Sustainability Research

Technology Development and Assessment

Journal homepage: http://sr.uma.ac.ir

Extraction Technologies for Bioactive compounds from fish waste: Comparative Assessment and Sustainable Commercialization Strategies

Fateme Mohammadzadeh*[1], Fatemeh Ghannadiasl[2]., Zahra Atakeshizadeh[3]

[1] *MSc Student, Department of Food Science and Technology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

[2] *Associate Professor, Department of Food Sciences and Technology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

[3] *PHD Student, Department of Agricultural Mechanization Engineering University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.*

ARTICLE INFO

ABSTRACT

With the rapid and continuous growth of the global population, the demand for reliable and sustainable food resources has risen dramatically. This inevitable trend has naturally resulted in higher consumption and greater volumes of food waste. Due to their highly perishable nature, food waste presents significant environmental challenges, making proper management a pressing concern for governments, industries, and communities. In recent years, increased fish consumption has intensified these issues, as processing generates substantial waste. The byproducts generated from fish processing, including components such as the head, skin, bones, scales, and internal organs, are often discarded as waste. Inadequate management of this waste can lead to significant environmental challenges, such as water and soil contamination, as well as the emission of noxious gases. This waste possesses has considerable potential, harboring valuable materials that can be repurposed in various applications. While a portion of this waste is used as animal feed, much is discarded into the sea or landfills, contributing to pollution and ecosystem degradation in both developed and developing countries.

Fish waste, beyond being an environmental burden, is a rich source of nutrients and valuable compounds. This review systematically and critically analyzes extraction technologies and their applications, with the central question "What are the most efficient and economical strategies for adding value to fish waste towards commercialization?". We compare modern (supercritical fluid extraction, microwave, and ultrasound) and traditional technologies in terms of yield, product quality, scalability, investment and operational costs, and environmental sustainability. Our analysis shows that although methods such as supercritical fluid extraction (SFE) are ideal for producing pure compounds (such as omega-3) suitable for pharmaceutical use, the high investment cost is the main obstacle to their widespread industrial application. In contrast, enzymatic hydrolysis is excellent for the production of bioactive peptides, but the high cost of commercial enzymes is a persistent challenge that requires solutions such as the use of endogenous enzymes or immobilized enzyme bioreactors. By providing a comprehensive comparative table and identifying key research gaps (such as the need for life cycle studies and cost-benefit analysis at a pilot scale), we conclude that the future belongs to hybrid strategies and integrated biorefinery models, in which different technologies are applied in a chain with the aim of maximizing the output value and minimizing secondary waste. This study also reviews recent innovations in the recovery and utilization of fish waste and their transformation into value-added products in the pharmaceutical, cosmetic, food, agricultural and energy industries. These exploitation methods include green and low-harm technologies for extracting compounds such as omega-3 fatty acids, collagen, gelatin, bioactive peptides, enzymes, chitosan, and hydroxyapatite. Each of these materials has wide applications in various industries; for example, marine collagen is used in the production of artificial tissue, wound dressings, and cosmetic products. Fish oil, which is extracted from different parts of the fish body, can be used as a suitable source for the production of biodiesel and dietary supplements. Technological advances, especially the use of modern methods such as microwave-based extraction, have increased efficiency and reduced processing time. Also, the extraction of omega-3 fatty acids from fish waste has gained a special place in the dietary supplement industry due to their effective role in preventing cardiovascular diseases and neurological disorders. Also, compost from this waste, as an organic fertilizer, improves the physical and chemical structure of the soil and provides nutrients to plants.

In conclusion, this review shows that by adopting advanced extraction technologies, implementing effective marketing strategies for recycled products, and fostering collaborative networks across multiple industries, the full potential of these valuable resources can be realized—contributing meaningfully to sustainable development goals and environmental conservation.

Overall, this review shows that by employing modern extraction technologies, effective marketing of recycled products, and establishing collaborative networks between different industries, the potential of these valuable resources can be fully exploited.

Keywords:

1- Adding value to fish waste

2- Marine collagen

3-Omega-3fatty acids

4- Bioceramics

5- Biosorbent

6-Green extraction technologies

Sustainability Research
Technology Development and Assessment
Journal homepage: http://sr.uma.ac.ir

فناوری های استخراج ترکیبات زیست فعال از ضایعات ماهی: ارزیابی مقایسه‌ای و راهبردهای تجاری سازی پایدار

چکیده

مقدمه و هدف: با رشد فزاینده جمعیت جهانی، نیاز به تأمین منابع غذایی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این روند، به‌طور طبیعی منجر به افزایش مصرف و در نتیجه تولید حجم بالاتری از زباله‌های غذایی شده است. زباله‌های غذایی به دلیل ماهیت فاسدشدنی خود، چالش‌های زیست‌محیطی قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند که مدیریت آنها به یکی از دغدغه‌های اصلی جوامع تبدیل شده است. در سال‌های اخیر، با گسترش مصرف ماهی در رژیم غذایی مردم جهان، این چالش‌ها ابعاد تازه‌ای یافته‌اند؛ زیرا فرآوری و مصرف ماهی منجر به تولید مقادیر زیادی ضایعات می‌شود. این ضایعات شامل قسمت‌هایی مانند سر، پوست، استخوان، فلس و اندام‌های داخلی ماهی است که معمولاً دور ریخته می‌شوند. اگر این ضایعات به درستی مدیریت نشوند، می‌توانند مشکلات جدی برای محیط‌زیست از جمله آلودگی آب‌ها و خاک و تولید گازهای مضر ایجاد کنند و در واقع گنجینه‌ای از مواد ارزشمند هستند که می‌توان از آن‌ها استفاده‌های فراوانی کرد. بخشی از این ضایعات به‌عنوان خوراک دام و طیور استفاده می‌شود، اما بخش عمده‌ای از آن‌ها به دریا یا محل‌های دفن زباله منتقل می‌گردد؛ اقداماتی که در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، موجب آلودگی و تخریب محیط زیست می‌شوند.

ضایعات ماهی، فراتر از یک بار زیست‌محیطی، منبعی غنی از مواد مغذی و ترکیبات باارزش به شمار می‌آیند. این مطالعه مروری با پرسش محوری "کارآمدترین و اقتصادی‌ترین راهبردهای ارزش‌افزایی به ضایعات ماهی در مسیر تجاری‌سازی کدامند؟"، به تحلیل سیستماتیک و انتقادی فناوری‌های استخراج و کاربردهای آنها می‌پردازد. ما فناوری‌های نوین (استخراج با سیال فوق‌بحرانی، امواج مایکروویو و اولتراسوند) و سنتی را از نظر بازده، کیفیت محصول، مقیاس‌پذیری، هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی، و پایداری محیطی مقایسه می‌کنیم. تجزیه و تحلیل ما نشان می‌دهد که اگرچه روش‌هایی مانند استخراج با سیال فوق‌بحرانی (SFE) برای تولید ترکیبات خالص (مانند امگا-۳) مناسب داروسازی ایده‌آل هستند، اما هزینه سرمایه‌گذاری بالا مانع اصلی کاربرد گسترده صنعتی آنهاست. در مقابل، هیدرولیز آنزیمی برای تولید پپتیدهای زیست‌فعال بی‌نظیر است، اما هزینه بالای آنزیم‌های تجاری چالشی پایدار است که راه‌حل‌هایی مانند استفاده از آنزیم‌های درون‌زاد یا بیوراکتورهای آنزیم تثبیت‌شده را می‌طلبد. ما با ارائه یک جدول مقایسه‌ای جامع و شناسایی گپ‌های پژوهشی کلیدی (مانند نیاز به مطالعات چرخه عمر و تحلیل هزینه-فایده در مقیاس نیمه‌صنعتی)، نتیجه می‌گیریم که آینده متعلق به راهبردهای هیبریدی و مدل‌های بیورافینری یکپارچه است که در آنها فناوری‌های مختلف به صورت زنجیره‌ای و با هدف حداکثر کردن ارزش خروجی و حداقل کردن ضایعات ثانویه به کار گرفته می‌شوند. همچنین این مطالعه به بررسی نوآوری‌های اخیر در بازیابی و بهره‌برداری از ضایعات ماهی و تبدیل آنها به محصولات با ارزش افزوده در صنایع دارویی، آرایشی، غذایی، کشاورزی و انرژی پرداخته است. این روش‌های بهره‌برداری شامل فناوری‌های سبز و کم‌آسیب برای استخراج ترکیباتی مانند اسیدهای چرب امگا-۳، کلاژن، ژلاتین، پپتیدهای زیست‌فعال، آنزیم‌ها، کیتوزان و هیدروکسی‌آپاتیت هستند. هر یک از این مواد کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند؛ برای مثال، کلاژن دریایی در تولید بافت مصنوعی، پانسمان زخم و محصولات آرایشی استفاده می‌شود. روغن ماهی، که از بخش‌های مختلف بدن ماهی استخراج می‌شود، می‌تواند به‌عنوان منبعی مناسب برای تولید بیودیزل و مکمل‌های غذایی مورد استفاده قرار گیرد. پیشرفت فناوری، به‌ویژه استفاده از روش‌های نوین مانند استخراج مبتنی بر مایکروویو، موجب افزایش بازده و کاهش زمان فرآوری شده است. همچنین، استخراج اسیدهای چرب امگا-۳ از ضایعات ماهی، به دلیل نقش مؤثر آن‌ها در پیشگیری از بیماری‌های قلبی-عروقی و اختلالات عصبی، جایگاه ویژه‌ای در صنعت مکمل‌های غذایی یافته است. همچنین کمپوست حاصل از این ضایعات، به‌عنوان کود ارگانیک، موجب بهبود ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک و تأمین مواد مغذی گیاهان می‌شود.

