



University of Tehran

Replacing of fish meal with different levels of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) larva meal in the diet of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and their effects on growth, immune, and antioxidant indices

Mehrnaz Heybatian¹ | Mir Masoud Sajjadi^{2*} | Mehrdad Fatollahi³ |
Bahram Falahatkar⁴ | Roghieh Safari⁵ | Ghasem Ashouri⁶

1. Fisheries Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: heibatianmehrnaz@gmail.com
2. Fisheries Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: mmsajjadi@gmail.com
3. Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: mehrdad.fatollahi@nres.sku.ac.ir
4. Fisheries Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: bfalahatkar@yahoo.com
5. Department of Fisheries and Aquatic Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: fisheriessafari@yahoo.com
6. National Artemia Research Center, Iranian Fisheries Scienc Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran. Email: ashuri.gh@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 05 October 2025

Revised: 20 November 2025

Accepted: 09 January 2026

Published online: 20 February 2026

Keywords:

Bioactive compounds,

Insect meal,

Nonspecific immune response,

Protein efficiency,

Plasma biochemistry.

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the effects of replacing different levels of fishmeal with black soldier fly (BSFL) (*Hermetia illucens*) larva meal in the diet on growth performance, immune responses and antioxidant activity of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry. A total of 180 fry with an initial weight of 5 ± 0.3 g were randomly distributed into four treatments and three replicates. The treatments consisted of control (C; standard fishmeal-based diet) and three experimental diets in which fish meal was replaced with insect meal at inclusion levels of 10% (BSFL10), 20% (BSFL20), and 30% (BSFL30). Growth assessment across two-week intervals revealed that black soldier fly larva meal replacement significantly affected growth indices during the experiment ($P < 0.05$). The results at the end of the experimental period showed that 10% replacement treatment resulted in a significant increase in weight gain (WG), specific growth rate (SGR), improved feed conversion ratio (FCR), body weight gain (BWI) and protein efficiency ratio (PER) compared to the control group ($P < 0.05$), while the 20% and 30% replacement levels exhibited no significant differences in growth indices compared to control diet ($P > 0.05$). In addition, the activities of lysozyme (LYZ) and catalase (CAT) enzymes at a replacement level of 10% were also significantly higher than the control and 30% replacement treatments ($P < 0.05$). Complement activity (ACH50) was higher at 10% replacement level than other treatments ($P < 0.05$). The results of this study showed that replacing black soldier fly larva at a level of 10% with fish meal is more effective in growth performance of rainbow trout fry, while increasing the replacement level up to 30% had a negative effect on growth, immune, and physiological indices. These findings suggest that black soldier fly larva meal can be used as a reliable and stable protein source with favorable performance in rainbow trout diets.

Cite this article: Heybatian, M., Sajjadi, M.M., Fatollahi, M., Falahatkar, B., Safari, R., Ashouri, Gh. (2026). Replacing of fish meal with different levels of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) larva meal in the diet of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and their effects on growth, immune, and antioxidant indices. *Journal of Fisheries*, 79 (1), 1-15. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2026.405572.1470>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2026.405572.1470>



دانشگاه تهران

شیلات، مجله منابع طبیعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۷۸۰۹-۲۴۲۳

سایت نشریه: <https://jfisheries.ut.ac.ir>

تأثیر جایگزینی پودر ماهی با سطوح مختلف پودر لارو

مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*) در جیره غذایی بر شاخص‌های رشد، ایمنی و

آنتی‌اکسیدانی در بچه‌ماهیان قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*)

مهرناز هبیتیان^۱ | میرمسعود سجادی^۲ | مهرداد فتح‌الهی^۳ | بهرام فلاحتکار^۴ | رقیه صفری^۵ | قاسم عشوری^۶

۱. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: heibatianmehmaz@gmail.com

۲. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: mmsajjadi@gmail.com

۳. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mehrdad.fatollahi@nres.sku.ac.ir

۴. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: bfalahatkar@yahoo.com

۵. گروه شیلات، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: fisheriessafari@yahoo.com

۶. مرکز تحقیقات آرمیای کشور، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. رایانامه: ashuri.gh@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

کلیدواژه:

بازده پروتئین،

بیوشیمی پلاسما،

پاسخ ایمنی غیراختصاصی،

پودر حشرات،

ترکیبات زیست‌فعال.

