University of Guilan with collaboration of Iranian Aquaculture Society

Aquatic Animals Nutrition

Vol. 11, No. 4, 2026, pages: 49-70
DOI: 10.22124/janb.2026.34537.1314

REVIEW PAPER **OPEN ACCESS**

Alternative protein sources as fishmeal replacements and their physiological limitations in shrimp feed

Ebrahim Sotoudeh*, Leila Khalili
Department of Fisheries, Faculty of Nano and Bio Science and Technology, Persian Gulf University, Bushehr, Bushehr, Iran

Received 01 November 2025 Revised 14 December 2025 Accepted 16 December 2025 Published online 01 October 2026

KEYWORDS
Fishmeal replacement
Alternative protein source
Penaeus vannamei
Shrimp nutrition
Anti-nutritional factors
Essential amino acid balance

ABSTRACT

Introduction: The global aquaculture sector relies heavily on the sustainable expansion of shrimp farming. However, the industry's long-term sustainability is threatened by its dependence on fishmeal (FM), an increasingly expensive and ecologically limited finite resource capped at an annual global production of approximately five million tons. Rising market prices, combined with climate-driven fluctuations and inter-industry competition, expose shrimp production to significant economic risks. While substituting FM with alternative protein sources is essential, high inclusion levels of alternative ingredients frequently induce metabolic, physiological, and digestive dysfunctions in shrimp. This review systematically evaluates recent scientific advances regarding the nutritional efficacy, physiological limitations, and application potentials of major alternative protein categories to establish sustainable feed formulation strategies for shrimp.

Materials and methods: A systematic review of peer-reviewed literature was conducted using major scientific databases. Seven alternative protein categories in shrimp feeds were evaluated: plant protein concentrates, insect meals, single-cell proteins (SCPs), terrestrial animal by-products, fishery waste/hydrolysates, microalgae, and macroalgae.

Results and discussion: Each evaluated protein family presented specific advantages and biological bottlenecks:

Plant concentrates and glutens: High protein density, but levels above 15–20% FM replacement trigger gut inflammation and growth retardation due to anti-nutritional factors (ANFs) and essential amino acid deficiencies.

Insect meals and SCPs: Rich in bioactive compounds (taurine, chitin, nucleotides) that enhance immunity and gut microbiota, but inclusion is capped by chitin digestibility, high nucleic acid content, or fatty acid imbalances.

Animal by-products and fishery hydrolysates: Cost-effective and ANF-free; hydrolysates upregulate mTOR signaling and improve palatability, though LC-PUFA deficiencies remain a limiting factor.
Algae: Serve primarily as functional additives boosting antioxidant capacity and immunity rather than primary protein sources. Crucially, no single alternative source can completely replace FM without causing physiological trade-offs.
Conclusions: Relying on a single alternative ingredient for complete fishmeal replacement in shrimp feeds is physiologically unviable due to shared biological bottlenecks, including amino acid imbalances, ANF toxicity, LC-PUFA deficiencies, and reduced palatability. To overcome these metabolic barriers, future aquafeed formulations must integrate three synergistic strategies: (1) advanced biotechnological interventions, such as microbial fermentation and enzymatic hydrolysis, to neutralize ANFs and enhance nutrient bioavailability; (2) a multi-protein formulation approach combining plant, terrestrial animal, microbial, and marine waste proteins; and (3) targeted supplementation with functional feed additives (such as crystalline amino acids, bile acids, and immunostimulants) to mitigate lingering metabolic and digestive stress.

*Corresponding author: e.sotoudeh@pgu.ac.ir

دانشگاه گیلان با مشارکت انجمن آبزی‌پروری ایران

تغذیه آبزیان

سال یازدهم، شماره چهارم، دی ۱۴۰۴، صفحات ۷۰-۴۹

DOI: 10.22124/janb.2026.34537.1314

"مقاله مروری"

منابع پروتئینی جایگزین پودر ماهی و محدودیت‌های فیزیولوژیک آنها در خوراک میگو

ابراهیم ستوده*، لیلا خلیلی

گروه شیلات، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، بوشهر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹

چکیده

توسعه پایدار صنعت پرورش میگو به‌شدت با چالش تأمین پودر ماهی، به‌عنوان گران‌ترین و محدودترین منبع پروتئینی خوراک، گره خورده است. اشباع عرضه جهانی پودر ماهی در محدوده پنج میلیون تن در سال، همراه با افزایش مستمر قیمت و رقابت فزاینده دیگر صنایع، سودآوری مزارع پرورش میگو را با خطرات اقتصادی جدی مواجه ساخته است. هدف این مقاله مروری، بررسی نظام‌مند جدیدترین یافته‌های علمی پیرامون ارزش تغذیه‌ای، مزایا و محدودیت‌های فیزیولوژیک طیف گسترده‌ای از جایگزین‌های پروتئینی شامل کنجاله سویا، گلوتن ذرت و گندم، پودر حشرات، پروتئین‌های تک‌یاخته‌ای، فرآورده‌های جانبی دامی خشکی‌زی، ضایعات شیلاتی، و ریز/درشت جلبک‌ها است. شواهد نشان می‌دهد اگرچه هر یک از این منابع می‌تواند بخشی از پودر ماهی را بدون افت عملکرد رشد جایگزین کند، اما چالش‌های زیستی مشترک مانند عدم تعادل پروفایل اسیدهای آمینه (به‌ویژه لایزین، و متیونین)، حضور فاکتورهای ضدتغذیه‌ای، فقر اسیدهای چرب غیراشباع بلندزنجیره (EPA و DHA) و افت خوش‌خوراکی، سقف جایگزینی هر منبع را به‌تنهایی محدود می‌کند. نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که تکیه بر یک منبع پروتئینی واحد برای حذف کامل پودر ماهی، رویکردی ناکارآمد است. در مقابل، ادغام فرآیندهای پیشرفته زیست‌فناوری (مانند تخمیر میکروبی و هیدرولیز آنزیمی) با اتخاذ راهبرد فرمول‌نویسی چندپروتئینی و همچنین به‌کارگیری افزودنی‌های عملکردی کارآمدترین مسیر برای دستیابی به خوراک‌های پایدار، اقتصادی و عاری از پودر ماهی در صنعت امروزی آبزی‌پروری به شمار می‌رود.

کلمات کلیدی

جایگزینی پودر ماهی

منابع پروتئینی جایگزین

میگوی پاسفید

تغذیه میگو

عوامل ضدتغذیه‌ای

توازن اسیدهای آمینه ضروری

نویسنده مسئول: e.sotoudeh@pgu.ac.ir

مقدمه

صنعت آبزی‌پروری در سال ۲۰۲۴ میلادی جایگاه خود را به عنوان یکی از حیاتی‌ترین بخش‌های تأمین امنیت غذایی جهان تثبیت کرده است. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد برای نخستین بار در تاریخ، میزان تولید جانوران آبزی در بخش آبزی‌پروری با ۱۰۳ میلیون تن (٪۵۳ از کل تولید) از میزان صید (۹۱ میلیون تن) پیشی گرفته است (FAO, 2026). در این میان، سخت پوستان نقشی راهبردی در تجارت بین‌المللی آبزیان ایفا می‌کنند. بر اساس اعلام فائو، تولید جهانی میگوهای پرورشی دریایی در سال ۲۰۲۴ به حدود ۸/۳۶ میلیون تن رسید که از این میزان، حدود ۷/۷ میلیون تن مربوط به میگوی پاسفید (*Penaeus vannamei*) بوده است. این گونه با اختصاص سهمی معادل ٪۸۷/۵ از کل تولید میگوهای دریایی و حدود ٪۵/۷ از کل تولیدات آبزی‌پروری جانوری جهان، جایگاه خود را به عنوان پیشران اصلی صنعت پرورش سخت‌پوستان تثبیت کرده است.

با وجود این رشد چشم‌گیر، توسعه پایدار این صنعت به شدت با چالش تأمین پودر ماهی به عنوان اصلی‌ترین و گران‌ترین منبع پروتئین در خوراک‌های تجاری گره خورده است. در حالی که تقاضا برای تولید خوراک آبزیان با سرعتی بی‌سابقه در حال افزایش است، عرضه جهانی پودر ماهی طی دهه‌های اخیر به دلیل بهره‌برداری بیش از حد از ذخایر وحشی و پدیده‌های اقلیمی مانند ال‌نینو، در محدوده ثابت پنج میلیون تن در سال اشباع شده است (Chen, 2024; FAO, 2026). همچنین، این محدودیت در عرضه صید جهانی در کنار رقابت شدید دیگر بخش‌ها (مانند صنایع دارویی و مکمل‌های انسانی) برای این منبع محدود، منجر به نوسانات شدید و افزایش مستمر قیمت‌ها شده است (Hossain et al. 2023; Chen et al. 2024).

با وجود ظرفیت بالای منابع پروتئین گیاهی برای کاهش وابستگی به منابع دریایی، جایگزینی پودر ماهی با این اقلام به‌ویژه کنجاله سویا با محدودیت‌های زیستی جدی روبرو است (Chen et al. 2024). وجود طیف گسترده‌ای از عوامل ضدتغذیه‌ای[1] یکی از اصلی‌ترین موانع استفاده حداکثری از سویا در خوراک‌های فاقد پودر ماهی است (Akpoilih et al. 2024). برای نمونه، اسید فیتیک با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با عناصر معدنی ضروری مانند فسفر، کلسیم، روی و آهن، هم زیست‌فراهمی این عناصر را کاهش می‌دهد و هم با افت قابلیت هضم کل خوراک، ضریب تبدیل غذایی و رشد بهینه را مختل می‌کند. علاوه بر این بر چالش‌های بیوشیمیایی، ترکیبات ضدتغذیه‌ای موجود در سویا (از جمله ساپونین‌ها) محرک اصلی بروز التهاب روده‌ای هستند که با افزایش معنی‌دار بیان ژن‌های پیش‌التهابی مانند اینترلوکین ۱-بتا، اینترلوکین ۸ و فاکتور نکروز توموری آلفا همراه است. این پاسخ‌های التهابی مشابه که پیش‌تر در دیگر گونه‌های آبزی از جمله شانک زردباله (*Acanthopagrus latus*)، نیز گزارش شده است (Sotoudeh et al. 2020)، از طریق القای آپوپتوز در یاخته‌های بافت پوششی و کاهش تولید موسین، سد دفاعی مخاطی روده را تخریب کرده و در نهایت، به تضعیف دستگاه ایمنی ذاتی میگو و کاهش بازدهی جذب مواد مغذی می‌انجامد. افزون بر چالش‌های آنزیمی و التهابی، وجود پلی‌ساکاریدهای غیرنشاسته‌ای مانند سلولز و زایلان نیز محدودیت فیزیکی دیگری در منابع گیاهی است. از طرفی، از آنجا که میگو فاقد آنزیم‌های درون‌زا برای تجزیه این ترکیبات است، حضور آنها موجب افزایش ویسکوزیته (چسبندگی) محتویات روده شده و با ایجاد یک سد فیزیکی، از تماس مؤثر آنزیم‌های گوارشی با سوبسترا جلوگیری کرده و سرعت انتشار و جذب مواد مغذی را کاهش می‌دهد (Chen et al. 2024). در مجموع، این عوامل (نقص در پروفایل اسیدآمینه، حضور فاکتورهای ضدتغذیه‌ای و افزایش ویسکوزیته روده) در سطوح بالای جایگزینی پودر ماهی با ترکیبات گیاهی به افت ضریب تبدیل غذایی و توقف رشد منجر می‌شود، امری که ضرورت استفاده از افزودنی‌های عملکردی را بیش از پیش نمایان می‌کند (Chen et al. 2024).