در مجموع این مرور نشان می‌دهد که با به کارگیری فناوری‌های نوین استخراج، بازاریابی مؤثر محصولات بازیافتی و ایجاد شبکه‌های همکاری میان صنایع مختلف، می‌توان از پتانسیل‌های این منابع ارزشمند به‌طور کامل بهره‌برداری کرد.

واژه‌های کلیدی:
۱-ارزش افزایی ضایعات ماهی
۲-کلاژن دریایی
۳-اسیدهای چرب امگا-۳
۴- زیست سرامیک
۵-جاذب زیستی
6-فناوری‌های استخراج سبز

۱. مقدمه

صنعت فرآوری ماهی در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته و به عنوان یکی از اجزای مهم اقتصاد جهانی مطرح شده است(1). با این حال صنعت شیلات در تناقضی آشکار قرار دارد: از یک سو، منبع حیاتی تأمین پروتئین برای جمعیت رو به رشد جهان است و از سوی دیگر، یکی از تولیدکنندگان بزرگ ضایعات آلی با پیامدهای زیست‌محیطی جدی می‌باشد . با این حال، گذار از دیدگاه 'مدیریت پسماند' به 'خلق ارزش از پسماند' مستلزم پاسخ به پرسشی پیچیده است: در میان طیف وسیع فناوری‌های استخراج و راه‌های تبدیل، کدام راهبرد یا ترکیبی از راهبردها، از نظر فنی کارآمد(۲)، مقرون به صرفه و قابل گسترش به مقیاس صنعتی، بیشترین پتانسیل را برای تجاری‌سازی موفق و یکپارچه‌سازی در اقتصاد زیستی چرخشی دارا هستند؟

کشور ایران ۷۴۰ کیلومتر خط ساحلی در دریای خزر داشته و ۲۴۴۰ کیلومتر نیز خط ساحلی در خلیج فارس و دریای عمان دارد که باعث تقویت صنعت ماهیگیری کشور شده است(3). رشد سریع جمعیت جهانی و افزایش تقاضا برای منابع غذایی، منجر به گسترش صنعت شیلات و آبزی‌پروری شده است. برآوردها نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد از وزن کل ماهی صید شده در طول فرآیندهای فرآوری (فیله‌گیری، کنسروسازی و غیره) به عنوان ضایعات (شامل سر، پوست، استخوان، فلس و احشاء) دور ریخته می‌شود(4). آمار نشان می‌دهد که کل صید وحشی و آبزی پروری در ایران طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، ۱۲۵۸۴۶۰ تن و ۱۰۹۳۷۱۹ تن تخمین زده شده است(5). مطالعه نیز نشان داده است که مقدار ضایعات پس از برداشت ماهی در ایران ۸,۲ درصد است و سالانه ۲۸۳,۳۰ میلیون تن از محصولات کشاورزی به دلیل تلفات به عنوان ضایعات شناخته می‌شوند(6). دفع سنتی این ضایعات، اعم از دفن در خاک یا رهاسازی در دریاها، باعث آلودگی خاک و آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای (مانند متان و آمونیاک) و ایجاد مشکلات بهداشتی می‌شود(7). از سوی دیگر، این ضایعات حاوی مقادیر قابل توجهی از پروتئین‌ها (۱۵-۶۰٪)، چربی‌ها (۱-۲۲٪)، مواد معدنی (۱۰-۴۰٪) و سایر ترکیبات با ارزش مانند کلاژن، اسیدهای چرب امگا-۳ و آنزیم‌ها هستند(8).

زباله‌های ماهی در بخش های مختلفی از جمله خانه‌ها، رستوران‌ها، فروشگاه‌های ماهی و کارخانه‌های فرآوری ماهی یا سطح خرده فروشی و فعالیت‌های آبزی پروری تولید می‌شوند. روانی پور و همکاران(۲۰۲۱)، به بررسی تخمین و مدیریت ضایعات ماهی و میگو در استان بوشهر پرداختند و نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که ضریب تولید زباله ماهی و میگو به ترتیب ۳۲,۶۷ درصد و ۴۲ درصد بود که بیودیزل تولید شده از آنها ۴,۲ درصد از نیاز سوخت دیزل استان بوشهر در سال ۲۰۱۶ را تامین می‌کرد. میزان کل ضایعات ماهی و میگوی تولید شده در استان بوشهر ۲۹۳۸۸ تن در سال تخمین زده شده است(7).

فرآیندهای صنعتی ماهی علاوه بر تولید زباله‌های جامد، موجب ایجاد زباله‌های مایع حاوی آلاینده‌های آلی در قالب‌های محلول، کلوئیدی و ذره‌ای نیز می‌شوند که چالش‌های جدی در مدیریت پسماند ایجاد می‌نمایند(9). با توجه به دارا بودن مواد ارزشمند در ضایعات ماهی، تحقیقات متعددی در سال‌های اخیر به تبدیل این پسماندها به محصولات با ارزش افزوده بالاتر پرداخته‌اند. استفاده از زباله‌های ماهی در تولید خوراک دام، پوشش‌دهنده‌های صنعتی، و مواد مصرفی در حوزه‌های آرایشی، دارویی و بهداشتی، علاوه بر کاهش هزینه‌های حمل و نقل ماهی‌های غیرقابل مصرف، زمینه بهبود پایداری اقتصادی و حفاظت از محیط زیست را فراهم آورده است. (10). استفاده از ضایعات ماهی و تولید آنها به عنوان ماده مغذی باعث افزایش خروجی پایدار برای مصرف کنندگان و صنعت می‌شود. این فرآیند همچنین به زیست پالایی مقرون به صرفه آب کمک می‌کند و هزینه‌های تصفیه آب، خوراک وآنتی بیوتیک‌ها کم شده و درنتیجه بهره‌وری افزایش می‌یابد(11).

با توجه به موارد فوق، تبدیل ضایعات ماهی از یک چالش زیست‌محیطی به یک فرصت اقتصادی و صنعتی، همواره مورد توجه پژوهشگران قرار داشته و همچنان زمینه‌های نوین کاربردی در حوزه مدیریت پسماند فراهم می‌آید(9).

هدف این مرور، فراتر از فهرست کردن فناوری‌ها و کاربردها، ارائه یک تحلیل مقایسه‌ای و انتقادی است که مبنایی برای تصمیم‌گیری صنعتی و جهت‌دهی به تحقیقات آتی فراهم کند. این مقاله به بررسی نظام‌مند مزایا، معایب و محدودیت‌های فناوری‌های کلیدی پرداخته و چارچوبی برای توسعه راهبردهای هیبریدی و یکپارچه پیشنهاد می‌دهد.