هدف از این پژوهش، بررسی اثرات جایگزینی سطوح مختلف پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه (BSFL) (*Hermetia illucens*)، در جیره غذایی بچه‌ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*) بر شاخص‌های رشد، پاسخ‌های ایمنی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بود. ۱۸۰ قطعه بچه‌ماهی با میانگین وزنی اولیه 5 ± 0.3 گرم به‌طور تصادفی به چهار تیمار و سه تکرار تقسیم شدند؛ که تیمارها شامل شاهد (C)؛ جیره استاندارد مبتنی بر پودر ماهی) و سه گروه آزمایشی با سطوح جایگزینی ۱۰ درصد (BSFL10)، ۲۰ درصد (BSFL20) و ۳۰ درصد (BSFL30) بودند. نتایج ارزیابی رشد در فواصل زمانی دوهفته‌ای از دوره پرورش نشان داد که میزان جایگزینی لارو مگس سرباز سیاه تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های رشد در طی آزمایش داشت ($P < 0.05$). نتایج رشد در پایان هشت هفته آزمایش، نیز بیانگر آن بود که تیمار جایگزینی ۱۰ درصد، منجر به افزایش معنی‌دار شاخص‌های رشد شامل، افزایش وزن (WG)، نرخ رشد ویژه (SGR)، بهبود ضریب تبدیل غذایی (FCR)، درصد افزایش وزن بدن (BWI) و نسبت بازده پروتئین (PER) در مقایسه با گروه شاهد گردید ($P < 0.05$)، در حالی که سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد از نظر شاخص‌های رشد تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند ($P > 0.05$). علاوه‌براین، فعالیت آنزیم‌های لایزوزیم (LYZ) و کاتالاز (CAT) نیز در سطح جایگزینی ۱۰ درصد به‌طور معنی‌داری بالاتر از تیمارهای شاهد و سطح جایگزینی ۳۰ درصد بود ($P < 0.05$). فعالیت کمپلمان (ACH50) در سطح جایگزینی ۱۰ درصد بیش از سایر تیمارها بود ($P < 0.05$). نتایج این پژوهش نشان داد که جایگزینی لارو مگس سرباز سیاه در سطح ۱۰ درصد بهترین عملکرد رشد را در قزل‌آلای رنگین‌کمان به‌همراه دارد، در حالی که افزایش سطح جایگزینی تا ۳۰ درصد تأثیر منفی بر شاخص‌های رشد، ایمنی و فیزیولوژیک نداشت. این یافته‌ها حاکی از آن است که لارو مگس سرباز سیاه می‌تواند به‌عنوان منبع پروتئینی قابل اعتماد و پایدار با عملکرد مطلوب در جیره‌های قزل‌آلای رنگین‌کمان مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: هبیتیان، مهرناز، سجادی، میرمسعود، فتح‌الهی، مهرداد، فلاحتکار، بهرام، صفری، رقیه، عشوری، قاسم (۱۴۰۵). تأثیر جایگزینی پودر ماهی با سطوح مختلف پودر لارو مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*) در جیره غذایی بر شاخص‌های رشد، ایمنی و آنتی‌اکسیدانی در بچه‌ماهیان قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*).