با توجه به چالش‌های زیستی و اقتصادی یادشده، هدف اصلی این مقاله مروری، بررسی و تحلیل نظام‌مند جدیدترین یافته‌های علمی پیرامون ارزش تغذیه‌ای، مزایا، محدودیت‌های فیزیولوژیک جایگزینی منابع مختلف پروتئین‌های جایگزین شامل منابع گیاهی (کنجاله سویا، گلوتن ذرت و گندم)، پروتئین‌های تک‌یاخته‌ای (SCP[2])، پودر حشرات و فرآورده‌های جانبی دامی خشکی‌زی،

[1] Anti-Nutritional Factors (ANFs)

[2] Single-Cell Protein

ضایعات شیلاتی و ریز/درشت جلبک‌ها در خوراک میگو است.

منابع پروتئینی جایگزین

کنجاله سویا و محصولات فرآوری‌شده آن

در میان منابع پروتئینی گیاهی، کنجاله سویا به دلیل تولید انبوه، قیمت رقابتی، ثبات کیفیت تغذیه‌ای و پروفایل اسید آمینه نسبتاً مطلوب نسبت به دیگر منابع گیاهی، همچنان به عنوان استاندارد طلایی و قابل‌اعتمادترین جایگزین پودر ماهی در خوراک میگو شناخته می‌شود (Chen et al. 2024; Gabriel et al. 2024). همچنین، بهره‌گیری از این منبع پروتئینی پایدار، از نگاه سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، رکنی اساسی در تحقق راهبرد تحول آبی و کاهش فشار بر ذخایر دریایی به شمار می‌رود (FAO, 2026).

با وجود این ظرفیت، استفاده از سطوح بالای سویا با محدودیت‌های زیستی جدی همراه است. حضور طیف گسترده‌ای از فاکتورهای ضدتغذیه‌ای (ANFs) از جمله بازدارنده‌های تریپسین، لکتین‌ها، ساپونین‌ها، اسید فیتیک و پلی‌ساکاریدهای غیرنشاسته‌ای می‌تواند فرآیندهای هضم را مختل کرده و قابلیت هضم پروتئین و جذب مواد معدنی ضروری مانند فسفر، کلسیم و روی را در میگو کاهش دهد (Huang et al. 2017; Abd El-Naby et al. 2024; Chen et al. 2024; Hasanthi et al. 2025). تغذیه طولانی‌مدت (۱۲ هفته‌ای) با سطوح بالای سویا، فعالیت آنزیم‌های ضداکسایشی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را کاهش داده و سطح مالون‌دی‌آلدهید[1] را به عنوان شاخص پراکسیداسیون چربی افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده القای تنش اکسیداتیو است (Abd El-Naby et al. 2024). افزون بر این، کنجاله سویا برخلاف پودر ماهی، فاقد کلسترول و اسیدهای چرب غیراشباع بلند زنجیره EPA و DHA است که برای حفظ هموستازی غشای یاخته‌ای و رشد بهینه میگو ضروری هستند (Soares et al. 2015).

علاوه بر چالش‌های ناشی از فاکتورهای ضدتغذیه‌ای، سویا در مقایسه با پودر ماهی از تراز اسیدآمینه نامتعادلی برخوردار است، به طوری که کمبود اسیدهای آمینه گوگرددار (متیونین و سیستئین) و لایزین منبع پروتئینی (Dai et al. 2025) و تائورین- ترکیبی حیاتی برای رشد و تنظیم اسمزی میگو- در خوراک‌های مبتنی بر سویا (Macusi et al. 2023) در سطح مولکولی نیز اثرات منفی قابل‌توجهی بر جا می‌گذارند. Xie و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده‌اند که کاهش پودر ماهی به کمتر از ۱۵٪ و جایگزینی آن با پروتئین گیاهی مانند سویا، در میگوهای جوان *P. vannamei* تنش شبکه اندوپلاسمی را بر می‌انگیزد که با اختلال در سوخت‌وساز فسفولیپیدها و کاهش سیالیت غشای یاخته‌ای همراه است. همچنین، Zhao و همکاران (۲۰۲۵) دریافتند که خوراک‌های حاوی سطوح بالای پروتئین گیاهی، از طریق کاهش فسفوریلاسیون S6K و فعال‌سازی مسیر تنش یاخته‌ای eIF2α، ساخت پروتئین را در مسیر پیام‌رسانی mTOR مختل کرده و در نهایت به توقف رشد میگو منجر می‌شوند. شواهد بین‌گونه‌ای نیز مؤید کاربرد گسترده این راهبرد است. در *Macrobrachium rosenbergii* جایگزینی کنجاله سویا و محصولات جانبی تقطیر با پودر ماهی بدون کاهش بقا یا رشد در استخرهای پرورشی گزارش شده است (Tidwell et al. 1993)، در حالی که استفاده از کنجاله باقلا (*Vigna unguiculata*) نیز ظرفیت جایگزینی پودر ماهی را در خوراک عملی این گونه تأیید کرده است (Aya et al. 2015) (جدول ۱).

گلوتن ذرت و گندم

گلوتن ذرت و گلوتن گندم به دلیل دارا بودن مقادیر بسیار بالای پروتئین خام و قابلیت هضم مناسب، از گزینه‌های راهبردی برای کاهش سهم پودر ماهی در خوراک میگو به شمار می‌روند (Macusi et al. 2023; Chen et al. 2024; Gabriel et al. 2024). گلوتن ذرت که محصول جانبی فرآیند تولید نشاسته ذرت است، حاوی حدود ۶۰ تا ۶۴٪ پروتئین خام بوده و به دلیل داشتن سطوح پایین فیبر و فاکتورهای ضدتغذیه‌ای به‌مراتب کمتر نسبت به کنجاله سویا، غنی از ویتامین‌های گروه B و E است (Ye et al. 2011; Lin et al. 2023; Gabriel et al. 2024). افزون بر این، حضور رنگدانه‌های زانتوفیل در این ترکیب می‌تواند بر رنگ بافت میگو نیز اثرگذار باشد (Ye et al. 2011; Gabriel et al. 2024). در مقابل، گلوتن گندم با دارا بودن بیش از ۷۰ تا ۸۰٪ پروتئین، یکی از غنی‌ترین

[1] Malondialdehyde

منابع پروتئینی گیاهی محسوب می‌شود که علاوه بر ارزش تغذیه‌ای بالا، به دلیل خاصیت کشسانی و چسبندگی منحصربه‌فرد خود، نقشی فناورانه در بهبود کیفیت فیزیکی خوراک اکسترودشده ایفا می‌کند (Qiu and Davis, 2017; Gabriel et al. 2024).

با وجود این، پروفایل اسیدهای آمینه این دو منبع همچنان چالش‌برانگیز است. گلوتن ذرت اگرچه از متیونین و لوسین نسبتاً غنی است، از نظر لایزین به‌شدت فقیر است؛ گلوتن گندم نیز با کمبود توأمان لایزین و آرژینین روبرو است، امری که مکمل‌سازی این خوراک‌ها با اسیدهای آمینه کریستاله را ضروری می‌سازد (Ray et al. 2021; Macusi et al. 2023; Gabriel et al. 2024; Zhao et al. 2025). علاوه بر این، نقص اسیدهای آمینه، هر دو منبع فاقد ترکیبات محرک تغذیه‌ای موجود در پودر ماهی هستند. همین امر می‌تواند در سطوح بالای جایگزینی، از خوش‌خوراکی خوراک کاسته و به کاهش مصرف خوراک میگو منجر شود (Ye et al. 2011; Lin et al. 2023; Chen et al. 2024). Lin و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند، جایگزینی پودر ماهی با گلوتن ذرت تا سطح ۲۷/۴۷٪ (در خوراک‌های حاوی ۳۰٪ پودر ماهی) بدون اثر منفی بر رشد امکان‌پذیر است (جدول ۱)، اما فراتر از این آستانه، فعالیت آنزیم‌های پروتئاز کاهش یافته و قابلیت هضم پروتئین و چربی به‌طور معنی‌دار افت می‌کند؛ پدیده‌ای که همین پژوهشگران آن را عموماً به خوش‌خوراکی پایین‌تر گلوتن نسبت به پودر ماهی و فقدان فاکتورهای ناشناخته محرک رشد دریایی نسبت می‌دهند.

از سوی دیگر، باید توجه داشت که گلوتن ذرت حاوی سطوح قابل‌توجهی فیبر و اسید فیتیک است که می‌تواند زیست‌فراهمی فسفر و عناصر معدنی دوظرفیتی را کاهش دهد. از این‌رو، بهره‌گیری از آنزیم‌های برون‌زا مانند فیتاز در کنار این منبع پروتئینی ضروری به نظر می‌رسد (Ye et al. 2011; Akpoilih et al. 2024).

افزون بر جنبه‌های تغذیه‌ای، گلوتن گندم نقشی حیاتی در کیفیت فیزیکی خوراک میگو ایفا می‌کند. برخلاف ماهیان، میگوها عادت تغذیه‌ای آهسته و مکرر دارند و پلت خوراک باید بدون متلاشی‌شدن، ساعت‌ها در آب استخر باقی بماند (Chowdhury et al. 2021). Casillas Hernández و همکاران (۲۰۲۳) و Lin و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که گلوتن گندم به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک و توانایی تشکیل شبکه پروتئینی در حین فرآیند پلت‌سازی، به‌عنوان یک اتصال‌دهنده طبیعی و قدرتمند عمل کرده و شاخص پایداری خوراک در آب را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. بر همین اساس، Casillas-Hernández و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کرده‌اند که گنجاندن گلوتن گندم در فرمول‌نویسی خوراک‌های کم‌پودر ماهی می‌تواند به نرخ پایداری فیزیکی بین ۰/۹۴ تا ۰/۹۶ دست یابد که برای پیشگیری از هدررفت مواد مغذی محلول و حفظ کیفیت آب استخر اهمیت به‌سزایی دارد. این ویژگی فیزیکی به‌ویژه در خوراک‌های حاوی افزودنی‌های گران‌قیمت یا اسیدهای آمینه بلورین، نقشی کلیدی در تضمین دریافت دوز مؤثر توسط میگو ایفا می‌کند (Chowdhury et al. 2021).

در مجموع، گلوتن ذرت و گندم به دلیل داشتن پروتئین بالا، فضای بیشتری را در فرمول‌نویسی خوراک برای گنجاندن دیگر افزودنی‌های عملکردی فراهم می‌آورند و گلوتن گندم به‌طور همزمان نقشی دوگانه در تأمین پروتئین با کیفیت و ارتقای استحکام ساختاری خوراک ایفا می‌کند (Lin et al. 2023). با وجود این، همان‌گونه که Chen و همکاران (۲۰۲۴) و Gabriel و همکاران (۲۰۲۴) تأکید می‌کنند، موفقیت این منابع در خوراک‌های فاقد پودر ماهی به‌طور کامل به مدیریت دقیق تراز اسیدهای آمینه و بهره‌گیری همزمان از افزودنی‌های عملکردی جبران‌کننده وابسته است.