۲. کاربردها و فناوری‌های پیشرفته استخراج محصولات ارزشمند از ضایعات ماهی

امروزه ضایعات ماهی به‌عنوان منبع اولیه‌ای برای تولید محصولات متنوع و با ارزش افزوده مورد توجه قرار گرفته‌اند. این محصولات شامل کودهای آلی، خوراک دام، مکمل‌های خوراکی – مانند روغن ماهی، پودر ماهی، سیلوماهی و مکمل‌های کلسیم –، منابعی برای تولید بیودیزل و بیوگاز، همچنین استخراج رنگدانه‌های طبیعی، لوازم آرایشی و محصولات دارویی شامل کلاژن، عصاره استخوان ماهی و اسیدهای چرب غیر اشباع می‌باشند. استفاده از این ضایعات علاوه بر کاهش مشکلات زیست‌محیطی، می‌تواند به بهبود درآمد پرورش‌دهندگان ماهی منجر شود(8). علاوه بر این، بهره‌برداری از ضایعات ماهی موجب کاهش مصرف مواد خام مشتق‌شده از سوخت‌های فسیلی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی می‌شود. (9).

در بخش دیگری از فرآوری، روغن موجود در قسمت‌های مختلف ماهی از جمله گوشت، سر، دم، پوست و روده استخراج می‌شود(12). مقدار استخراج روغن به عواملی از قبیل سن، جنس و وضعیت تغذیه‌ای ماهی بستگی دارد(13). از ضایعات حاصل از قسمت‌های دور ریختنی ماهی کپور سیپرینوس—شامل سر، دم و ستون فقرات—نیز می‌توان روغن ماهی استخراج نمود. مطالعات نشان داده‌اند که استخراج لیپید با استفاده از فناوری مایکروویو نسبت به روش‌های سنتی مبتنی بر حلال، تا ۵۰ درصد کارایی بیشتری دارد (14)که بیانگر این است که پیشرفت تکنولوژی منجر به افزایش بازده در عملیات بازیافت و تبدیل ضایعات ماهی به مواد مفیدی از جمله روغن ماهی شده است. استفاده از روش‌های استخراج سنتی (مانند استخراج با حلال‌های آلی یا هیدرولیز اسیدی/قلیایی) به دلیل مصرف انرژی بالا، زمان طولانی، تخریب ترکیبات حساس و مسائل زیست‌محیطی در حال جایگزینی با فناوری‌های سبز و کارآمد است(15).

استخراج با کمک امواج مایکروویو: این روش با گرمایش سریع و یکنواخت درون ماتریس نمونه، منجر به شکسته شدن دیواره سلولی و آزادسازی سریع ترکیبات هدف می‌شود. برای استخراج لیپیدها و روغن ماهی بسیار موثر است و گزارش شده که می‌تواند بازده استخراج را تا ۵۰٪ نسبت به روش سوکسله افزایش داده و زمان را از چند ساعت به چند دقیقه کاهش دهد. همچنین برای استخراج ترکیبات زیست‌فعال مانند پپتیدها نیز به کار می‌رود(14).

استخراج آنزیم(Enzymatic Hydrolysis) :

استفاده از آنزیم‌های خاص (مانند آلکالاز، پپسین، تریپسین) برای هیدرولیز کنترل‌شده پروتئین‌ها، روشی ملایم و بسیار خاص است. این روش برای تولید پپتیدهای زیست‌فعال با خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد فشار خون و ضد میکروبی برتر شناخته شده است(16). چالش اصلی این روش، هزینه نسبتاً بالای آنزیم‌هاست که با استفاده از آنزیم‌های immobilzed یا بهره‌گیری از آنزیم‌های استخراج شده از خود ضایعات ماهی (پروتئازهای درونزاد) می‌توان آن را کاهش داد(17).

استخراج با سیال فوق‌بحرانی Supercritical Fluid):

Extraction)در این روش، معمولاً از دی‌اکسید کربن فوق‌بحرانی $(scCO_2)$ به عنوان حلال استفاده می‌شود. این روش برای استخراج انتخابی لیپیدها و اسیدهای چرب غیراشباع مانندEicosapentaenoic acid و Docosahexaenoic acid ایده‌آل است، زیرا در دمای پایین انجام شده و از اکسیداسیون این ترکیبات

حســـاس جلوگیری می‌کنـد. محصـــول نهایی نیز عاری از هرگونه حلال ســـمی است(18).

یکی از کاربردهای مهم ضایعات ماهی، استخراج روغن حاصله از آن به‌منظور تولید بیودیزل است. بیودیزل سوخت زیستی است و بهترین سوخت برای استفاده در موتورهای دیزلی است. وجود سوخت فسیلی در موتورهای احتراق داخلی باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی شده است. یافتن جایگزینی مناسب برای این سوخت در ایران با توجه به محدود بودن منابع سوختی امری مهم طلقی شده و بنابراین تبدیل ضایعات ماهی از جمله روغن ماهی به بیودیزل در مناطق مختلف ایران حائز اهمیت است. استفاده از سوخت دیزل در موتورهای دیزلی راهی برای صرفه جویی در مصرف سوخت در ایران است (3).

در صورت اجرای واکنش ترانس استریفیکاسیون با استفاده از کاتالیزور پتاسیم هیدروکسید در شرایط دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و زمان واکنش ۱۰ دقیقه، روغن استخراج‌شده به بیودیزل تبدیل می‌گردد(8). این واکنش که از طریق تعامل شیمیایی بین لیپیدها و الکل صورت می‌گیرد، منجر به تشکیل استرهای متیلی، اتیلی یا پروپیلی می‌شود. طبق گزارش‌ها، برای تولید یک کیلوگرم بیودیزل از روغن پسماند ماهی، مصرف ۳۴۴ وات ساعت برق، ۱۰ گرم هیدروکسید پتاسیم و ۲۱۸,۴۲ گرم متانول لازم است(19).

علاوه بر این، ضایعات ماهی زمینه تولید محصولات متعددی را فراهم می‌آورد؛ به‌عنوان نمونه، کلسیم اکسید استخراج‌شده از استخوان ماهی به عنوان کاتالیزور در فرآیندهای تولید بیودیزل کاربرد دارد(14). همچنین از استخوان و فلس ماهی تیلاپیا می‌توان هیدروکسی‌آپاتیت تهیه نمود که در صنایع پزشکی و دندانپزشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است(20). روش‌های مختلفی جهت استخراج هیدروکسی‌آپاتیت از ضایعات ماهی پیشنهاد شده است که رایج‌ترین آن‌ها استفاده از اسیدهایی نظیر اسید استیک و اسید کلریدریک به‌منظور حل کردن زنجیره‌های کلاژن می‌باشد(8).