نشریه شیلات، مجله منابع طبیعی ایران، ۷۹ (۱)، ۱-۱۵. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2026.405572.1470>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2026.405572.1470>



۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، سرانه مصرف آبزیان در جهان به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ افزایشی که ناشی از رشد سریع جمعیت، تغییر الگوهای تغذیه و آگاهی فزاینده نسبت به نقش اساسی محصولات شیلاتی در سلامت انسان بوده است (FAO, 2022). در سال ۲۰۲۴، مجموع تولید جهانی صید و آبزی‌پروری با رشدی معادل ۲/۲ درصد به‌حدود ۱۹۲ میلیون تن رسید و نیمی از نیاز جهانی به منابع پروتئینی آبزی، از طریق آبزی‌پروری تأمین شد (FAO, 2024). توسعه این صنعت بیانگر چشم‌اندازی مثبت در تأمین پایدار غذای انسان است (Boyd et al., 2023). در این میان، تغذیه و فرمولاسیون خوراک یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در پایداری و بازده اقتصادی تولیدات آبزی‌پروری به‌شمار می‌رود. در بین اجزای خوراک، پروتئین به‌عنوان پرهزینه‌ترین و حیاتی‌ترین جزء، نقش اصلی را در رشد آبزیان ایفا می‌کند (Glencross et al., 2025).

پودر ماهی، یکی از مهم‌ترین منابع پروتئینی در آبزی‌پروری صنعتی است که به‌دلیل دارا بودن محتوای پروتئین بالا، الگوی متعادل اسیدهای آمینه ضروری، سطح بالای اسیدهای چرب امگا-۳ و خوش‌خوراکی مطلوب، نقش کلیدی در ارتقای عملکرد رشد و بازده غذایی ماهیان دارد (Peguero et al., 2024). با این وجود، کاهش منابع طبیعی مورد استفاده در تولید پودر ماهی و نوسانات قیمت آن، پایداری تأمین این منبع را در سال‌های اخیر تهدید کرده است (Nunes et al., 2022). منابع گیاهی نظیر کنجاله سویا و کلزا و محصولات جانبی حیوانی مانند پودر خون و گوشت از جمله جایگزین‌های بالقوه محسوب می‌شوند، اما محدودیت‌هایی همچون وجود ترکیبات ضدتغذیه‌ای، عدم تعادل اسیدهای آمینه و قابلیت هضم پایین، کاربرد آنها را محدود ساخته است (Shah et al., 2018). در سال‌های اخیر، توجه روزافزونی به استفاده از پودر حشرات به‌عنوان منبع پروتئینی نوظهور و سازگار با محیط‌زیست جلب شده است (Sicuro et al., 2021).

پودر حشرات، به‌ویژه در گونه‌هایی نظیر لارو مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*)، مگس خانگی (*Musca domestica*) و جیرجیرک خانگی (*Acheta domesticus*)، به‌عنوان مواد اولیه با ارزش تغذیه‌ای بالا معرفی شده‌اند (Nogales-Mérida et al., 2019). مزایای این منابع شامل محتوای بالای پروتئین (۳۰ تا ۵۸ درصد در وزن خشک)، وجود پروفایل اسیدهای آمینه مشابه با پودر ماهی، قابلیت رشد بر ضایعات آلی و اثرات زیست‌محیطی پایین‌تر است (Li et al., 2019). علاوه بر این، تولید صنعتی لارو حشرات در حال گسترش است و کمیسیون اروپا از سال ۲۰۱۷ استفاده از محصولات فرآوری‌شده حشرات را در خوراک آبزیان مجاز اعلام کرده است. با این حال، محتوای پایین اسیدهای چرب غیراشباع بلندزنجیره مانند ایکوزاپنتانویک اسید و دکوزاهگزانویک اسید و وجود کیتین در اسکلت خارجی لاروها از مهم‌ترین محدودیت‌های بیوشیمیایی در سطوح بالای جایگزینی پودر ماهی محسوب می‌شوند (Ewald et al., 2020). کاربرد پودر لارو حشرات به‌عنوان مکمل در خوراک ماهیان آب شیرین مانند تاس‌ماهی سبیری (*Acipenser baerii*)، کپور معمولی (*Cyprinus carpio*)، گربه‌ماهی زرد (*Acanthurus coeruleus*)، تیلاپای نیل (*Oreochromis niloticus*) و گربه‌ماهی آفریقایی (*Clarias gariepinus*) بررسی شده است (Cummins et al., 2017; Hu et al., 2017; Fawole et al., 2020; Nairuti et al., 2021).