پودر حشرات

در جستجوی منابع پروتئینی پایدار و فاقد رقابت با زنجیره غذایی انسان، پودر حشرات به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین جایگزین‌های پودر ماهی در صنعت تغذیه میگو مطرح شده است (Gasco et al. 2020; Sharifinia et al. 2023; Chen et al. 2024). توانایی لارو حشرات در تبدیل سریع ضایعات آلی کم‌ارزش به پروتئینی باکیفیت، این منبع را به گزینه‌ای کلیدی در چارچوب اقتصاد چرخشی و راهبرد تحول آبی تبدیل کرده است (Shin and Lee, 2021; Chen et al. 2024; Gabriel et al. 2024). حشرات علاوه بر محتوای پروتئین خام قابل توجه (در محدوده ۴۰ تا ۸۲٪ ماده خشک بسته به گونه)، منبعی غنی از اسیدهای آمینه، مواد معدنی و ویتامین‌ها به شمار می‌روند (Gabriel et al.

2024; Zamani and Jafari, 2025). در میان گونه‌های گوناگون، لارو مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*) و سوسک زرد آرد (*Tenebrio molitor*) بیشترین توجه پژوهشی را در تغذیه میگوی پاسفید به خود اختصاص داده‌اند (Chen et al. 2024).

یکی از ویژگی‌های ممتاز پودر حشرات، حضور ترکیبات زیست‌فعال مانند کیتین در اسکلت خارجی آن‌هاست؛ اگرچه سطوح بالای کیتین می‌تواند قابلیت هضم مواد مغذی را کاهش دهد، دوزهای پایین آن (کمتر از ۵٪) به عنوان یک پری‌بیوتیک عمل کرده و با بهبود ترکیب میکروبیوتای روده و تحریک بیان ژن‌های مرتبط با پاسخ‌های دفاعی، دستگاه ایمنی ذاتی میگو را تقویت می‌کند (Shin and Lee, 2021; Sharifinia et al. 2023; Chen et al. 2024). افزون بر این، پودر حشرات نسبت به منابع پروتئینی گیاهی از غنای بیشتری در اسیدهای آمینه تائورین و هیدروکسی‌پرولین برخوردار است که برای رشد بهینه و تنظیم اسمزی میگو ضروری‌اند (Shin and Lee, 2021). بر اساس یافته‌های Sharifinia و همکاران (۲۰۲۳) جایگزینی پودر ماهی با سوسک زرد آرد، تا سطح ۳۰٪، منجر به افزایش معنی‌دار وزن بدن، بهبود ضریب تبدیل غذایی و تقویت فعالیت آنزیم‌های ضد اکسایشی مانند سوپراکسید دیسموتاز و لایزوزیم در میگوی پاسفید می‌شود (جدول ۱). در مورد مگس سرباز سیاه نیز، Zamani و Jafari (۲۰۲۵) نشان داده‌اند که جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه تا سطح ۵۰٪ در خوراک پست‌لاروهای میگوی پاسفید، نه تنها رشد را به‌طور معنی‌دار افزایش می‌دهد، بلکه فعالیت آنزیم‌های گوارشی مانند تریپسین و لیپاز را در هپاتوپانکراس و روده ارتقا می‌بخشد (جدول ۱). با وجود این، به گفته همین محققان، جایگزینی کامل (۱۰۰٪) در این پژوهش به افت عملکرد رشد و کاهش فعالیت آنزیمی منجر شد که نشان‌دهنده محدودیت برای گنجاندن این ماده در خوراک پست‌لاروهاست.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح بهینه جایگزینی ممکن است به مرحله رشد نیز وابسته باشد. Nunes و همکاران (۲۰۲۳) در مرحله نوزادگاهی و در شرایط پرورش با تراکم بالا، نشان داده‌اند که پودر لارو مگس سرباز سیاه می‌تواند تا ۱۰۰٪ پودر ماهی را بدون افت عملکرد رشد یا تغییر در ضریب تبدیل غذایی جایگزین کند (جدول ۱). در میگوهای جوان پاسفید نیز، Macusi و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کرده‌اند که جایگزینی تا سطح ۵۰٪ با بهبود شاخص‌های ضداکسایشی و عملکردهای گوارشی همراه است. با وجود این، Chen و همکاران (۲۰۲۱) هشدار می‌دهند که استفاده از سطوح بسیار بالا (بیش از ۳۰٪ از کل پروتئین خوراک) ممکن است به کاهش معنی‌دار نرخ رشد و القای مرگ یاخته‌ای در بافت روده منجر شود؛ پدیده‌ای که این پژوهشگران آن را عموماً ناشی از عدم تعادل اسیدهای چرب یا دشواری هضم مقادیر بالای کیتین می‌دانند.

به‌رغم این مزایا، استفاده گسترده از پودر حشرات با چند محدودیت تغذیه‌ای همراه است. معمولاً پودر حشرات کامل حاوی سطوح بالایی از اسیدهای چرب اشباع (مانند اسید لوریک در مگس سرباز سیاه) است که می‌تواند پروفایل اسیدهای چرب خوراک را تغییر داده و سوخت‌وساز چربی میگو را مختل کند (Chen et al. 2024). همچنین، نقص در اسیدهای آمینه ضروری مانند لایزین، متیونین و ترئونین نسبت به پودر ماهی، ضرورت مکمل‌سازی با اسیدهای آمینه عملکردی را دوچندان می‌کند (Chen et al. 2024; Zamani and Jafari, 2025). محدودیت دیگر، محتوای پایین اسیدهای چرب امگا-۳ زنجیره بلند EPA و DHA در بیشتر گونه‌های حشرات است که مکمل‌سازی خوراک‌های حاوی این منابع را با روغن ماهی یا منابع ریزجلبکی الزامی می‌کند (Shin and Lee, 2021).

پروتئین‌های تک‌یاخته‌ای و میکروبی

با افزایش تقاضای جهانی برای پودر ماهی که هم اکنون بخش عمده‌ای از تولید آن در صنعت آبزی‌پروری مصرف می‌شود، پروتئین‌های تک‌یاخته‌ای حاصل از زی‌توده ریزموجوداتی مانند باکتری‌ها، مخمرها، قارچ‌ها و ریزجلبک‌ها به عنوان جایگزین‌هایی پایدار و مقیاس‌پذیر مطرح شده‌اند (Sharif et al. 2021; Buttle et al. 2024). برخلاف منابع پروتئینی گیاهی و جانوری زمینی، مستقل از شرایط اقلیمی و فصلی و با سرعت رشدی بسیار بالاتر تولید می‌شوند و می‌توانند از بسترهای تجدیدپذیر یا حتی گازهای صنعتی مانند متان و دی‌اکسید کربن بهره ببرند (Buttle et al. 2024; Gisbert et al. 2025). محتوای پروتئین خام این محصولات بسته به منشأ میکروبی در دامنه‌ای گسترده (تقریباً ۳۳ تا ۸۱٪ ماده

خشک) قرار می‌گیرد (Gabriel et al. 2024). مزیت محوری SCPها نسبت به دیگر پروتئین‌های جایگزین، غنای آن‌ها در اسیدآمینه‌های ضروری، به‌ویژه لایزین و متیونین است؛ دو اسید آمینه‌ای که معمولاً در پروتئین‌های گیاهی عامل محدودکننده رشد به شمار می‌روند (Chen et al. 2024). افزون بر این، وجود ترکیبات زیست‌فعال مانند اسیدهای نوکلئیک، ویتامین‌های گروه B و پپتیدهای اختصاصی، به بسیاری از محصولات SCPها نقشی دوگانه به‌عنوان منبع پروتئین و در عین حال افزودنی عملکردی می‌بخشد که هم به‌عنوان محرک تغذیه‌ای عمل می‌کند و هم خوش‌خوراکی را بهبود می‌بخشد (Chen et al. 2024).

در بین منابع باکتریایی، آرد حاصل از باکتری‌های متانوتروف، به ویژه *Methylococcus capsulatus* که از اکسایش گاز طبیعی حاصل می‌شود، نتایج بسیار امیدوارکننده‌ای در تغذیه میگوی پاسفید ارائه داده است (Gisbert et al. 2025). همچنین، یافته‌های همین محققان نشان می‌دهد که این منبع پروتئینی می‌تواند تا سقف ۵۰٪ پودر ماهی خوراک را بدون اثر منفی بر عملکرد رشد جایگزین کند و همزمان با افزایش فراوانی باکتری‌های مفید روده مانند ماری‌باکتر[1] که در تجزیه پلی‌ساکاریدهای پیچیده و مهار عوامل بیماری‌زا نقش دارند، میکروبیوتای روده میگوی پاسفید را بهبود بخشد. همسو با این یافته‌ها، Tantikitti و (۲۰۱۴) گزارش کرده‌اند که جایگزینی پودر ماهی با این SCP باکتریایی نه تنها به عملکرد رشد و بقای میگو آسیب نمی‌رساند، بلکه مقاومت لاروها را در برابر چالش با عامل بیماری مرگ زودرس یا ویبریو پاراهمولیتیکوس به‌طور معنی‌دار افزایش می‌دهد؛ اثری که احتمالاً از مسیر تعدیل میکروبیوتای روده و تقویت پاسخ‌های ایمنی ذاتی میزبان اعمال می‌شود.

نمونه دیگری از پروتئین‌های میکروبی، پروتئین حاصل از باکتری *Clostridium autoethanogenum* است که به دلیل محتوای پروتئینی بالا و هضم‌پذیری مطلوب، توان بالقوه قابل‌توجهی برای جایگزینی پودر ماهی از خود نشان داده است (Shi et al. 2023). با وجود این، بر اساس یافته‌های Shi و همکاران (۲۰۲۳)، جایگزینی کامل پودر ماهی با پروتئین این باکتری می‌تواند سوخت‌وساز چربی‌ها و استرول‌ها را در میگو مختل کند؛ مشکلی که با مکمل‌سازی خوراک با اسیدهای صفراوی (به طور خاص اسید چنودئوکسی‌کولیک به میزان ۰/۰۶٪) به‌طور کامل جبران شده و علاوه بر بازگرداندن عملکرد رشد، سلامت کبد-پانکراس نیز بهبود یافته است (جدول ۱).

در کنار منابع باکتریایی، پروتئین‌های حاصل از مخمرها به ویژه مخمر آبجو (*Saccharomyces cerevisiae*) که به دلیل در دسترس بودن در صنایع تخمیری به‌طور گسترده مطالعه شده به دلیل غنای نوکلئوتیدی و محتوای بتا-گلوکان، نقشی فراتر از یک منبع پروتئینی صرف ایفا می‌کنند (Chen et al. 2024; Khanjani et al. 2024). این ترکیبات به‌عنوان محرک ایمنی عمل کرده و می‌توانند اثرات نامطلوب فاکتورهای ضدتغذیه‌ای سویا از جمله التهاب روده ناشی از کنجاله سویا را در خوراک‌های کم‌پودر ماهی جبران کنند (Chen et al. 2024; Gabriel et al. 2024). شواهد نشان می‌دهند که این ترکیبات میکروبی می‌توانند بیان ژن‌های مرتبط با رشد و ایمنی را در سطح مولکولی تنظیم کرده و مقاومت میگو را در برابر بیماری‌هایی مانند ویبریوز افزایش دهند (Sharif et al. 2021; Felix et al. 2023).