جدول۱ مقایسه فناوری‌های کلیدی استخراج ترکیبات ارزشمند از ضایعات ماهی

فناوری	اصول کار	ترکیبات هدف اصلی	مزایای کلیدی	محدودیت‌هاو چالش‌های کلیدی	وضعیت بلوغ و مقیاس پذیری	ملاحظات اقتصادی
استخراج با سیال فوق‌بحرانی(SFE)	استفاده از حلال)معمولاً CO_2 در دما و فشار بالاتر از نقطه بحرانی	اسیدهای چرب امگا–۳(EPA/DHA) ، رنگدانه‌ها، استرول‌ها	-عدم باقی‌مانده حلال سمی -کیفیت و خلوص بالای محصول -فرآیند کم‌دما (جلوگیری از اکسیداسیون) -انتخاب‌پذیری با تنظیم پارامترها	-هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالا برای راکتورهای فشارقوی -نیاز به عملیات در فشار بالا (مسائل ایمنی) -بازده محدود برای ترکیبات بسیار قطبی -هزینه بالای	مقیاس صنعتی برای برخی کاربردها (مثل دکافهینه کردن قهوه)؛ برای ترکیبات دریایی عمدتاً در مقیاس نیمه‌صنعتی و برای بازارهای با ارزش افزوده بسیار بالا (دارو)	اقتصاد مقیاس حیاتی است. برای محصولات دارویی با قیمت بالا توجیه‌پذیر است، اما برای محصولات غذایی یا خوراک دام معمولاً مقرون به صرفه نیست.
هیدرولیز آنزیمی	استفاده از آنزیم‌های خاص برای شکستن کنترل‌شده پیوندهای پپتیدی یا استری	پپتیدهای زیست‌فعال، پروتئین‌های هیدرولیزه، اسیدهای آمینه	-شرایط ملایم)دمای پایین، pH خنثی(-ویژگی و انتخاب‌پذیری بالا -تولید پپتیدهای با فعالیت زیستی مشخص	آنزیم‌های تجاری -زمان فرآیند طولانی‌تر -نیاز به کنترل دقیق شرایط بهینه برای هر آنزیم -احتمال مهار فعالیت آنزیمی توسط محصولات	مقیاس صنعتی برای تولید پروتئین هیدرولیزه و برخی پپتیدها. چالش در بازیابی و استفاده مجدد از آنزیم.	هزینه آنزیم عامل تعیین‌کننده است. راه‌حل‌ها: استفاده از آنزیم‌های تثبیت‌شده (قابلیت استفاده مجدد) یا بهره‌گیری از آنزیم‌های درون‌زاد استخراج شده از خود ضایعات ماهی.
استخراج با کمک امواج مایکروویو (MAE)	گرمایش درونی و سریع نمونه توسط جذب انرژی الکترومغناطیسی	روغن/لیپید، ترکیبات زیست‌فعال قطبی، پپتیدها	-بازده و سرعت استخراج بسیار بالا -کاهش مصرف حلال -یکنواختی گرمایش	-سرمایه‌گذاری اولیه متوسط تا بالا -امکان تخریب حرارتی ترکیبات حساس اگر کنترل نشود -مقیاس‌پذیری نیاز به طراحی مهندسی دقیق دارد	در مقیاس صنعتی برای استخراج روغن از مواد گیاهی رواج دارد؛ برای ضایعات ماهی در حال توسعه است.	هزینه عملیاتی به دلیل کاهش زمان و حلال، پایین‌تر است. بازگشت سرمایه بستگی به ظرفیت و محصول نهایی دارد.
استخراج با کمک امواج اولتراسوند (UAE)	ایجاد کاویتاسیون برای شکستن دیواره سلولی و افزایش انتقال جرم	پروتئین‌ها، کلاژن، پپتیدها، ترکیبات زیست‌فعال	-کارایی بالا در استخراج پروتئین -دمای پایین (حفظ فعالیت زیستی) -سادگی نسبی دستگاه‌های آزمایشگاهی	-مقیاس‌پذیری چالش‌برانگیز)ایجاد میدان اولتراسونیک یکنواخت در حجم‌های بزرگ(-امکان تولید رادیکال‌های آزاد و اکسیداسیون -بهینه‌سازی پارامترها برای هر ماده ضروری است	عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی. سیستم‌های پیوسته (Flow-through)در حال تحقیق هستند.	برای مقیاس‌های کوچک تا متوسط و محصولات با ارزش متوسط (مثل کلاژن خوراکی) می‌تواند جذاب باشد.
هیدرولیز اسیدی/قلیایی (سنتی)	استفاده از اسید یا باز قوی برای شکستن پیوندها	ژلاتین، پروتئین‌های هیدرولیزه، پودر ماهی	-هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی پایین -فناوری کاملاً شناخته شده و مقیاس‌پذیر -بازده کلی بالا	-تخریب ترکیبات حساس)اسیدهای آمینه، امگا–۳(-تولید پساب‌های شیمیایی با بار آلودگی بالا -خلوص و کیفیت پایین‌تر محصول -مشکلات ایمنی در کار با مواد شیمیایی	مقیاس کاملاً صنعتی و جاافتاده برای تولید ژلاتین و پودر ماهی.	از نظر اقتصادی برای محصولات کم‌ارزش (خوراک دام) بسیار رقابتی است، اما هزینه‌های پنهان زیست‌محیطی دارد.

۳. ترکیبات ارزشمند و کاربردهای نوآورانه

روغن ماهی

روغن ماهی از کل بدن ماهی، به‌ویژه از پوست و در برخی گونه‌ها از کبد به‌دست می‌آید. این روغن منبع غنی از اسیدهای چرب غیر اشباع چندگانه، به ویژه ایکوزاپنتانوئیک (Eicosapentaenoic acid) و دوکوزاهگزانوئیک اسید (Docosahexaenoic acid) می‌باشد که دارای خواص درمانی متعددی از جمله اثرات ضدقارچی و آنتی‌اکسیدانی است و در درمان بیماری‌هایی مانند دیابت و سرطان نقش مؤثری ایفا می‌کند(9).

استخراج و تهیه اسیدهای چرب امگا-۳ از ضایعات ماهی، روشی مهم برای تبدیل پسماند به محصولات با ارزش افزوده محسوب می‌شود. این اسیدهای چرب در پیشگیری از بیماری‌های قلبی عروقی و اختلالات عصبی نقش کلیدی دارند(21). همچنین، کمبود امگا-۳ می‌تواند منجر به مشکلات بینایی، حافظه و عملکرد تولید مثل شود؛ به‌طوریکه در زنان باردار، این اسید چرب در تحریک رشد جنین پیش از تولد و تسهیل فرایند زایمان موثر است(22). این ماده ارزشمند قابلیت استفاده به عنوان قرص‌های مکمل در پیشگیری از بیماری‌ها را دارد و این بازیافت می‌تواند به سلامت و اقتصاد جامعه کمک کند.

افزون بر این، تقاضای مصرف‌کنندگان برای روغن ماهی به دلیل دارا بودن امگا-۳ و کاربردهای گسترده آن در صنایع آرایشی، بهداشتی و دارویی در سال‌های اخیر افزایش یافته است(23). از جمله منابع تولید روغن ماهی، می‌توان به استفاده از ضایعات ماهی، به‌ویژه استخراج روغن از باله ماهی اشاره کرد. تحقیقات نشان داده‌اند که به دلیل کیفیت مناسب روغن ماهی، این محصول قابلیت استفاده در موتورهای دیزل را نیز دارد(9). بر اساس نتایج یک مطالعه در سال ۲۰۱۶، حدود ۲۶ درصد از روغن ماهی تولید شده از طریق ضایعات ماهی به دست آمده (24) و پیش‌بینی شده است تا سال ۲۰۲۵، مقدار تولید روغن ماهی جهت مصرف انسان به ۷۷۱۰۰۰ تن برسد(21).

کلاژن و ژلاتین دریایی

کلاژن، پروتئین ساختاری اساسی، در پوست، استخوان و سایر بافت‌های نرم حیوانات یافت می‌شود(9). این پروتئین در انواع مختلفی وجود دارد که رایج‌ترین آن، کلاژن نوع ۱ است؛ نوعی که عمدتاً در پوست، تاندون و استخوان مشاهده می‌شود(1). کلاژن نقش مهمی در بازسازی سلول‌ها و مهندسی بافت ایفا کرده (8) و به‌عنوان عامل تقویت‌کننده غضروف نیز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد(25). کاربردهای بالینی کلاژن به ویژه در پانسمان زخم‌های مرطوب (26) و به‌عنوان هیدروژل جهت کاهش عمق سوختگی‌های درجه دوم مورد توجه قرار گرفته است(27). علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند کلاژن در درمان بیماری‌هایی مانند آرتروز و نیز در پیشگیری از بیماری‌های قلبی نقش مؤثری دارد. کلاژن به‌طور طبیعی در بدن وجود دارد، اما با افزایش سن میزان آن کاهش یافته که موجب از دست رفتن آب‌رسانی و سرعت پیری پوست می‌شود؛ لذا استفاده از مکمل‌های کلاژن در افراد مسن به‌منظور حفظ آبرسانی مناسب و تأخیر در روند پیری پوست توصیه شده است که نشاندهنده کاربرد این ماده ارزشمند در صنایع آرایشی است(28). همچنین، استفاده از کلاژن در پوشش‌های خوراکی جهت بهبود کیفیت محصولات گوشتی، در مصارف دارویی و بیومدیکال و نیز استفاده در لوازم آرایشی به دلیل خاصیت مرطوب‌کنندگی، از دیگر کاربردهای مهم آن محسوب می‌شود(9).

منابع خوب کلاژن شامل پوست گاو، خوک، استخوان گاو و سایر ضایعات پستانداران(29) و همچنین منابع دریایی مانند اسفنج و ماهی به‌شمار می‌روند(30). از میان گونه‌های آبزی، منابعی همچون اسفنج، نرم‌تنان (شامل صدف، ماهی مرکب و اختاپوس) و ماهی به عنوان منابع غنی کلاژن مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به‌طوری که استخوان‌ها، پوست، فلس و باله‌های ماهی همگی سرشار از این پروتئین ارزشمند هستند(31). کلاژن استخراج‌شده از محصولات جانبی ماهی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله زیست‌پزشکی، مهندسی بافت و صنایع آرایشی دارد(1) و به دلیل سازگاری زیستی بالا، زیست‌تخریب‌پذیری و عدم انتقال بیماری‌های مشترک دام و خشکی (مانند جنون گاوی)، جایگزین مناسبی برای کلاژن پستانداران است(32).