لارو مگس سرباز سیاه به‌دلیل ترکیب متعادل اسیدهای آمینه، قابلیت هضم بالا و توانایی تبدیل زیست‌توده‌های آلی کم‌ارزش به پروتئین باکیفیت، پتانسیل بالایی برای استفاده در خوراک آبزیان دارد (Cummins et al., 2017). افزون بر ارزش تغذیه‌ای، این منبع حاوی ترکیبات زیست‌فعال ارزشمندی نظیر کیتین، پپتیدهای ضد میکروبی و اسیدهای چرب اشباع‌شده با زنجیره کوتاه است که می‌تواند با بهبود ایمنی و کارکرد آنتی‌اکسیدانی و مقاومت ماهیان در برابر استرس‌های محیطی را ارتقا دهند (English et al., 2021). پژوهش Xiao و همکاران (۲۰۲۴)، روی قزل‌آلای رنگین‌کمان نشان داد که استفاده از ۱۰ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه در جیره غذایی باعث افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدهید می‌شود. این تغییرات بیانگر کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و افزایش ظرفیت کلی مقابله با استرس اکسیداتیو بودند.

قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*) یکی از گونه‌های کلیدی در آبزی‌پروری تجاری ایران و جهان است که به‌دلیل رشد سریع، بازارپسندی بالا و قابلیت پرورش در تراکم‌های زیاد، دارای اهمیت ویژه‌ای در تولید پروتئین حیوانی با کیفیت است (Hoseini et al., 2020). نیاز بالا به پروتئین حیوانی در جیره این گونه، وابستگی به پودر ماهی را افزایش داده است. بنابراین

بررسی جایگزین‌های مناسب از جمله لارو مگس سرباز سیاه در این زمینه ضروری است. اگرچه شواهد متعددی از کارایی لارو مگس سرباز سیاه در تغذیه برخی ماهیان آب شیرین گزارش شده است، اما اطلاعات دقیق در خصوص اثرات آن بر شاخص‌های رشد، پاسخ‌های ایمنی و وضعیت آنتی‌اکسیدانی در قزل‌آلای رنگین‌کمان هنوز محدود است. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی امکان جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه در جیره غذایی این گونه طراحی شده است تا اثرات سطوح مختلف جایگزینی بر شاخص‌های رشد، آنتی‌اکسیدانی و ایمنی مورد بررسی قرار گیرد و سطح بهینه جایگزینی تعیین شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی علمی برای توسعه استفاده از منابع پروتئینی پایدار و ارتقای پایداری زیست‌محیطی در صنعت آبزی‌پروری فراهم سازد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. تأمین و سازگاری ماهیان

تعداد ۱۸۰ قطعه بچه‌ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان با میانگین وزنی تقریبی 5 ± 0.3 گرم (میانگین $\pm$ انحراف معیار) و میانگین طولی تقریبی 10 ± 0.3 سانتی‌متر از یک مرکز تکثیر و پرورش تجاری قزل‌آلا (واقع در رستم‌آباد، شهرکرد، ایران) تهیه شدند. ماهیان بلافاصله به محل آزمایش (مرکز آبزی‌پروری دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران) منتقل گردیدند و به مدت دو هفته در مخزن سازگاری ۳۰۰ لیتری، تحت شرایط محیطی یکسان نگهداری و با جیره غذایی استاندارد (جیره تجاری Grower1، ۱/۵ میلی‌متر، کارخانه فرادانه، شهرکرد، ایران) تغذیه شدند.