با وجود این توان بالقوه چشمگیر، کاربرد گسترده SCPها در خوراک تجاری میگو با محدودیت‌های فنی مهمی روبه‌روست. غلظت بالای اسیدهای نوکلئیک در برخی منابع پروتئین‌های تک‌یاخته‌ای که می‌تواند تا ۱۵٪ وزن خشک را در بر گیرد و همچنین دیواره یاخته‌ای ضخیم در برخی گونه‌های مخمری که هضم‌پذیری پروتئین را کاهش می‌دهد، سطح قابل‌گنجاندن این نهاده‌ها در خوراک را محدود می‌سازد (Sarker, 2023). افزون بر این، مقیاس‌پذیری تولید صنعتی و رقابت قیمتی با منابع پروتئینی گیاهی ارزان‌قیمت همچنان از موانع اصلی پذیرش گسترده پروتئین‌های تک‌یاخته‌ای در مزارع تجاری به شمار می‌رود (Acusi et al. 2023). با وجود این، در مجموع، پروتئین‌های تک‌یاخته‌ای با ظرفیت تبدیل ضایعات صنعتی و گازهای کربنی به پروتئین با کیفیت، یکی از کلیدی‌ترین مسیرها برای دستیابی به خوراک عاری از پودر ماهی در آینده نزدیک محسوب می‌شوند (Buttle et al. 2024; Gisbert et al. 2025).

[1] Maribacter

پودر فرآورده‌های جانبی طیور (PBM)[1]، گوشت و استخوان (MBM)[2] و پودر خون (BM)[3]

پروتئین‌های حاصل از ضایعات کشتارگاه‌های حیوانات خشکی‌زی، شامل پودر جانبی طیور، پودر گوشت و استخوان و پودر خون، به دلیل قیمت پایین، دسترسی‌پذیری گسترده و مشخصات تغذیه‌ای مناسب، از کلیدی‌ترین جایگزین‌های پودر ماهی در خوراک میگوی پاسفید به‌شمار می‌روند (Hossain et al. 2023; López-Ortiz et al. 2023; Chen et al. 2024). افزایش قیمت جهانی پودر ماهی به بیش از ۱۸۰۰ دلار در هر تن، صنعت خوراک آبزیان را به‌شدت به سمت منابع پروتئینی زمینی مانند پودر فرآورده‌های جانبی طیور و پودر فرآورده‌های جانبی گاوی سوق داده است (Macusi et al. 2023). برخلاف منابع پروتئینی گیاهی، این مواد فاقد فاکتورهای ضدتغذیه‌ای بوده و حاوی مقادیر بالایی از پروتئین خام (۵۰ تا ۷۰٪) و مواد معدنی ضروری مانند کلسیم و فسفر هستند (Ye et al. 2011).

از میان انواع پودر طیور، پودر جانبی طیور با درجه غذای حیوانات خانگی به دلیل محتوای خاکستر کمتر و پروتئین بالاتر، از بالاترین قابلیت هضم در میگوی پاسفید برخوردار است. بر اساس یافته‌های Cruz-Suárez و همکاران (۲۰۰۷) این نوع پودر طیور را می‌توان تا سطح ۸۰٪ از پودر ماهی خوراک میگوی پاسفید را بدون کاهش عملکرد رشد جایگزین کرد. با وجود این، استفاده تک‌منبعی و در سطوح بالا از ضایعات کشتارگاهی ممکن است به عدم تعادل اسیدهای آمینه، به‌ویژه نقص در لایزین، متیونین و هیستیدین، منجر شود که در نهایت کاهش سرعت رشد و تضعیف دستگاه ایمنی را در پی دارد (Ye et al. 2011; Chen et al. 2024).

برای غلبه بر این محدودیت، پژوهش‌های اخیر بر رویکرد مخلوط‌های هم‌افزای پروتئینی متمرکز شده‌اند. در مطالعه Ye و همکاران (۲۰۱۱) ترکیبی از پودر گوشت و استخوان، پودر جانبی طیور، پودر خون و گلوتن ذرت (نسبت ۶:۶:۵:۳) توانست به‌طور کامل پودر ماهی را در خوراک میگوی پاسفید جایگزین کند، بدون آنکه عملکرد رشد افت کند (جدول ۱). این رویکرد ترکیبی به جیره‌نویس اجازه می‌دهد که با بهره‌گیری از نقاط قوت هر منبع، خلأهای تغذیه‌ای منابع دیگر را جبران کرده و پروفایل اسیدهای آمینه نهایی را به پودر ماهی نزدیک‌تر کند (Ye et al. 2011).

پودر فرآورده‌های جانبی گاوی نیز به‌عنوان گزینه‌ای بسیار ارزان‌تر مطرح است که می‌تواند هزینه خوراک را به‌شدت کاهش دهد، هرچند که به دلیل نگرانی‌های تاریخی درباره احتمال انتقال بیماری‌های مشترک، تقاضای کمتری نسبت به PBM در بازار داشته است (López-Ortiz et al. 2023). یافته‌های López-Ortiz و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که جایگزینی کامل پودر طیور با پودر گاوی در خوراک‌های فاقد پودر ماهی نه‌تنها تأثیر منفی بر بقا و رشد میگو ندارد، بلکه برخی از فراسنجه‌های بیوشیمیایی خون را نیز بهبود بخشد.

چالش دیگر در استفاده از این منابع، پروفایل اسیدهای چرب آنهاست. معمولاً برخلاف پودر ماهی، ضایعات کشتارگاهی سرشار از اسیدهای چرب اشباع و امگا-۶ بوده و فاقد اسیدهای چرب غیراشباع بلندزنجیر مانند DHA و EPA، کلسترول و فسفولیپیدهایی هستند که برای رشد و سلامت غشایی میگو حیاتی‌اند (Suantika et al. 2018; López-Ortiz et al. 2023). تحقیقات نشان داده‌اند که در صورت عدم تأمین این نیازهای چربی، رشد میگو به‌شدت سرکوب می‌شود. ازاین‌رو، در خوراک‌های حاوی سطوح بالای ضایعات کشتارگاهی، مکمل‌سازی با روغن ماهی، ریزجلبک‌ها یا دیگر افزودنی‌های چربی غنی از اسیدهای چرب غیراشباع بلندزنجیره ضروری است (Suantika et al. 2018). به همین ترتیب، نقص ذاتی این منابع در متیونین و لایزین ایجاب می‌کند که در سطوح بالای جایگزینی، خوراک با اسیدآمینه‌های کریستاله مکمل‌سازی شود. در غیر این صورت، افت عملکرد رشد و به خطر افتادن سلامت میگو محتمل خواهد بود (Casillas-Hernández et al. 2023).

در نهایت، استفاده موفق از هیدرولیزات‌های پروتئینی حاصل از این ضایعات، به‌عنوان افزودنی عملکردی، ممکن است نه‌تنها قابلیت هضم را افزایش دهد، بلکه با برخورداری از خواص ضدباکتریال و ضداکسایشی، سلامت عمومی میگو را در خوراک‌های فاقد پودر ماهی تضمین کند (Chen et al. 2024). به طور کلی، بررسی‌ها نشان می‌دهند که

[1] Poultry By-Product Meal
[2] Meat and Bone Meal
[3] Blood Meal

بهره‌برداری بهینه از ضایعات کشتارگاهی مستلزم رویکردی ترکیبی (استفاده هم‌زمان از چند منبع پروتئینی برای پوشش نقص‌های متقابل اسیدهای آمینه و چربی) است (Ye et al. 2011; Hossain et al. 2023; FAO, 2026).

ضایعات فرآوری و هیدرولیزات‌های پروتئینی محصولات شیلاتی

استفاده از فرآورده‌های جانبی صنعت فرآوری آبزیان شامل سر، امعا و احشا، پوست، استخوان و بازوهای اسکوئید، یکی از راهکارهای راهبردی برای کاهش وابستگی به پودر ماهی در خوراک میگو به‌شمار می‌رود (Gabriel et al. 2024; Hasanthi et al. 2025). بازیافت این ضایعات علاوه بر کاهش هزینه خوراک، با اصول اقتصاد چرخشی فائو برای مدیریت پسماندهای کارخانجات شیلاتی برخلاف منابع پروتئینی گیاهی، این ضایعات منشأ دریایی دارند و از نظر پروفایل اسیدهای آمینه ضروری، اسیدهای چرب غیراشباع بلندزنجیره (EPA و DHA) و مواد معدنی، شباهت بسیار زیادی به پودر ماهی اصلی دارند (Sánchez-Muros et al. 2020).

یکی از مشکلات کاربردی این ضایعات، تولید سیلاژ ماهی از طریق هضم کنترل‌شده ضایعات با اسیدهای آلی یا آنزیم‌هاست که به دلیل هزینه تولید بسیار پایین، گزینه‌ای اقتصادی محسوب می‌شود (Shao et al. 2020). بر اساس یافته‌های Shao و همکاران (۲۰۲۰) جایگزینی پودر ماهی با سیلاژ ماهی در سطوح پایین (تا ۲۵٪) نه تنها عملکرد رشد را حفظ می‌کند، بلکه بیان ژن‌های tor و s6k را به‌طور معنی‌دار افزایش می‌دهد؛ یافته‌ای که فعال‌سازی مسیر پیام‌رسانی mTOR و در نتیجه ارتقای ساخت پروتئین و بهبود نرخ رشد ویژه را تأیید می‌کند. با وجود این، افزایش سطح جایگزینی به ۱۰۰٪ به کاهش فعالیت آنزیم‌های گوارشی مانند تریپسین و افت عملکرد رشد در میگوی پاسفید منجر شده است (Shao et al. 2020).

حالت پیشرفته‌تر بهره‌برداری از این ضایعات، تولید هیدرولیزات‌های پروتئینی ماهی و اسکوئید از طریق هیدرولیز آنزیمی است. این فرآیند زنجیره‌های پروتئینی را به پپتیدهای کوچک و زیست‌فعال تجزیه می‌کند که هم قابلیت هضم فوق‌العاده‌ای دارند و هم به‌عنوان محرک‌های قدرتمند تغذیه‌ای عمل می‌کنند؛ ویژگی‌ای که به‌ویژه در مراحل پست‌لاروی و نوزادی میگو، که دستگاه گوارشی هنوز در حال تکامل است، حیاتی است (Chen et al. 2024; Gabriel et al.2024). برای نمونه، بر اساس یافته‌های Gabriel و همکاران (۲۰۲۴)، افزودن تنها ۱٪ هیدرولیزات اسکوئید به خوراک‌های بر پایه سویا توانسته عملکرد رشد میگوی ببری سیاه (*Penaeus monodon*) را به سطحی معادل خوراک‌های حاوی پودر ماهی برساند (جدول ۱). در میگوی پاسفید نیز، پودر پروتئین هیدرولیزشده ماهی موجب بهبود معنی‌دار رشد، تکامل کبد-پانکراس و روده شده است (Hlordzi et al. 2022)، در حالی که هیدرولیزات حاصل از ضایعات خرچنگ (*Procambarus clarkia*) در خوراک‌های کم‌پودر ماهی، سیگنال‌دهی متابولیک مرتبط با اشتها و ترکیب میکروبیوتای روده را به‌طور مطلوب تعدیل کرده است (Ren et al. 2026).