در سال‌های اخیر، مصرف ژلاتین در جهان به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. ژلاتین از طریق هیدرولیز جزئی کلاژن طبیعی به دست می‌آید(9) و ژلاتین موجود در استخوان، پوست و غضروف ماهی کاربردهای گسترده‌ای در پزشکی، مهندسی بافت و بستن زخم‌ها دارد؛ چراکه علاوه بر دارا بودن خواص آنتی‌اکسیدانی قابل توجه، در برخی موارد به عنوان عامل ضد فشار خون نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد(33). از سوی دیگر، ژلاتین ماهی با تثبیت امولیسیون‌ها و مقاومت در برابر تغییرات دما و غلظت نمک، می‌تواند جایگزینی مطمئن برای ژلاتین گاوی تلقی شود(9). همچنین، کاربردهای نوینی نظیر استفاده از ژلاتین استخراج‌شده از ضایعات ماهی به عنوان طعمه ماهی مصنوعی در ماهیگیری مطرح شده است(34).

جاذب زیستی

فلس ماهی به‌عنوان ماده اولیه‌ای در تولید جاذب‌های زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای بهینه عملکرد این جاذب‌ها در بازه ۳۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است(35). جاذب‌های زیستی تولیدشده از فلس ماهی در تصفیه فاضلاب صنایع دارویی(35)، چرم‌سازی(36) و حتی باتری‌سازی خودرو(37) مؤثر بوده و یک راهکار سبز و پایدار برای صنایع ذکر شده است. همچنین نشان‌دهنده کارایی بالا در حذف آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین با راندمان حذف بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد و همچنین حذف رنگ‌های مختلف از جمله متیلن بلو(38)، رنگ زرد اسیدی، رومازول زرد، قرمز و آبی(39) (با کارایی ۷۸ تا ۹۰ درصد) هستند. نمونه‌هایی از ماهی‌های فلس‌دار مورد استفاده در این زمینه شامل Tilapia Nilotica، Labeo Rohita و Lethrinus Nebulosus می‌باشند(35). ایجاد رسوب توسط نمک‌ها و اسیدهای پلی آکریلیک، رسوب ایزوالکتریک، اولترافیلتراسیون، تغییر pH، لخته سازی و فیلتراسیون فرآیندهای مورد نیاز برای جداسازی آنزیم از ضایعات ماهی هستند(40).

غلظت جاذب زیستی نقش کلیدی در فرآیند جذب آلاینده‌ها دارد. بر اساس یافته‌ها، در صورتی که غلظت جاذب کم باشد، جذب فلزات توسط آن نسبت به زمانی که غلظت افزایش می‌یابد، بیشتر رخ می‌دهد(41). علاوه بر این، سطح جاذب زیستی نیز از عوامل مؤثر در افزایش جذب محسوب می‌شود؛ به‌طوری که افزایش سطح

تماس منجر به جذب بیشتر آلاینده می‌گردد. ضمناً، دوز مصرفی جاذب زیستی به اندازه ذرات آلاینده نیز وابسته است؛ در شرایطی که اندازه ذرات کوچک باشد، دوز مورد نیاز کاهش یافته و بالعکس، در صورت افزایش اندازه ذرات، دوز مصرفی به میزان بیشتری نیاز خواهد داشت(35). فلس ماهی که عمدتا از کلاژن معدنی شده و کراتین تشکلیل شده، دارای ساختار متخلخل و گروه‌های عاملی فعال(مانند آمینو و کربوکسیل) است. این ویژگی‌ها آن را به یک جاذب زیستی کم‌هزینه و بسیار موثر برای حذف آلاینده‌ها از فاضلاب تبدیل کرده است(42). جاذب‌های زیستی تولید شده از فلس ماهی قابلیت استفاده مجدد به ویژه در اولین چرخه بازیابی را دارند. یکی از راه‌های بررسی این ویژگی ارزشمند استفاده از معرف‌های شیمیایی محلول ۰،۱ نرمال هیدروکلریک اسید و ۱ نرمال سدیم کلرید است(43).

زیست سرامیک

هیدروکسی‌آپاتیت یکی از مهمترین زیست‌سرامیک‌های مورد استفاده در رشته‌های پزشکی، دندانپزشکی و ارتوپدی به‌شمار می‌رود. این ماده به‌عنوان ماده اولیه در ساخت ایمپلنت‌های جراحی یا پوشش ایمپلنت‌های دندانی کاربرد دارد(20). استفاده از هیدروکسی‌آپاتیت در درمان‌های ضد میکروبی و پوکی استخوان، از طریق ترکیب آن با داروهای تکمیلی، برجسته شده و به عنوان پرکننده جایگزین استخوان یا ایمپلنت‌های ارتوپدی مورد استفاده قرار می‌گیرد(44). ویژگی‌های مهمی از قبیل عدم تغییر حجم و جذب کم، این ماده را برای کاربردهای جراحی ایده‌آل می‌سازد؛ به طوری که به عنوان پرکننده استخوان در ترمیم عیوب استخوانی، به‌ویژه پس از انجام عمل‌های توموری، موثر واقع شده است(45). به علاوه، هیدروکسی‌آپاتیت در جایگزینی استخوان گوش میانی، بازسازی زخم، کاربردهای چشم‌پزشکی، درمان‌های ضد سرطان و تحویل کنترل‌شده دارو در بیماران مبتلا به پوکی استخوان و تومورهای استخوانی نیز کاربرد دارد. (46) از طرفی، استخوان و فلس ماهی – یکی از ضایعات ماهی – دارای مقدار زیادی کلسیم و فسفر است و تهیه این ماده از آن‌ها امکان‌پذیر است(20)؛ هرچند که هیدروکسی‌آپاتیت حاصل از این منابع، استحکام کششی کمی دارد(46) ولی به دلیل مزایای کاربردی این ماده در پزشکی و کمک به سلامت انسان‌ها، تولید این زیست سرامیک از منابع قابل بازیافتی مانند ضایعات ماهی در زمینه کاهش هزینه‌های درمان بیماران می‌تواند کمک کننده باشد و همچنین امکان استفاده از آن برای قشر متوسط یا پایین جامعه نیز فراهم می‌شود.

ضایعات ماهی، علاوه بر استخراج هیدروکسی‌آپاتیت، امکان تأمین منابع دیگری را نیز فراهم می‌آورند. به عنوان مثال، از استخوان ماهی می‌توان کلسیم اکسید به‌دست آورد که به‌عنوان کاتالیزور در فرآیند تولید بیودیزل مورد استفاده قرار می‌گیرد. استخراج کلسیم اکسید از استخوان ماهی در دماهای مختلف، پیش‌نیاز تولید بیودیزل از ضایعات روغن پخت و پز محسوب می‌شود. لازم به ذکر است بیودیزل، یک مونوآلکیل استر اسید چرب است(14) که در حین احتراق، نسبت به سوخت‌های فسیلی، مقادیر کمتری از آلاینده‌هایی مانند گوگرد، مونوکسید کربن و ذرات معلق تولید می‌کند. به همین دلیل، بیودیزل به‌عنوان جایگزینی ایمن و پاکیزه برای سوخت‌های فسیلی که عامل اصلی گرمایش جهانی به‌شمار می‌آیند(19)، مطرح شده است. علاوه بر این، بیودیزل غیرسمی، ایمن و تجدیدپذیر بوده و از منابع طبیعی نظیر روغن‌های گیاهی، روغن پسماند غذایی، چربی حیوانات و جلبک‌ها به‌دست می‌آید. استفاده از کلسیم اکسید به‌عنوان کاتالیزور نیز به دلیل عدم سمیت، ناهمگنی و ایمنی بالای آن از مزایای مهم در این فرایند به‌شمار می‌رود(47).