۲-۲. طرح آزمایشی و مدیریت پرورشی

پس از اتمام دوره سازگاری، ماهیان با استفاده از یک طرح کاملاً تصادفی به ۱۲ مخزن گرد فایبرگلاس (با ظرفیت ۳۰۰ لیتر) منتقل شدند. این ۱۲ مخزن شامل چهار تیمار تغذیه‌ای و سه تکرار برای هر تیمار بودند؛ به‌طوری که هر مخزن حاوی ۱۵ قطعه ماهی بود. دوره آزمایشی به مدت ۸ هفته به طول انجامید. غذادهی ماهیان در حد سیری و در سه نوبت (۷، ۱۴ و ۲۰) صورت گرفت. در ابتدای هر روز کاری، به منظور حفظ کیفیت محیط پرورش، عملیات سیفون کردن جهت حذف رسوبات آلی، فضولات متابولیک و بقایای خوراک انجام گرفت. پس از پایان فرآیند پاک‌سازی، به منظور کنترل مقادیر آمونیاک کل، نیتريت و سایر آلاینده‌های محلول، حدود ۳۰ درصد از حجم کل آب هر مخزن به صورت روزانه تعویض و با آب تازه و دارای کیفیت استاندارد جایگزین شد. همچنین شاخص‌های فیزیکی-شیمیایی و کیفیت آب پرورشی هر هفته در طول دوره آزمایش مورد سنجش قرار گرفت (Thorarensen, et al., 2015).

۲-۳. پارامترهای فیزیکی-شیمیایی آب

شاخص‌های کیفی آب در طول دوره آزمایش پایش شدند. اکسیژن محلول (8 ± 0.3 میلی‌گرم در لیتر)، دما (13 ± 0.5 درجه سانتی‌گراد) و اسیدیته (7 ± 0.2) به صورت روزانه با دستگاه اکسیژن سنج (OxyGuard, Birkerød, Denmark)، دماسنج دیجیتال (Testo, Lenzkirch, Germany) و pH متر رومیزی (Metrohm, Herisau, Switzerland) اندازه‌گیری گردید. غلظت آمونیاک کل^۱ (TAN) (0.05 ± 0.01 میلی‌گرم در لیتر) به صورت هفتگی با کیت رنگ‌سنجی (Sera, Heinsberg, Germany) براساس دستورالعمل کارخانه سنجش شد. دوره نوری محیط پرورش نیز بر روی یک رژیم ۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی تنظیم شده بود.

۲-۴. فرمولاسیون و ساخت جیره‌های آزمایشی

۲-۴-۱. فرمولاسیون جیره‌ها

برای ارزیابی تأثیر جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه، چهار جیره غذایی (تیمار) با سه تکرار تهیه شد:

- تیمار C (شاهد): بدون جایگزینی پودر ماهی

^۱Total Ammonia Nitrogen

- تیمار BSFL10: جایگزینی ۱۰ درصد پودر ماهی با پودر لارو مگس سرپاز سیاه
- تیمار BSFL20: جایگزینی ۲۰ درصد پودر ماهی با پودر لارو مگس سرپاز سیاه
- تیمار BSFL30: جایگزینی ۳۰ درصد پودر ماهی با پودر لارو مگس سرپاز سیاه

۲-۴-۲. ساخت و نگهداری جیره‌ها

اقلام خوراکی مورد نیاز برای ساخت جیره‌ها، از کارخانه فرادانه (شهرکرد، ایران) تهیه گردید. مواد اولیه براساس مقادیر تعیین شده در جدول ۱ مخلوط شد و پس از یکدست شدن کامل، جیره غذایی هر تیمار به صورت جداگانه با استفاده از دستگاه چرخ گوشت (به عنوان پلت ساز در مقیاس آزمایشگاهی) به شکل رشته‌های باریک درآورده شد. رشته‌ها در دمای محیط و در معرض هوای آزاد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند تا خشک شوند. در مرحله نهایی، رشته‌های خشک متناسب با اندازه دهان بچه ماهیان آسیاب شد و به صورت پلت یا حبه‌هایی به قطر ۱/۵ میلی متر تهیه گردیدند. بسته‌های غذایی مربوط به هر تیمار تا پایان دوره تغذیه، در دمای ۴ درجه سانتی گراد (در یخچال) نگهداری شدند (Hardy and Barrows, 2003).