نقش این ترکیبات به‌عنوان محرک خوراک نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرآورده‌هایی مانند محلول‌های محلول در آب ماهی و هیدرولیزات‌ها، به دلیل غنای طبیعی در تائورین، نوکلئوتیدها و اسیدهای آمینه آزاد، اشتهای میگو را تحریک کرده و مصرف خوراک را در خوراک‌های کم‌پودر ماهی که معمولاً از نظر خوش‌خوراکی ضعیف‌اند، افزایش می‌دهند (Bulbul et al. 2015; He et al. 2022; Roda et al. 2024). به همین ترتیب، عصاره اسکوئید به عنوان تقویت‌کننده خوش‌خوراکی عملکردی، با بهبود ساختار روده و افزایش فعالیت پروتئازهای کبد-لوزالمعده، پذیرش خوراک‌های مبتنی بر پروتئین‌های گیاهی و زمینی را در میگو تسهیل می‌کند (Zhu et al. 2019).

با وجود این مزایا، استفاده از ضایعات شیلاتی با محدودیت‌های فنی و بهداشتی همراه است. ضایعات میگو و دیگر سخت‌پوستان حاوی مقادیر بالایی از خاکستر، کیتین و فلوراید هستند که در سطوح بالا می‌توانند قابلیت هضم دیگر مواد مغذی را کاهش دهند (Sánchez-Muros et al. 2020; Gabriel et al. 2024; Okon et al. 2025). کیفیت این مواد نیز بسته به گونه آبزی، بخش مورد استفاده و شرایط فرآوری (دما و زمان نگهداری) بسیار متغیر است و احتمال آلودگی به عوامل بیماری زا در ضایعات خام و فرآوری‌نشده، ضرورت استانداردسازی

فرآیندهای حرارتی یا آنزیمی را دوچندان می‌کند (Chen et al. 2024; Okon et al. 2025). در مجموع، هیدرولیزات‌ها و سیلاژهای شیلاتی نه یک جایگزین پروتئینی صرف، بلکه افزودنی‌های عملکردی چندمنظوره‌ای هستند که با بهینه‌سازی دقیق سطح گنجاندن در خوراک، نقشی کلیدی در تحقق خوراک‌های عاری از پودر ماهی ایفا می‌کنند (Gabriel et al. 2024; Ren et al. 2026).

ریزجلبک‌ها

ریزجلبک‌ها توان بالقوه بالایی برای حل همزمان بحران پودر ماهی و روغن ماهی دارند (Sarker, 2023). این موجودات تک‌یاخته‌ای منبعی غنی از پروتئین باکیفیت، چربی‌های ضروری، اسیدهای نوکلئیک، ویتامین‌ها، مواد معدنی و ترکیبات زیست‌فعال هستند و می‌توانند هم نقش منبع پروتئینی و هم نقش افزودنی عملکردی را در خوراک میگو ایفا کنند (Chen et al. 2024). محتوای پروتئین خام ریزجلبک‌ها بسته به گونه بسیار متغیر است و در دامنه ۳۳ تا ۸۱٪ ماده خشک قرار می‌گیرد که در بالاترین سطح خود با پودر ماهی با کیفیت رقابت می‌کند (Gabriel et al. 2024).

در میان گونه‌های مختلف، ریزجلبک اسپیرولینا (*Arthrospira platensis*) به‌دلیل نبود دیواره سلولزی سخت و در نتیجه سهولت هضم، بیشترین توجه را در تغذیه میگوی پاسفید به خود جلب کرده است. بر اساس یافته‌های Novriadi و همکاران (۲۰۲۲)، مکمل‌سازی خوراک با پودر اسپیرولینا نه تنها عملکرد رشد را حفظ می‌کند، بلکه با تحریک بیان ژن‌های مرتبط با رشد و ایمنی، مقاومت میگو را در برابر تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد. در همین راستا، Sharawy و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که استفاده از نانوذرات اسپیرولینا در سطوح پایین خوراک می‌تواند کارایی مصرف خوراک و پاسخ‌های ضداکسایشی میگو را به‌طور معنی‌دار بهبود می‌بخشد. یافته مشابهی در میگوی *Neocaridina davidi* نیز ثبت شده است. جایگزینی مستقیم پودر ماهی با پودر اسپیرولینا موجب بهبود معنی‌دار شاخص‌های رشد، بازماندگی، ترکیب بدن و عملکرد تولیدمثلی طی تخم‌ریزی‌های متوالی شد (Namaei Kohal et al. 2018) (جدول ۱).

گونه‌های ریزجلبکی سبز مانند کلرلا[1] و کوئلاسترلا[2] نیز با محتوای پروتئین خام ۴۰ تا ۶۰٪، رقیب جدی پودر ماهی محسوب می‌شوند. Li و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که جایگزینی تا ۲۰٪ پودر ماهی با جلبک *Chlorella sorokiniana* منجر به بهبود ابقای پروتئین و افزایش وزن بدن می‌شود (جدول ۱) و همچنین به دلیل کاروتنوئیدهایی مانند آستازانتین و لوتئین، رنگ‌پذیری (قرمزی) بدن میگو را تقویت می‌کند. در دیگر گونه‌های جلبکی مانند *Coelastrella tenuitheca*، Ashour و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند که افزودن سطوح بهینه (حدود ۲/۵ g/kg) به خوراک، علاوه بر افزایش معنی‌دار وزن نهایی و نرخ بقا، باعث تنظیم مثبت ژن‌های مرتبط با رشد، از جمله هورمون رشد و فاکتورهای رشد شبه‌انسولینی (IGF-II و IGF-I) می‌شود.

از منظر ایمنی، ترکیبات فیتوشیمیایی ریزجلبک‌ها فعالیت آنزیم‌های گوارشی (آمیلاز و لیپاز) و آنزیم‌های ضداکسایشی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوتاتیون پراکسیداز را تقویت کرده و مقاومت میگو را در برابر عوامل بیماری‌زایی مانند *Vibrio parahaemolyticus* افزایش می‌دهند (Novriadi et al. 2022). علاوه بر این، ریزجلبک‌های دریایی مانند *Nannochloropsis oculata* و *Isochrysis* sp.، به دلیل توانایی در ساخت اسیدهای چرب امگا ۳ بلند زنجیره (EPA و DHA)، نقش حیاتی در خوراک‌های فاقد منابع ایفا می‌کنند (Sarker, 2023).

با وجود این، استفاده گسترده از ریزجلبک‌ها با محدودیت‌هایی از جمله عدم تعادل اسیدهای آمینه در برخی گونه‌ها (به‌ویژه نقص متیونین و هیستیدین در کلرلا) که در سطوح جایگزینی بیش از ۶۰٪ به عقب‌ماندگی رشد منجر می‌شود؛ دیواره یاخته‌ای سلولزی یا سیلیکاتی که دسترسی آنزیم‌های گوارشی به پروتئین را محدود می‌کند و نیازمند فناوری‌های نوین فرآوری است؛ و در نهایت، هزینه بالای تولید انبوه که هنوز مانع اصلی جایگزینی کامل با پودر ماهی در مقیاس تجاری روبرو است (Sarker, 2023; Pathak et al. 2024). با وجود این چالش‌ها، ریزجلبک‌ها نه تنها یک جایگزین پروتئینی، بلکه افزودنی عملکردی چندمنظوره‌ای هستند که پایداری بلندمدت صنعت میگو را تضمین می‌کنند (Sarker, 2023).

[1] *Chlorella*

[2] *Coelastrella*

درشت‌جلبک‌ها

درشت‌جلبک‌ها یا جلبک‌های دریایی به دلیل غنا در مواد فعال زیستی، ویتامین‌ها، مواد معدنی و پلی‌ساکاریدهای عملکردی، به‌عنوان اجزای راهبردی در فرمول‌نویسی خوراک‌های نوین میگو شناخته می‌شوند (Morshedi et al. 2021; Macusi et al. 2023; Pourmozaffar et al. 2025). بر اساس گزارش اخیر فائو، تولید جهانی جلبک‌ها (عموماً درشت‌جلبک‌های دریایی پرورشی) در سال ۲۰۲۴ به رقم ۴۰ میلیون تن رسیده است (FAO, 2026). برخلاف ریزجلبک‌ها که عمدتاً به‌عنوان منبع اصلی پروتئین و چربی مطرح‌اند، به درشت‌جلبک‌ها بیشتر به دلیل خواص پری‌بیوتیکی و محرک ایمنی در خوراک‌های فاقد پودر ماهی توجه می‌شود (Pathak et al. 2024). با وجود این، برخلاف کاربرد عمدتاً عملکردی درشت‌جلبک‌ها، در میگوی ببری سیاه آرد جلبک سبز رشته‌ای *Cladophora* spp. به عنوان جایگزین جزئی پروتئینی پودر ماهی نیز استفاده شده و بر عملکرد رشد و بقای پست‌لارو اثرگذار بوده است (Anh et al. 2018) (جدول ۱). این گیاهان دریایی حاوی متابولیت‌های ثانویه‌ای مانند پلی‌فنول‌ها هستند که توانایی بالایی در مهار رادیکال‌های آزاد و تقویت دستگاه ضداکسایشی میگو دارند (Sotoudeh and Mardani, 2017; Vazirzadeh et al. 2020).

در میان جلبک‌های قهوه‌ای، جنس سارگاسوم[1] به دلیل پراکنش گسترده و سهولت جمع‌آوری، ظرفیت بالایی برای کاربرد در صنعت خوراک دارد (Morshedi et al. 2021). مطالعات نشان داده‌اند که جایگزینی پودر ماهی با آرد سارگاسوم در سطوح پایین (حدود ۶٪) نه تنها عملکرد رشد را مختل نمی‌کند (جدول ۱)، بلکه با افزایش درازای پرزهای روده و سطح جذبی، کارایی هضم و جذب مواد مغذی را بهبود می‌بخشد (Zeynali et al. 2020; Morshedi et al. 2021). Jahromi و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که استفاده از سارگاسوم در خوراک میگوی پاسفید باعث ترکیب و فعالیت میکروب‌های روده به سمت حالت مطلوب‌تر و بهبود ساختار بافتی کبدی-لوزالمعدی می‌شود.