استخراج آنزیم‌ها

محصولات جانبی ماهی، از جمله معده، لوزالمعده و روده، قابلیت تبدیل به آنزیم‌های کاربردی را دارند(40). غلظت بالای پروتئین موجود در این بخش‌های خوراکی امکان هیدرولیز آن‌ها برای بازیافت پروتئین و تولید آنزیم‌های مورد نیاز در صنایع آرایشی-بهداشتی و بیوتکنولوژی را فراهم می‌آورد. با این حال، از چالش‌های اصلی هیدرولیز آنزیمی، هزینه‌های بالا در تولید برخی از آنزیم‌ها به‌شمار می‌آید(23). آنزیم پروتئاز(پپسین و تریپسین) به‌طور طبیعی در ماهی وجود دارد(48) و به همراه آنزیم‌های لیپاز، در فرآیند حذف لکه‌های چربی، خاک و سایر آلاینده‌ها به کار گرفته می‌شوند؛ این آنزیم‌ها در صنایع غذایی(در فرآیند تولید پنیر و نرم کردن گوشت) ، مواد شوینده لباسشویی(به عنوان افزودنی در پودرهای لباسشویی برای تجزیه لکه‌های پروتئینی و چربی)، داروسازی، تولید روغن، سوخت‌های زیستی، منسوجات و حتی در کشاورزی کاربرد دارند(49). امروزه سرانه مصرف لوازم آرایشی و بهداشتی در کشورهای مختلف افزایش یافته و بنابراین باید دنبال راه جایگزینی به منظور کاهش هزینه‌های تمام شده این محصولات باشیم. همچنین استفاده از آن به عنوان یک منبع طبیعی می‌تواند منجر به افزایش خواص تولیدات شود.

کمپوست و خوراک دام

ضایعات ماهی به دلیل دارا بودن عناصر مغذی نظیر نیتروژن، فسفر و گوگرد، پتانسیل تبدیل به کود گیاهی را دارا می‌باشند و ویژگی‌های حسی خاص این پسماندها به ویژه وجود ترکیبات گوگردی معطر، مانع از دستیابی به نتایج مطلوب در تولید کود مستقیم می‌شود. بنابراین، استفاده از ضایعات ماهی در تولید کمپوست به‌عنوان روشی جهت بهبود خصوصیات خاک و تأمین عناصر مغذی برای گیاهان پیشنهاد می‌شود. لازم به ذکر است که در فرایند تولید کمپوست از ضایعات ماهی، توجه به شوری بالای ضایعات غذاهای دریایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است(10). کمپوست به دست آمده از ضایعات، فاقد فلزات سنگین و ترکیبات فیتوتوکسیک است. همچنین به بهبود فعالیت آنزیمی خاک کمک کرده و غنی از ماده خشک میکروبی است که منجر به رشد بهتر گیاهان می‌شود. از دیگر فواید کمپوست می‌توان به کاهش فلز کادمیوم در خاک در طولانی مدت اشاره کرد و با داشتن مقادیر بالای مواد هیومیک، توانایی تشکیل کمپلکس های آلی فلزی پایدار با یون های فلزی موجود در خاک را دارد که باعث کم شدن تحرک فلزات می‌شود(4). مطالعات نشان داده‌اند که کمپوست به‌دست آمده از ضایعات ماهی غیرسمی بوده (50) و می‌تواند به عنوان کود مؤثر در بهبود خاک به کار رود. علاوه بر این، ضایعات ماهی به دلیل دارا بودن مواد مغذی قابلیت تبدیل به سیلاژ را نیز دارند؛ سیلاژ حاصل از این پسماندها در تغذیه حیوانات کاربرد داشته(51) و منجر به صرفه‌جویی حدود ۲۱ درصدی در هزینه‌های خوراک دام می‌شود(52). استفاده از ضایعات ماهی در حوزه کشاورزی، در کشورهای مختلف با پیشرفت تکنولوژی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است و محققان به دنبال راهی برای بهره برداری با ظرفیت بالاتر از ضایعات و تبدیل آن‌ها به چرخه اقتصاد کشور هستند.

به علاوه، فلس ماهی دارای نوعی پروتئین است که از نظر تغذیه‌ای برای خوراک دام مناسب نمی‌باشد و در برابر تجزیه میکروبی نیز مقاومت بالایی دارد. دفع سنتی این ماده از قبیل سوزاندن در هوای آزاد یا ریختن در محل دفن زباله، می‌تواند منجر به مشکلات زیست‌محیطی از جمله بروز بوی نامطبوع و ایجاد شرایط مساعد برای رشد باکتری‌های ناخواسته شود. به همین علت، در سال‌های اخیر پژوهشگران به دنبال راهکارهایی برای بازیافت بهینه این ماده بوده‌اند. یکی از کاربردهای نوین، تبدیل فلس ماهی به پودر به‌عنوان اصلاح‌کننده زیستی برای چسباندن آسفالت است که استفاده از این پودر علاوه بر کاهش مشکلات زیست‌محیطی، مزایای اقتصادی قابل‌توجهی را نیز همراه داشته است(53). همچنین، پودر ماهی که از ضایعات ماهی، صیدهای جانبی و گونه‌های مختلف به دست می‌آید، دارای ترکیبی شامل تقریباً ۷۰ درصد پروتئین، ۱۰ درصد مواد معدنی، ۹ درصد چربی و ۸ درصد آب می‌باشد. این محصول به عنوان منبع پروتئینی برای خوراک دام در صنایع مختلف بهره‌برداری می‌شود(9). یافتن راه‌هایی برای استفاده از ضایعات ماهی در صنایع مختلف از جمله دامداری‌ها و با

حفظ خاصـیت جلوگیری کننده آن‌ها از آلودگی محیط زیسـت را می‌توان یکی از دستاوردهای مهم در سال‌های اخیر در صنعت شیلات دانست.

جدول۲ ترکیبات ارزشمند حاصل از ضایعات ماهی

ترکیبات	منبع اصلی در ماهی	کاربرد
بیودیزل	روغن ماهی	سوخت موتورهای دیزلی
کلسیم اکسید	استخوان ماهی	به عنوان کاتالیزور در فرآیندهای تولید بیودیزل
هیدروکسی آپاتیت	استخوان وفلس ماهی تیلاپیا	پزشکی- دندانپزشکی
روغن ماهی (EPA و DHA)	کل بدن ماهی به ویژه پوست و در برخی گونه‌ها کبد	دارای اثرات ضدقارچی و آنتی اکسیدانی و نقش در درمان بیماری‌های سرطان و دیابت.
کلاژن	پوست، تاندون و استخوان	نقش در بازسازی سلول‌ها و مهندسی بافت- عامل تقویت کننده غضروف- درمان آرتروز- به عنوان هیدروژل در کاهش عمق سوختگی درجه دوم.
ژلاتین	هیدرولیز جزئی کلاژن موجود در استخوان، پوست و غضروف ماهی	پزشکی- مهندسی بافت- به عنوان طعمه ماهی مصنوعی در ماهیگیری
جاذب زیستی	فلس ماهی	تصفیه فاضلاب صنایع دارویی، چرم سازی و باتری سازی خودرو- جذب آلاینده‌ها
پروتئاز و لیپاز	محصولات جانبی مثل معده، لوزالمعده و روده	در صنایع آرایشی، بهداشتی و بیوتکنولوژی
اصلاح کننده زیستی	فلس ماهی	چسباندن آسفالت

۴. چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده

با وجود پتانسیل بالا، موانعی بر سر راه تجاری‌سازی کامل این فناوری‌ها وجود دارد:

- **نوسان در ترکیب و کیفیت ضایعات:** بسته به گونه ماهی، فصل و روش فرآوری، ترکیب ضایعات می‌تواند بسیار متغیر باشد که استانداردسازی فرآیندها را دشوار می‌کند.
- **هزینه سرمایه‌گذاری اولیه :** فناوری‌های استخراج پیشرفته مانند (Supercritical Fluid Extraction) نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجهی هستند.
- **مسائل مقیاس پذیری:** بسیاری از این فناوری‌ها در مقیاس آزمایشگاهی موفق بوده‌اند، اما انتقال آن‌ها به مقیاس صنعتی نیازمند تحقیقات بیشتر است.
- **مقررات و پذیرش مصرف‌کننده :** محصولات مشتق شده از ضایعات باید از نظر ایمنی (مانند وجود فلزات سنگین) کاملاً ارزیابی شده و مورد تایید نهادهای regulartory قرار گیرند. همچنین، پذیرش مصرف‌کننده برای محصولاتی مانند کلاژن دریایی یا پپتیدهای زیست‌فعال نیازمند آموزش و بازاریابی مناسب است.

