولات جانبی در حال توسعه هستند که هدف آن‌ها استخراج پروتئین‌های با ارزش و به حداقل رساندن ضایعات است. این تلاش‌های جهانی به حفاظت از محیط زیست کمک کرده و پایداری را در بخش مواد غذایی ارتقا می‌بخشد. پروتئین‌های مشتق شده از محصولات جانبی غذاهای دریایی به دلیل تنوع عملکردی و فعالیت‌های بیولوژیکی قابل توجه خود، برای کاربردهای تجاری مختلف جذاب هستند. تحقیقات بر استخراج پروتئین‌های با کیفیت بالا با هدف دستیابی به طعم مطلوب در محصولات غذایی نهایی متمرکز است و با تقاضای رو به رشد مصرف‌کنندگان برای گزینه‌های غذایی پایدار و سالم همسو است. تحقیقات مداوم بر تکنیک‌های استخراج، خالص‌سازی و اصلاح برای کاربردهای صنعتی تأکید دارد. پیشرفت‌های تکنولوژیکی، مانند ترکیب روش‌های موجود با فناوری‌های سبز مانند میدان الکتریکی پالسی و التراسوند با تیمارهای آنزیمی یا روش‌های تغییر pH، پتانسیل زیادی برای بهبود عملکرد پروتئین و کیفیت پروتئین‌های بازیابی شده از محصولات جانبی غذاهای دریایی نشان داده‌اند. این پیشرفت‌ها منجر به تولید پروتئین‌های مشتق شده از محصولات جانبی غذاهای دریایی با خواص بهبود یافته‌ای مانند تشکیل ژل، امولسیون‌کنندگی و کف‌کنندگی، افزایش قابلیت هضم پروتئین و افزایش فعالیت‌های زیستی (مانند خواص آنتی‌اکسیدانی) شده است که آن‌ها را برای غذاهای با رویکرد سلامت‌محور جذاب می‌کند. علاوه بر پروتئین‌ها، مفهوم پالایشگاه‌های زیستی یکپارچه قابل توجه است که هدف آن استخراج متوالی چندین جزء با ارزش، از جمله پروتئین‌ها، روغن‌ها، مواد معدنی و کیتین، از محصولات جانبی غذاهای دریایی و به حداکثر رساندن ارزش آن‌ها است. علاوه بر این، تحقیق در مورد پروتئین‌های مشتق شده از محصولات جانبی مختلف غذاهای دریایی، از جمله گونه‌های کمتر مورد استفاده، در حال گسترش دامنه صنعت غذاهای دریایی است و منجر به کشف ایزوله‌هایی با خواص عملکردی و تغذیه‌ای منحصر به فرد و گسترش کاربرد آن‌ها در فناوری مواد غذایی می‌شود. به طور کلی، تحقیقات و نوآوری مداوم در هر دو مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت برای بهره‌برداری کامل از مواد اولیه پایدار در صنعت غذا اهمیت دارد. این امر برای پایداری محیط زیست، سلامت عمومی و سودآوری اقتصادی مهم است.



نتیجه گیری

در طول سال‌ها، تمرکز بر بازیافت فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی به طور فزاینده‌ای تشدید شده است، به ویژه با توجه به چالش‌های جهانی مانند صید بی‌رویه و پیامدهای زیست‌محیطی متعاقب آن. در ابتدا، بازیافت این فرآورده‌های جانبی عمدتاً بر کاربردهای غیرخوراکی مانند تولید کود، خوراک ماهی و غذای حیوانات خانگی متمرکز بود. با گذشت زمان و افزایش تقاضای جهانی برای منابع پروتئینی، افزایش چشمگیری در تلاش‌های تحقیقاتی با هدف استخراج پروتئین‌ها از فرآورده‌های جانبی غذاهای دریایی برای کاربردهای غذایی، زیست‌پزشکی و آرایشی و بهداشتی رخ داده است. اجزای مهم شامل پروتئین‌های ماهیچه، هیدرولیزات‌های پروتئینی، کلاژن، ژلاتین و پپتیدهای فعال زیستی هستند. در مورد روش‌های استخراج، در حالی که تکنیک‌های سنتی مانند هیدرولیز آنزیمی و تغییر pH همچنان مرتبط هستند، علاقه و تحقیق فزاینده‌ای در مورد فناوری‌های استخراج سازگار با محیط زیست وجود دارد. این فناوری‌ها شامل فیلتراسیون غشایی، فراصوت، تیمار مایکروویو و میدان‌های الکتریکی پالسی و غیره هستند. این روش‌های نوآورانه می‌توانند به طور مستقل یا در ترکیب با روش‌های مرسوم استفاده شوند. با این وجود، مهم است که تأکید شود که علی‌رغم تحقیقات آزمایشگاهی گسترده در مورد این روش‌های سبز، کمبود قابل توجهی در مطالعات مربوط به فرآیندهای بازیابی پروتئین در مقیاس پایلوت یا صنعتی وجود دارد. در صنعت شیلات، گرایشی به سمت مدیریت پایدارتر محصولات جانبی غذاهای دریایی وجود دارد. با این حال، این امر با کمبود دانش، فناوری و منابع مالی لازم مواجه است. گام بعدی ارزشمند، تلاش برای پر کردن شکاف بین نتایج آزمایشگاهی و کاربردهای دنیای واقعی است. ایجاد یک کانال ارتباطی قوی‌تر و فعال‌تر بین جامعه تحقیقاتی و صنعت غذاهای دریایی به عنوان یک تلاش مهم و متقابلاً سودمند مطرح می‌شود.

منابع

- Ahmed, I. A., Mikail, M. A., Zamakshshari, N. and Abdullah, A. S. H., 2020. Natural anti-aging skincare: Role and potential. *Biogerontology*, 21(3), 293–310. <https://doi.org/10.1007/S10522-020-09865-Z>
- Ahmmmed, M. K., Bhowmik, S., Giteru, S. G., Zilani, M. N. H., Adadi, P., Islam, S. S., 2022a. An update of lectins from marine organisms: Characterization, extraction methodology, and potential biofunctional applications. *Marine Drugs*, 20(7), Article 430. <https://doi.org/10.3390/MD20070430>
- Altintzoglou, T., Honkanen, P. and Whitaker, R. D., 2021. Influence of the involvement in food waste reduction on attitudes towards sustainable products containing seafood by-products. *Journal of Cleaner Production*, 285, Article 125487. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125487>
- Chomnawang, C. and Yongsawatdigul, J., 2013. Protein recovery of tilapia frame by-products by pH-shift method. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 22(2): 112–120. <https://doi.org/10.1080/10498850.2011.629077>