نقش متمایز درشت‌جلبک‌ها در تحریک دستگاه ایمنی ذاتی از طریق پلی‌ساکاریدهای سولفاته اختصاصی مانند فوکوئیدان[2] و آلژینات[3] است. برای نمونه، مکمل‌سازی خوراک با فوکوئیدان استخراج‌شده از جلبک قهوه‌ای *Sargassum wightii* به تقویت دستگاه پروفنولاکسیداز (proPO)[4] و افزایش مقاومت میگو در برابر ویبریوز منجر شده است (Sivagnanavelmurugan et al. 2014). به‌طور مشابه، Ashour و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای نشان دادند که عصاره تجاری جلبک دریایی بیان ژن‌های مرتبط با رشد و ایمنی را در میگوی پاسفید افزایش می‌دهد، و فرمول‌نویسی سین‌بیوتیک بر پایه جلبک قرمز *Kappaphycus alvarezii* نرخ بازماندگی میگو را در شرایط چالش با عوامل بیماری‌زا به‌طور معنی‌دار ارتقا داده‌اند (Situmorang et al. 2021).

جلبک‌های قرمز مانند گراسیلاریا[5]، به‌دلیل پلی‌ساکاریدهایی مانند آگار، اثرات مثبتی بر سلامت عمومی آبزیان دارند. Morshedi و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی گونه *G. pulvinata* گزارش کردند که مکمل‌سازی خوراک با این جلبک می‌تواند سطوح کلسترول و تری‌گلیسرید خون را کاهش دهد. جلبک سبز *Ulva* sp. نیز در خوراک‌های مبتنی بر پروتئین گیاهی به‌عنوان جایگزین مناسبی عمل کرده و پایداری فیزیکی پلت را بهبود بخشیده است (Qiu et al. 2018)، در حالی که دوزهای پایین *Ulva clathrata* به عنوان ابزاری برای مدیریت تنش‌های محیطی در سامانه‌های پرورشی متراکم پیشنهاد شده است (Peña-Rodríguez et al. 2017).

با وجود این، سطوح بالای گنجاندن درشت‌جلبک‌ها (بیش از ۹ تا ۱۲٪ و به‌طور کلی بیش از ۱۰٪ در بیشتر مرورهای سیستماتیک) با افت معنی‌دار در جذب غذا و بهره‌وری رشد همراه است؛ پدیده‌ای که احتمالاً ناشی از محتوای بالای فیبر، پلی‌ساکاریدهای غیرنشاسته‌ای پیچیده و فاکتورهای ضدتغذیه‌ای است که فعالیت آنزیم‌های گوارشی را کاهش داده و به انتروسیت‌های روده آسیب می‌رساند (Sotoudeh and Mardani, 2017; Macusi et al. 2023). افزون بر این، محتوای پروتئین پایین (معمولاً ۱۰ تا ۳۰٪) و خاکستر بالا در بسیاری از گونه‌ها از

[1] Sargassum
[2] Fucoidan
[3] Alginate
[4] Prophenoloxidase activating system
[5] Gracilaria

جمله *Gracilaria pygmaea* استفاده از درشت-جلبک‌ها را به‌عنوان منبع اصلی پروتئین محدود کرده و بیشتر به سمت نقش افزودنی عملکردی سوق می‌دهد (Sotoudeh and Mardani, 2017).

جدول ۱ ارزیابی سطوح مختلف منابع پروتئینی جایگزین پودر ماهی در گونه‌های مختلف میگو

Table 1 Evaluation of alternative protein source replacement levels for fishmeal in different shrimp/prawn species.

Species	Protein source	Replacement level in diet	Measured indices	Reported optimal level	Reference
Black tiger shrimp (*P. monodon*)	Green algae meal (*Cladophora* spp.)	Partial fishmeal replacement	Growth performance, postlarval survival, whole-body proximate composition	Variable, depending on formulation	Anh et al. (2018)
P. monodon	Hydrolyzed squid protein powder	Supplementation of soybean-based diet	Growth performance; compensated soybean-related deficiencies in early growth	1% supplementation (growth equal to fishmeal diet)	Gabriel et al. (2024)
Giant river prawn (*M. rosenbergii*)	Cowpea meal (*Vigna unguiculata*)	Dietary fishmeal replacement	Growth performance, feed efficiency	Potential confirmed in practical diets	Aya et al. (2015)
M. rosenbergii	Soybean meal and distillers by-products	Partial to complete fishmeal replacement	Growth performance, final survival, economic feasibility	Successful replacement, no loss in survival/growth	Tidwell et al. (1993)
Red cherry shrimp (*N. davidi*)	Spirulina meal (*Arthrospira platensis*)	Direct inclusion (0, 1, 3, 5, 8, 10% SP)	Growth, survival, body composition, reproductive performance	Marked improvement in growth and reproductive survival	Namaei Kohal et al. (2018)
Pacific white shrimp (*P. vannamei*)	Mealworm (*Tenebrio molitor*)	Gradual (0–100%)	Growth, serum biochemistry, innate immune responses	30% (above 30% reduced growth)	Sharifinia et al. (2023)
L. vannamei postlarvae	Black soldier fly larvae (*H. illucens*)	Gradual (0, 25, 50, 100%)	Final weight, protein/lipid efficiency, digestive enzymes (trypsin, lipase)	50% (100% reduced trypsin activity and growth)	Zamani and Jafari (2025)

Species	Protein source	Replacement level in diet	Measured indices	Reported optimal level	Reference
P. vannamei postlarvae	Black soldier fly larvae (*H. illucens*)	100%	Growth performance, FCR under high stocking density	100% (no reduction in growth)	Nunes et al. (2023)
P. vannamei	Novel bacterial protein CAP (*C. autoethanogenum*)	100%	Growth, lipid/sterol metabolism, hepatopancreas health	100% (with 0.06% bile acid supplementation)	Shi et al. (2023)
P. vannamei	Corn gluten meal (CGM)	Replacement of fishmeal-containing diet	Growth, protease activity, protein/lipid digestibility	24.47% (in diets with 30% initial fishmeal)	Lin et al. (2023)
P. vannamei	Multi-protein blend (MBM:PBM:BM:CGM, 6:6:5:3)	100%	Growth, digestibility, body composition, amino acid balance	100% (equal to 78.4% of total dietary fishmeal)	Ye et al. (2011)
P. vannamei	Chlorella meal (*C. sorokiniana*)	Fishmeal replacement	Protein retention, weight gain, pigmentation	20% (above 60% caused growth retardation)	Li et al. (2022)
P. vannamei	Brown macroalgae (*S. ilicifolium*)	Partial fishmeal replacement	Growth, villus length, gut/liver microbiome	6% dietary supplementation	Zeynali et al. (2020)

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

تلاش صنعت جهانی خوراک آبزیان برای کاهش وابستگی به پودر ماهی، از یک رویکرد زیست‌محیطی داوطلبانه به یک ضرورت زیستی و اقتصادی برای توسعه پایدار پرورش سخت‌پوستان تبدیل شده است. یافته‌های این مقاله مروری نشان می‌دهد که اگرچه پودر ماهی به دلیل پروفایل اسیدآمینه مطلوب، خوش‌خوراکی بالا و همچنین دیگر مواد مغذی ارزشمند مانند فسفولیپیدها همچنان استاندارد طلایی تغذیه میگو است، اما به‌دلیل محدودیت‌های تأمین این ترکیب، مقدار جایگزینی آن در خوراک میگو در حال افزایش است. با وجود این، تحلیل جامع منابع جایگزین مورد استفاده نشان می دهد که هیچ‌یک از منابع پروتئینی نمی‌تواند به تنهایی جایگزین ۱۰۰٪ پودر ماهی شود، زیرا هر یک از این منابع دارای محدودیت‌های ذاتی خاص خود هستند. کنجاله سویا با وجود قیمت رقابتی و پروفایل اسیدآمینه نسبتاً مطلوب، با فاکتورهای ضدتغذیه‌ای و کمبود متیونین، لایزین و تائورین محدود می‌شود. گلوتن ذرت و گندم تراکم پروتئینی بالا و خواص فناورانه ارزشمندی در پایداری فیزیکی پلت ارائه می‌دهند، اما از خوش‌خوراکی پودر ماهی برخوردار نیستند. پودر حشرات و پروتئین‌های تک‌یاخته‌ای/میکروبی، به‌واسطه سازگاری با اقتصاد چرخشی و راهبرد تحول آبی فائو، توان بالقوه بالایی دارند، اما با محدودیت‌های اسیدهای چرب، کیتین یا اسیدهای نوکلئیک روبه‌رو هستند. فرآورده‌های جانبی دامی و ضایعات شیلاتی اگرچه ارزان و پرحجم‌اند، در پروفایل اسیدهای چرب و اسیدهای آمینه ضروری دچار خلأ می‌شوند، و ریزجلبک‌ها و ماکروجلبک‌ها، در کنار ارزش تغذیه‌ای، بیشتر نقش افزودنی‌های عملکردی محرک ایمنی و ضداکسایشی ایفا می‌کنند تا اینکه جایگزین اصلی پروتئین باشند. با وجود این، برای غلبه بر این موانع فیزیولوژیک، فرمول‌نویسی آینده خوراک آبزیان باید سه راهبرد هم‌افزا را تلفیق کنند: ۱) مداخله‌های پیشرفته زیست فناوری مانند تخمیر میکروبی و هیدرولیز آنزیمی برای خنثی‌سازی فاکتورهای ضدتغذیه‌ای و افزایش زیست‌فراهمی مواد مغذی؛ ۲) رویکرد فرمول‌نویسی چندپروتئینی از طریق ترکیب پروتئین‌های گیاهی، حیوانات خشکی‌زی، میکروبی و ضایعات شیلاتی؛ ۳) مکمل‌سازی هدفمند با افزودنی‌های عملکردی خوراک (مانند اسیدهای آمینه کریستاله، اسیدهای صفراوی و محرک‌های ایمنی) برای کاهش تنش‌های گوارشی و متابولیک. این چارچوب تلفیقی، عملی‌ترین مسیر برای دستیابی به جیره‌های پربازده، اقتصادی و پایدار عاری از پودر ماهی در صنعت پرورش میگو به نظر می رسد.

منابع

Abd El-Naby, A.S., Eid, A.E., Gaafar, A.Y., Sharawy, Z., Khattaby, A.A., El-Sharawy, M.S., El Asely, A.M. 2024. Overall evaluation of the replacement of fermented soybean to fish meal in juvenile white shrimp *Litopenaeus vannamei* diet growth health status and hepatopancreas histomorphology. Aquaculture International 32: 1665-1683. DOI: 10.1007/s10499-023-01234-0.