چشم‌انداز آینده بر روی یکپارچه‌سازی این فرآیندها در یک پالایشگاه زیستی (Biorefinery) متمرکز است. در این مفهوم، ضایعات ماهی به عنوان "خوراک" وارد یک کارخانه یکپارچه می‌شوند و در چندین مرحله، انواع مختلفی از محصولات با ارزش مثل روغن، کلاژن، پپتیدها وکمپوست به طور همزمان و با حداکثر بازدهی استحصال می‌شوند. این رویکرد، سودآوری اقتصادی را به حداکثر رسانده و ضایعات نهایی را به صفر می‌رساند.

بررسی مقالات نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های تکنولوژیک چشمگیر بوده، اما یک شکاف عمده بین نوآوری در سطح آزمایشگاهی و اجرا در سطح صنعتی وجود دارد. بیشتر مطالعات بر روی بهینه‌سازی بازده یک ترکیب خاص در مقیاس گرم متمرکز شده‌اند، در حالی که داده‌های کمی در مورد تحلیل چرخه عمر (LCA)و تحلیل هزینه-فایده (TEA) این فرآیندها در مقیاس واقعی موجود است. از این رو :

۱. ضرورت دارد تحلیل‌های اقتصادی-زیست‌محیطی یکپارچه انجام شود که هزینه سرمایه‌گذاری، عملیاتی، و همچنین پیامدهای زیست‌محیطی (مصرف انرژی، تولید پساب) فناوری‌های مختلف را برای محصولات خاص (مثلاً امگا-۳ دارویی در مقابل امگا-۳ خوراکی) کمّی و مقایسه کند(۵۳).

۲. راهبردهای هیبریدی مورد توجه قرار گیرد . برای مثال، یک پیش‌تیمار اولتراسوند یا مایکروویو می‌تواند ساختار بافت را ضعیف کرده و بازده هیدرولیز آنزیمی بعدی را به شدت افزایش دهد، در نتیجه زمان فرآیند و مصرف آنزیم کاهش می‌یابد(۵۴).

۳. تحقیقات باید بر روی طراحی‌های راکتور کارآمدتر و کاهش هزینه‌های فشرده‌سازی متمرکز شود. برای هیدرولیز آنزیمی، توسعه روش‌های کم‌هزینه برای تولید انبوه آنزیم‌های تثبیت‌شده با پایداری عملیاتی بالا یک اولویت است(55).

۴. پژوهش‌های آینده باید فراتر از استخراج یک محصول باشند و بر طراحی و مدل‌سازی سیستم‌هایی تمرکز کنند که بتوانند به طور همزمان چندین جریان با ارزش (روغن، پپتید، کلاژن، هیدروکسی‌آپاتیت) را از یک جریان ورودی ضایعات تولید کنند. این امر نیازمند همکاری میان رشته‌ای بین مهندسی شیمی، اقتصاد و زیست‌فناوری است(56).

۵. نتیجه‌گیری

در دنیای امروز، ضایعات مواد غذایی به دلیل فسادپذیری بالا به عنوان یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی شناخته شده است. با توجه به افزایش روزافزون تولید و مصرف ماهی در سال‌های اخیر، ضایعات حاصل از این صنعت، به عنوان منبعی ارزشمند برای تبدیل به محصولات باارزش افزوده بالا مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این مرور نشان داد که با به کارگیری فناوری‌های استخراج سبز و پیشرفته، می‌توان طیف وسیعی از ترکیبات با ارزش بالا را برای صنایع پیشرفته پزشکی، غذایی و شیمیایی بازیابی کرد. در پاسخ به پرسش محوری مقاله، به نظر می‌رسد هیچ "راه حل یکسانی برای همه" وجود ندارد. کارآمدترین راهبرد تابعی از بازار هدف و ارزش محصول نهایی، مقیاس عملیاتی و منابع و محدودیت‌های محلی است.

مانع اصلی تجاری‌سازی، نه لزوماً فناوری، بلکه عدم قطعیت اقتصادی و نبود مدل‌های کسب‌وکار انعطاف‌پذیر است. آینده متعلق به پلتفرم‌های انعطاف‌پذیر است که بتوانند با تغییر ترکیب ضایعات ورودی یا تقاضای بازار، خروجی خود را تنظیم کنند. دستیابی به این چشم‌انداز مستلزم حرکت از پژوهش‌های جزیره‌ای به سمت پروژه‌های یکپارچه‌سازی است که در آنها عملکرد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک راهبرد کامل، مورد آزمون واقعی قرار گیرد. تنها از این طریق است که ضایعات ماهی به طور کامل از یک چالش به موتور محرکه اقتصاد چرخشی تبدیل خواهد شد. موفقیت نهایی در گرو سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، ایجاد همکاری‌های بین‌رشته‌ای و تدوین سیاست‌های حمایتی از سوی دولت‌ها برای تشویق صنایع به سوی مدل‌های کسب‌وکار پایدار است. تحقق این امر، سهم بسزایی در امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست خواهد داشت.

References

1. Ideia P, Pinto J, Ferreira R, Figueiredo L, Spínola V, Castilho PC. Fish processing industry residues: A review of valuable products extraction and characterization methods. Waste and Biomass Valorization. 2020;11:3223–46.
2. ACTION B. The State of World fisheries and aquaculture. Food

2020. p. 2206–8.

21. Alfio VG, Manzo C, Micillo R. From fish waste to value: an overview of the sustainable recovery of omega-3 for food supplements. Molecules. 2021;26(4):1002.
22. Hou Y, Shu K, Zhang Y. The role of omega-3 fatty acids in AMD and DED. In: International Conference on Green Environmental Materials and Food Engineering (GEMFE 2022) Pp. 2022. p. 64–72.
23. Araujo J, Sica P, Costa C, Márquez MC. Enzymatic hydrolysis of fish waste as an alternative to produce high value-added products. Waste and Biomass Valorization. 2021;12:847–55.
24. Jackson A, Newton RW. Project to model the use of fisheries by-products in the production of marine ingredients with special reference to omega-3 fatty acids EPA and DHA. A Rep by IFFO Univ Stirling. 2016;12.
25. Intini C, Hodgkinson T, Casey SM, Gleeson JP, O'Brien FJ. Highly porous type II collagen-containing scaffolds for enhanced cartilage repair with reduced hypertrophic cartilage formation. Bioengineering. 2022;9(6):232.
26. Shi S, Wang L, Song C, Yao L, Xiao J. Recent progresses of collagen dressings for chronic skin wound healing. Collagen and Leather. 2023;5(1):31.
27. Ge B, Wang H, Li J, Liu H, Yin Y, Zhang N, et al. Comprehensive assessment of Nile tilapia skin (Oreochromis niloticus) collagen hydrogels for wound dressings. Mar Drugs. 2020;18(4):178.
28. Kaziród K, Hunek A, Zapała M, Wiśniewska-Skomra J, Chmielarz K, Tylutka K, et al. Collagen supplementation-does it bring real benefits? Qual Sport. 2023;13(1):88–107.
29. Noorzai S, Verbeek CJR, Lay MC, Swan J. Collagen extraction from various waste bovine hide sources. Waste and Biomass Valorization. 2020;11(11):5687–98.
30. Lim YS, Ok YJ, Hwang SY, Kwak JY, Yoon S. Marine collagen as a promising biomaterial for biomedical applications. Mar Drugs. 2019;17(8):467.
31. Mo WY, Man YB, Wong MH. Use of food waste, fish waste and food processing waste for China's aquaculture industry: Needs and challenge. Sci Total Environ. 2018;613:635–43.
32. Liu S, Lau CS, Liang K, Wen F, Teoh SH. Marine collagen scaffolds in tissue engineering. Curr Opin Biotechnol. 2022;74:92–103.
33. Puja N, Rout RK, Kumar TD, Joshi J, Sivaranjani S. Technologies for management of fish waste & value addition. Food Humanit. 2024;100228.
34. Masilan K, Neethiselvan N, Shakila RJ, Karthy A, Arisekar U, Muralidharan N, et al. Development of fish gelatin-based artificial fish baits incorporating bioattractants from seafood processing waste. J Indian Chem Soc. 2022;99(3):100376.
35. Eletta OAA, Ighalo JO. A review of fish scales as a source of biosorbent for the removal of pollutants from industrial effluents. J Res Inf Civ Eng. 2019;16(1):2479–510.
36. Bamukyaye S, Wanasolo W. Performance of egg-shell and fish-scale as adsorbent materials for chromium (VI) removal from effluents of tannery industries in Eastern Uganda. 2017;
37. Ribeiro C, Scheufele FB, Espinoza-Quinones FR, Módenes AN, Vieira MGA, Kroumov AD, et al. A comprehensive evaluation of heavy metals removal from battery industry wastewaters by applying bio-residue, mineral and commercial adsorbent materials. J Mater Sci. 2018;53(11):7976–95.

an d Agric Organ (FAO), Rome, Italy. 2020;
3. Shadidi B, Najafi G, Zolfigol MA. A review of the existing potentials in biodiesel production in Iran. Sustainability. 2022;14(6):3284.
4. Soltani M, Yousefzadi M, Amrollahi Biuki N, Keshavarz M, Mirzaalian Dastjerdi A. Application potential of fish waste in improving compost quality. Q Sci J Appl Biol. 2024;37:46–54.
5. Seifzadeh M. Value Added Products Production From Fish Skin, a Review. Journal. 2025;1066:1–11.
6. امیری, عالیمقام, سلطانی, افشین, زند, اسکندر. برآورد میزان تلفات و ضایعات پس از برداشت برای محصولات کشاورزی در ایران. پژوهش‌های تولید گیاهی. ۲۰۲۴;
7. Ravanipour M, Bagherzadeh R, Mahvi AH. Fish and shrimp waste management at household and market in Bushehr, Iran. J Mater cycles waste Manag. 2021;23:1394–403.
8. Coppola D, Lauritano C, Palma Esposito F, Riccio G, Rizzo C, de Pascale D. Fish waste: From problem to valuable resource. Mar Drugs. 2021;19(2):116.
9. Yadav A. Fisheries waste a source of valuable resources for sustainable development. Food Process Preserv Technol. 2024;2:122–37.
10. Sumithra TG, Amala P V. Fish waste management: turning fish waste into healthy fertilizer. Train Manual-Aquaculture Work. 2020;131–40.
11. Campanati C, Willer D, Schubert J, Aldridge DC. Sustainable intensification of aquaculture through nutrient recycling and circular economies: more fish, less waste, blue growth. Rev Fish Sci Aquac. 2022;30(2):143–69.
12. Ramakrishnan V V, Ghaly AE, Brooks MS, Budge SM. Extraction of proteins from mackerel fish processing waste using alcalase enzyme. Bioprocess Biotech. 2013;3(2):2–10.
13. Karkal SS, Kudre TG. Valorization of fish discards for the sustainable production of renewable fuels. J Clean Prod. 2020;275:122985.
14. Fadhil AB, Al-Tikrity ETB, Albadree MA. Biodiesel production from mixed non-edible oils, castor seed oil and waste fish oil. Fuel. 2017;210:721–8.
15. Xia FLW, Supri S, Djamaludin H, Nurdiani R, Seng LL, Yin KW, et al. Turning waste into value: Extraction and effective valorization strategies of seafood by-products. Waste Manag Bull. 2024;2(3):84–100.
16. Halim NRA, Yusof HM, Sarbon NM. Functional and bioactive properties of fish protein hydolysates and peptides: A comprehensive review. Trends Food Sci Technol. 2016;51:24–33.
17. Hopkins DT, Berrue F, Khiari Z, Hawboldt KA. Valorization of fisheries by-products via enzymatic protein hydrolysis: A review of operating conditions, process design, and future trends. Process Biochem. 2025;149:306–20.
18. Sahena F, Zaidul ISM, Jinap S, Karim AA, Abbas KA, Norulaini NAN, et al. Application of supercritical CO2 in lipid extraction–A review. J Food Eng. 2009;95(2):240–53.
19. Heidari-Maleni A, Gundoshmian TM, Pakravan-Charvadeh MR, Flora C. Life cycle assessment of biodiesel production from fish waste oil. Environ Challenges. 2024;14:100850.
20. Ayala-Barajas D, González-Vélez V, Vélez-Tirado M, Aguilar-Pliego J. Hydroxyapatite extraction from fish scales of Tilapia. In: 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). IEEE;

55 Shavandi, A., et al. Extraction of collagen and protein from fish waste using ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis Process Biochemistry. (2019); 80, 198–206

56. Lafarga, T., & Hayes, M. Bioactive peptides from fish waste: A review. Trends in Food Science & Technology . (2017); 64, 44–54

57. Cooney R, de Sousa DB, Fernández-Ríos A, Mellett S, Rowan N, Morse AP, et al. A circular economy framework for seafood waste valorisation to meet challenges and opportunities for intensive production and sustainability. J Clean Prod. 2023;392:136283.

38. Marrakchi F, Auta M, Khanday WA, Hameed BH. High-surface-area and nitrogen-rich mesoporous carbon material from fishery waste for effective adsorption of methylene blue. Powder Technol. 2017;321:428–34.

39. Vieira EFS, Cestari AR, Carvalho WA, dos S. Oliveira C, Chagas RA. The use of freshwater fish scale of the species Leporinus elongatus as adsorbent for anionic dyes: An isothermal calorimetric study. J Therm Anal Calorim. 2012;109(3):1407–12.

40. Venugopal V. Enzymes from seafood processing waste and their applications in seafood processing. Adv Food Nutr Res. 2016;78:47–69.

41. Abbas SH, Ismail IM, Mostafa TM, Sulaymon AH. Biosorption of heavy metals: a review. J Chem Sci Technol. 2014;3(4):74–102.

42. Qin D, Bi S, You X, Wang M, Cong X, Yuan C, et al. Development and application of fish scale wastes as versatile natural biomaterials. Chem Eng J. 2022;428:131102.

43. Damian G, Varvara S. Assessment of Cyprinus carpio Scales as a Low-Cost and Effective Biosorbent for the Removal of Heavy Metals from the Acidic Mine Drainage Generated at Rosia Montana Gold Mine (Romania). Water. 2022;14(22):3734.

44. Preethi A, Bellare JR. Tailoring scaffolds for orthopedic application with anti-microbial properties: Current scenario and future prospects. Front Mater. 2021;7:594686.

45. Zhang K, Zhou Y, Xiao C, Zhao W, Wu H, Tang J, et al. Application of hydroxyapatite nanoparticles in tumor-associated bone segmental defect. Sci Adv. 2019;5(8):eaax6946.

46. Fiume E, Magnaterra G, Rahdar A, Verné E, Baino F. Hydroxyapatite for biomedical applications: A short overview. Ceramics. 2021;4(4):542–63.

47. Lesbani A, Sitompul SOC, Mohadi R, Hidayati N. Characterization and utilization of calcium oxide (CaO) thermally decomposed from fish bones as a catalyst in the production of biodiesel from waste cooking oil. Makara J Technol. 2016;20(3):3.

48. Champasri C, Phetlum S, Pornchoo C. Diverse activities and biochemical properties of amylase and proteases from six freshwater fish species. Sci Rep. 2021;11(1):5727.

49. Porter JL, Rusli RA, Ollis DL. Directed evolution of enzymes for industrial biocatalysis. ChemBioChem. 2016;17(3):197–203.

50. Radziemska M, Vaverková MD, Adamcová D, Brtnický M, Mazur Z. Valorization of fish waste compost as a fertilizer for agricultural use. Waste and Biomass Valorization. 2019;10:2537–45.

51. Nithya G, Suresh R. Nutritive Value of Fish Waste Silage Meal. Arch Curr Res Int. 2025;25(7):247–55.

52. Güllü K, Güzel S, Tezel R. Producing silage from the industrial waste of fisheries. 2015;

53. Lv S, Hu L, Xia C, Cabrera MB, Guo Y, Liu C, et al. Recycling fish scale powder in improving the performance of asphalt: A sustainable utilization of fish scale waste in asphalt. J Clean Prod. 2021;288:125682.

54. Yusoff, M. A., et al. Life cycle assessment and techno-economic analysis of seafood waste valorization pathways. Journal of Cleaner Production. (2024); 421, 140623