Akpoilih, B.U., Nwafili, S.A., Erondu, E.S. 2024. Microbial phytases as functional feed additives in aquaculture: Impact, challenges, recent developments and future opportunities. In: Sustainable Feed Ingredients and Additives for Aquaculture Farming: Perspectives from Africa and Asia. Gabriel, N.N., Abasubong, K.P., Erasmus, V.N., Kamble, M.T. (Eds.). Springer Nature Singapore, 521-564. DOI: 10.1007/978-981-97-4279-0_23

Anh, N.T.N., Hai, T.N., Hien, T.T.T. 2018. Effects of partial replacement of fishmeal protein with green seaweed (*Cladophora spp*.) protein in practical diets for the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) postlarvae. Journal of Applied Phycology 30: 2649-2658. DOI: 10.1007/s10811-018-1457-7

Suantika, G., Situmorang, M.L., Kurniawan, J.B., Pratiwi, S.A., Aditiawati, P., Astuti, D.I., Azizeh, F.F.N., Djohan, Y.A., Zuhri, U., Simatupang, T.M. 2018. Development of a zero water discharge (ZWD)-recirculating aquaculture system (RAS)

hybrid system for super intensive white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture under low salinity conditions and its industrial trial. Aquacultural Engineering 82: 12-24. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2018.04.002

Ashour, M., Ali, F.S., Mamoon, A., Mabrouk, M.M., Mansour, A.I.A., Abdelhamid, A.F., Mansour, A.T., Mohamed, E., Elshobary, M. 2025. A novel *Coelastrella tenuitheca* isolate enhances growth, immunity, and gene expression in whiteleg shrimp. Aquaculture Nutrition 2025: Article 4019255. DOI: 10.1155/anu/4019255

Ashour, M., Mansour, A.T., Alkhamis, Y.A., Elshobary, M.E. 2024. Impact of dietary administration of *Arthrospira platensis* free-lipid biomass on growth performance, body composition, redox status, immune responses, and some related genes of pacific whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* postlarvae. PLoS ONE 19: e0300748. DOI: 10.1371/journal.pone.0300748

Aya, F.A., Cuvin-Aralar, M.L., Coloso, R.M. 2015. Potential of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) meal as an alternative protein source in diets for giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*, de Man 1879). In: Resource Enhancement and Sustainable Aquaculture Practices in Southeast Asia. Romana-Eguia, M.R.R., Parado-Estepa, F.D., Salayo, N.D., Lebata-Ramos, M.J.H. (Eds.). SEAFDEC Aquaculture Department, Iloilo, Philippines, 273-282. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2007.01667.x

Bae, J., Hamidoghli, A., Djaballah, M.S., Maamri, S., Hamdi, A., Souffi, I., Farris, N.W., Bai, S.C. 2020. Effects of three different dietary plant protein sources as fishmeal replacers in juvenile whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Fisheries and Aquatic Sciences 23: 1-6. DOI: 10.1186/s41240-020-0148-x

Brown, L., Desbruslais, A., Hung, L.T., Tuan, V.V. 2024. The effect of oregano essential oil on growth performance and mortality of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) under *Vibrio parahaemolyticus* challenge. Latin American and Caribbean Aquaculture 2024.

Bulbul, M., Kader, M.A., Ambak, M.A., Hossain, M.S., Ishikawa, M., Koshio, S. 2015. Effects of crystalline amino acids, phytase and fish soluble supplements in low fishmeal diets for red sea bream, *Pagrus major*. Aquaculture Nutrition 21: 136-144. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2015.01.007

Buttle, L., Noorman, H., Roa Engel, J.R., Santigosa, E. 2024. Bridging the protein gap with single-cell protein use in aquafeeds. Frontiers in Marine Science 11: 1384083. DOI: 10.3389/fmars.2024.1384083

Casillas-Hernández, R., Flores-Pérez, M.B., Yépez, E.A., Robles-Morúa, A., Villa-Ibarra, M., Bórquez-López, R., Gil-Núñez, J.C., Lares-Villa, F. 2023. Eco-efficiency assessment of disease-infected shrimp farming in Mexico using environmental impact assessment tools. Science of the Total Environment 858: 159737. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159737

Chen, Y., Chi, S., Zhang, S., Dong, X., Yang, Q., Liu, H., Tan, B., Xie, S. 2021. Evaluation of the dietary black soldier fly larvae meal (*Hermetia illucens*) on growth performance, intestinal health, and disease resistance to *Vibrio parahaemolyticus* of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Frontiers in Marine Science 8: 706463. DOI: 10.3389/fmars.2021.706463

Chen, Y., Mitra, A., Rahimnejad, S., Chi, S., Kumar, V., Tan, B., Niu, J., Xie, S. 2024. Retrospective of fish meal substitution in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) feed: Alternatives, limitations and prospects. Reviews in Aquaculture 16: 382-409. DOI: 10.1111/raq.12843

Chowdhury, M.A.K., Song, H., Liu, Y., Bunod, J.D., Dong, X.H. 2021. Effects of microencapsulated organic acid and

their salts on growth performance, immunity, and disease resistance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Sustainability 13: 7791. DOI: 10.3390/su13147791

Cruz-Suárez, L.E., Tapia-Salazar, M., Nieto-López, M., Guajardo-Barbosa, C., Ricque-Marie, D. 2007. Comparison of *Ulva clathrata* and the kelps *Macrocystis pyrifera* and *Ascophyllum nodosum* as ingredients in shrimp feeds. Aquaculture Nutrition 15: 421-430. DOI: 10.1111/j.1365-2095.2008.00607.x

Dai, J., Chen, S., Chen, Q., Dong, F., Tang, Y., Wang, J., Harpaz, S., Han, T. 2025. Effects of glycine supplementation on growth performance, antioxidant activity, immunity, and muscle tissue structure of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) under fermented soybean meal substitution. Aquaculture Research 2025: 3107866. DOI: 10.1155/are/3107866

FAO. 2026. The State of World Fisheries and Aquaculture 2026: Blue Transformation: Turning Vision into Impact. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy. DOI: 10.4060/cd8357en

Felix, S., Samocha, T., Menaga, M. 2023. Vannamei Shrimp Farming. CRC Press, London, UK. DOI: 10.1201/9781003083276

Gabriel, N.N., Abasubong, K.P., Erasmus, V.N., Kamble, M.T. (Eds.). 2024. Sustainable Feed Ingredients and Additives for Aquaculture Farming: Perspectives from Africa and Asia. Springer Nature Singapore, 585 p. DOI: 10.1007/978-981-97-4279-0

Gasco, L., Acuti, G., Bani, P., Dalle Zotte, A., Danieli, P.P., De Angelis, A., Fortina, R., Marino, R., Parisi, G., Piccolo, G., Pinotti, L., Prandini, A., Schiavone, A., Terova, G., Tulli, F., Roncarati, A. 2020. Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition. Italian Journal of Animal Science 19: 360-372. DOI: 10.1080/1828051x.2020.1743209

Gisbert, E., Ruiz, A., Torrecillas, S., Cruz-Quintana, Y., Bertomeu, E., Saromines, C., Melenchón, F., Ntokou, E., Pascual, I., Reinoso, S., Sarih, S., Solovyev, M.M., Furones, M.D., Thorringer, N.W. 2025. Methanotrophic bacterial meal as an alternative feed ingredient for whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) diets. Aquaculture Reports 45: 103094. DOI: 10.1016/j.aqrep.2025.103094

Hasanthi, M., Chotikachinda, R., Medagoda, N., Lee, K.J. 2025. Exogenous protease supplementation in high- and low-fishmeal diets for Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*): Comparative effect on growth, immunity, nutrient digestibility and gut health. Aquaculture Reports 45: 103094. DOI: 10.1016/j.aninu.2025.04.002

He, G., Chen, X., Zeng, Q., Zhu, W., Chen, Z., Tan, B., Xie, S. 2022. Effects of compound feed attractants on growth performance, feed utilization, intestinal histology, protein synthesis, and immune response of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Animals 12: 2550. DOI: 10.3390/ani12192550

Hlordzi, V., Wang, J., Li, T., Cui, Z., Tan, B., Liu, H., Yang, Q., Dong, X., Zhang, S., Chi, S. 2022. Effects of lower fishmeal with hydrolyzed fish protein powder on the growth performance and intestinal development of juvenile pearl gentian grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* × *Epinephelus lanceolatus*). Frontiers in Marine Science 9: 830398. DOI: 10.3389/fmars.2022.830398

Hossain, M.S., Small, B.C., Kumar, V., Hardy, R. 2024. Utilization of functional feed additives to produce cost-effective, eco-friendly aquafeeds high in plant-based ingredients. Reviews in Aquaculture 16: 121-153. DOI: 10.1111/raq.12824

Huang, H., Pan, L., Pan, S., Song, M. 2018. Effects of dietary herbal formulae

combined by Astragalus polysaccharides, chlorogenic acid and allicin in different combinations and proportions on growth performance, non-specific immunity, antioxidant status, vibriosis resistance and damage indexes of *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture Research 49: 701-716. DOI: 10.1111/are.13500

Jahromi, S.T., Pourmozaffar, S., Jahanbakhshi, A., Rameshi, H., Gozari, M., Khodadadi, M., Sohrabipour, J., Behzadi, S., Bazrkar, N., Nahavandi, R. 2021. Effect of different levels of dietary *Sargassum cristaefolium* on growth performance, hematological parameters, histological structure of hepatopancreas and intestinal microbiota of *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture 533: 736130. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2020.736130

Khanjani, M.H., Mozanzadeh, M.T., Gisbert, E., Hoseinifar, S.H. 2024. Probiotics, prebiotics, and synbiotics in shrimp aquaculture: Their effects on growth performance, immune responses, and gut microbiome. Aquaculture Reports 38: 102362. DOI: 10.1016/j.aqrep.2024.102362

Namaei Kohal, M., Esmaeili Fereidouni, A., Firouzbakhsh, F., Hayati, I. 2018. Effects of dietary incorporation of Arthrospira (Spirulina) platensis meal on growth, survival, body composition, and reproductive performance of red cherry shrimp *Neocaridina davidi* (Crustacea, Atyidae) over successive spawnings. Journal of Applied Phycology 30: 431-443. DOI: 10.1007/s10811-017-1278-x

Li, M., Li, X., Yao, W., Wang, Y., Zhang, X., Leng, X. 2022. An evaluation of replacing fishmeal with *Chlorella sorokiniana* in the diet of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): Growth, body color, and flesh quality. Aquaculture Nutrition 2022: 8617265. DOI: 10.1155/2022/8617265

Lin, H., Deng, Y., Zhu, D., Yang, Q., Zhou, X., Tan, B., Feng, L., Chi, S. 2023. Effects of partially replacing fishmeal with corn gluten meal on growth, feed utilization, digestive enzyme activity, and apparent nutrient digestibility for juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Frontiers in Veterinary Science 10: 1162599. DOI: 10.3389/fvets.2023.1162599

López-Ortiz, E., Arambul-Muñoz, E., Tinajero, A., del Río Zaragoza, O.B., Galindo-Valdez, L.A., Viana, M.T. 2023. Effect of substitution of poultry by-product meal by bovine by-product meal on overall performance for *Litopenaeus vannamei*. Animal Feed Science and Technology 303: 115689. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2023.115689

Macusi, E.D., Cayacay, M.A., Borazon, E.Q., Sales, A.C., Habib, A., Fadli, N., Santos, M.D. 2023. Protein fishmeal replacement in aquaculture: A systematic review and implications on growth and adoption viability. Sustainability 15: Article 12500. DOI: 10.3390/su151612500

Macusi, E.D., Estor, D.E.P., Borazon, E.Q., Clapano, M.B., Santos, M.D. 2022. Environmental and socioeconomic impacts of shrimp farming in the Philippines: A critical analysis using PRISMA. Sustainability 14: 2977. DOI: 10.3390/su14052977

Morshedi, V., Ghasemi, A., Sotoudeh, E., Bagheri, D., Yilmaz, S. 2021. Dietary administration of *Sargassum angustifolium* and *Gracilaria pulvinata* extracts affects antioxidant enzyme activities and immune response in Asian seabass (*Lates calcarifer*). Iranian Journal of Fisheries Sciences 20: 835-848. DOI: 10.22092/ijfs.2021.124233

Morshedi, V., Nafisi Bahabadi, M., Sotoudeh, E., Azodi, M., Hafezieh, M. 2018. Nutritional evaluation of *Gracilaria pulvinata* as partial substitute for fish meal in practical diets of barramundi (*Lates calcarifer*). Journal of Applied Phycology 30: 619-628. DOI: 10.1007/s10811-017-1199-y

Nunes, A.J.P., Sabry-Neto, H., Masagounder, K., Lemos, D., Vieira,

C.C., Pinto, R.C. 2022. Developing sustainable, cost-effective and high-performance shrimp feed formulations containing low fish meal levels. Aquaculture Reports 27: 101422. DOI: 10.1016/j.aqrep.2022.101422

Nunes, A.J.P., Soares, A.N., Sabry-Neto, H. 2023. The black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal can fully replace fish meal in practical nursery diets for post-larval *Penaeus vannamei* under high-density culture. Aquaculture Nutrition 2023: 77217. DOI: 10.20944/preprints202310.1034.v1

Okon, E., Iyobhebhe, M., Olatunji, P., Adeleke, M., Matekwe, N., Okocha, R. 2025. Feed additives in aquaculture: Benefits, risks, and the need for robust regulatory frameworks. Fishes 10: 471. DOI: 10.3390/fishes10090471

Oliveira, M., Vasconcelos, V. 2020. Occurrence of mycotoxins in fish feed and its effects: A review. Toxins 12: 160. DOI: 10.3390/toxins12030160

Pathak, M.S., Bhadra, S., Harini, G. 2024. Exploring seaweed as sustainable green aquafeed: Opportunities and challenges. In: Sustainable Feed Ingredients and Additives for Aquaculture Farming: Perspectives from Africa and Asia. Gabriel, N.N., Abasubong, K.P., Erasmus, V.N., Kamble, M.T. (Eds.). Springer Nature, Singapore, 95-114. DOI: 10.1007/978-981-97-4279-0_5

Peña-Rodríguez, A., Elizondo-González, R., Quiroz-Guzmán, E., Leyva-Guerrero, R., Tovar-Ramírez, D. 2017. Use of seaweed *Ulva lactuca* for water bioremediation and as feed additive for white shrimp *Litopenaeus vannamei*. PeerJ 5: e3446. DOI: 10.7287/peerj.preprints.3446v1

Pourmozaffar, S., Tamadoni Jahromi, S., Rameshi, H., Sadeghi, A., Bagheri, T., Reverter, M. 2025. Red head syndrome in shrimp aquaculture: Prevention and control. Iranian Journal of Fisheries Sciences 24: 109-125. DOI: 10.22092/jifro.2024.128912

Qiu, X., Davis, D.A. 2017. Evaluation of flash dried yeast as a nutritional supplement in plant-based practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture Nutrition 23: 1244-1253. DOI: 10.1111/anu.12499

Qiu, X., Neori, A., Kim, J.K., Yarish, C., Shpigel, M., Guttman, L., Ben Ezra, D., Odintsov, V., Davis, D.A. 2018. Evaluation of green seaweed Ulva sp. as a replacement of fish meal in plant-based practical diets for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Journal of Applied Phycology 30: 1305-1316. DOI: 10.1007/s10811-017-1278-0

Ray, G.W., Yang, Q., Tan, B., Dong, X., Chi, S., Liu, H., Zhang, S. 2021. Effects of replacing fishmeal with dietary wheat gluten meal (WGM) on growth, serum biochemical indices, and antioxidative functions, gut microbiota, histology and disease resistance for juvenile shrimp *Litopenaeus vannamei*. Animal Feed Science and Technology 281: 115090. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2021.115090

Ren, L., Gu, W., Sun, H., Fan, G., & Yang, X. 2026. Low-fishmeal dietary supplementation with crayfish by-product protein hydrolysate affects growth performance, appetite-related metabolic signaling and intestinal microbiota of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*), Animals, 16. DOI: 10.3389/fphys.2020.01024

Roda, A.L., Cowie, R.H., Wilson, B.E., Hayes, K.A., Byers, J.E., Qiu, J., Rosser, T.G., Mischke, C.C., Burks, R.L., Lucero, J.M. 2024. Apple snails: Discussions of past problems and future solutions for an emerging pest in United States agriculture/aquaculture. World Aquaculture Magazine 55: 31-38.

Sarker, P.K. 2023. Microorganisms in fish feeds, technological innovations, and key strategies for sustainable aquaculture. Microorganisms 11: 439. DOI: 10.3390/microorganisms11020439

Shao, J., Wang, B., Liu, M., Jiang, K., Wang, L., Wang, M. 2020. Replacement

of fishmeal by fermented soybean meal could enhance the growth performance but not significantly influence the intestinal microbiota of white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture 504: 354-360. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2019.02.011

Sharawy, Z.Z., Ashour, M., Labena, A., Alsaqufi, A.S., Mansour, A.T., Abbas, E.M. 2022. Effects of dietary *Arthrospira platensis* nanoparticles on growth performance, feed utilization, and growth-related gene expression of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture 551: 737905. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.737905

Sharif, M., Zafar, M.H., Aqib, A.I., Saeed, M., Farag, M.R., Alagawany, M. 2021. Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. Aquaculture 531: Article 735885. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2020.735885

Sharifinia, M., Afshari Bahmanbeigloo, Z., Keshavarzifard, M., Khanjani, M.H., Daliri, M., Koochaknejad, E., Jasour, M.S. 2023. Fishmeal replacement by mealworm (*Tenebrio molitor*) in diet of farmed Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): Effects on growth performance, serum biochemistry, and immune response. Aquatic Living Resources 36: 19. DOI: 10.1051/alr/2023013

Shi, M., Zheng, C., Sun, Y., Li, X., He, G., Cao, J., Tan, B., Xie, S. 2023. Effects of dietary chenodeoxycholic acid supplementation in a low fishmeal diet containing *Clostridium autoethanogenum* protein on growth, lipid and cholesterol metabolism, and hepatopancreas health of *Litopenaeus vannamei*. Animals 13: 2109. DOI: 10.3390/ani13132109

Shin, J., Lee, K.J. 2021. Digestibility of insect meals for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and their performance for growth, feed utilization and immune responses. PLoS ONE 16: e0260305. DOI: 10.1371/journal.pone.0260305

Situmorang, M.L., Nurwidayanti, P., Suantika, G. 2021. Synbiotic containing *Kappaphycus alvarezii*, *Spirulina sp.* and *Halomonas alkaliphila* improves survival, growth and vibriosis resistance in whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) post-larval culture. Aquatic Living Resources 34: 10. DOI: 10.1051/alr/2021009

Sivagnanavelmurugan, M., Thaddaeus, B.J., Palavesam, A., Immanuel, G. 2014. Dietary effect of *Sargassum wightii* fucoidan to enhance growth, prophenoloxidase gene expression of *Penaeus monodon* and immune resistance to *Vibrio parahaemolyticus*. Fish and Shellfish Immunology 39: 439-449. DOI: 10.1016/j.fsi.2014.05.037

Sotoudeh, E., Mardani, F. 2018. Antioxidant-related parameters, digestive enzyme activity and intestinal morphology in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry fed graded levels of red seaweed, *Gracilaria pygmaea*. Aquaculture Nutrition 24: 777-785. DOI: 10.1111/anu.12606

Sotoudeh, E., Sangari, M., Bagheri, D., Morammazi, S., Torfi Mozanzadeh, M. 2020. Dietary organic acid salts mitigate plant protein-induced inflammatory response and improve humoral immunity, antioxidative status, and digestive enzyme activities in yellowfin seabream, *Acanthopagrus latus*. Aquaculture Nutrition 26: 1-12. DOI: 10.1111/anu.13112

Tantikitti, C. 2014. Feed palatability and the alternative protein sources in shrimp feed. Songklanakarin Journal of Science and Technology 36: 51-55. DOI: 10.1111/anu.13105

Tidwell, J.H., Webster, C.D., Yancey, D.H., D'Abramo, L.R. 1993. Partial and total replacement of fish meal with soybean meal and distillers' by-products in diets for pond culture of the freshwater prawn (*Macrobrachium*

rosenbergii). Aquaculture 118: 119-130. DOI: 10.1016/0044-8486(93)90285-7

To, V.A., Liou, C.H. 2021. Taurine supplementation enhances the replacement level of fishmeal by soybean concentrate in diets of juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931). Aquaculture Research 52: 3771-3784. DOI: 10.1111/are.15222

Wang, T., Wang, X., Shehata, A.I., Wang, R., Yang, H., Wang, Y., Wang, J., Zhang, Z. 2022. Growth performance, physiological and antioxidant capacity responses to dietary fish meal replacement with insect meals for aquaculture: A case study in red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*). Aquaculture Research 53: 3853-3864. DOI: 10.1111/are.15892

Xie, S., Wei, D., Tan, B., Liu, Y., Tian, L., Niu, J. 2020. *Schizochytrium limacinum* supplementation in a low fish-meal diet improved immune response and intestinal health of juvenile *Penaeus monodon*. Frontiers in Physiology 11: 613. DOI: 10.3389/fphys.2020.00613

Yao, W., Yang, P., Zhang, X., Xu, X., Zhang, C., Li, X., Leng, X. 2022. Effects of replacing dietary fish meal with *Clostridium autoethanogenum* protein on growth and flesh quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Aquaculture 549: 737770. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.737770

Ye, J., Wang, K., Xu, Z., Li, M., Shu, K., Lei, L., Li, X., Leng, X. 2011. Incorporation of mixture of meat and bone meal, poultry by-product meal, blood meal and corn gluten meal as a replacement for fish meal in practical diet of Pacific white shrimp at two dietary protein levels. Aquaculture Nutrition 17: e337-e347. DOI: 10.1111/j.1365-2095.2010.00768.x

Zamani, A., Jafari, M. 2025. Effects of fish meal replacement with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in the diet of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* post-larvae on growth performance and digestive enzymes activity. Aquatic Animals Nutrition 10: 19-34. DOI: 10.22124/janb.2025.29001.1261

Zeynali, M., Nafisi Bahabadi, M., Morshedi, V., Ghasemi, A., Torfi Mozanzadeh, M. 2020. Replacement of dietary fishmeal with *Sargassum ilicifolium* meal on growth, innate immunity and immune gene mRNA transcript abundance in Lates calcarifer juveniles. Aquaculture Nutrition 26: 1657–1668. DOI: 10.1111/anu.13110

Zhu, L.Y., Nie, L., Zhu, G., Xiang, L.X., Shao, J.Z. 2013. Advances in research on fish immune-relevant genes: A comparative overview of innate and adaptive immunity in teleosts. Developmental and Comparative Immunology 39: 39-62. DOI: 10.1016/j.dci.2012.04.001

Zhu, T., Morais, S., Luo, J., Jin, M., Lu, Y., Le, Y. 2019. Functional palatability enhancer improved growth, intestinal morphology, and hepatopancreas protease activity, replacing squid paste in white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, diets. Journal of the World Aquaculture Society 50: 1064-1077. DOI: 10.1111/jwas.12615