جدول ۱- ترکیبات تشکیل دهنده جیره‌های آزمایشی (بر حسب درصد وزنی)

اقلام تشکیل دهنده (%)	جیره شاهد	BSFL10	BSFL20	BSFL30
پودر ماهی ساردین	۴۰/۰	۳۶/۰	۳۲/۰	۲۸/۰
پودر لارو مگس سرپاز سیاه	۰۰/۰	۵/۰	۱۰/۰	۱۵/۰
کنجاله سویا	۲۴/۰	۲۴/۰	۲۴/۰	۲۴/۰
گلوتن گندم	۱۰/۰	۱۰/۰	۱۰/۰	۱۰/۰
آرد گندم	۱۱/۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۱۱/۰
روغن گیاهی	۵/۳	۴/۸	۴/۳	۳/۸
روغن ماهی	۵/۳	۴/۸	۴/۳	۳/۸
مخلوط ویتامینه ^۱	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
مخلوط مواد معدنی ^۲	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
ژلاتین	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰
کولین کلراید	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
مونو کلسیم فسفات	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
ترکیب شیمیایی				
پروتئین (%)	۴۷/۴	۴۷/۴	۴۷/۵	۴۷/۶
چربی (%)	۱۳/۴	۱۳/۴	۱۳/۷	۱۳/۵
رطوبت (%)	۷/۹	۷/۸	۸/۰	۸/۰
خاکستر (%)	۶/۱	۶/۱	۶/۱	۶/۴
انرژی (MJ/kg)	۱۷/۲	۱۷/۲	۱۷/۳	۱۷/۲

محل تهیه اقلام جیره: کارخانه فرادانه، شهرکرد، ایران

محل تهیه پودر لارو مگس سرپاز سیاه: شرکت خصوصی زیست تبدیل، رشت، ایران

۱: ترکیب پیش مخلوط ویتامینه مصرفی حاوی ویتامین‌های محلول در چربی: ویتامین A: I.U.۱۲۰۰۰ در کیلوگرم، کوله کلسیفرول: I.U. ۲۵۰۰ در کیلوگرم، آهن: ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، منادین: ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم و محلول در آب: ریوفلاوین: ۴۰ میلی گرم در کیلوگرم، پیریدوکسین: ۴۰ میلی گرم در کیلوگرم، سیانو کوبالامین: ۰/۰۵ میلی گرم در کیلوگرم، تیامین: ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم، اسید فولیک: ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم، ویتامین C: ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم، بیوتین: ۲ میلی گرم در کیلوگرم، اسید پانتوتینیک: ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم
۲: ترکیب پیش مخلوط مواد معدنی شامل عناصر روری از جمله آهن: ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، روی: ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، منگنز: ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم، مس: ۵-۱۰ میلی گرم در کیلوگرم، ید: ۲-۱ میلی گرم در کیلوگرم، سلنیوم: ۰/۳ میلی گرم در کیلوگرم، فسفر: ۰/۸ درصد، سدیم: ۰/۳ درصد

BSFL10: میزان ۱۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرپاز سیاه

BSFL20: میزان ۲۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرپاز سیاه

BSFL30: میزان ۳۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرپاز سیاه

۲-۵. بیومتری (زیست‌سنجی)

اندازه‌گیری شاخص‌های زیست‌سنجی هر دو هفته یک بار در طول دوره آزمایش انجام شد. برای اطمینان از تخلیه کامل محتویات

دستگاه گوارش، غذادهی ۲۴ ساعت قبل از نمونه برداری در پایان آزمایش قطع گردید. سپس ماهیان با استفاده از محلول پودر گل میخک (با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر) بیهوش شدند (Small and Sneddon, 2003). وزن بدن و طول کل هر ماهی به ترتیب با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم و تخته بیومتری با دقت ۱ میلی متر اندازه گیری شد.

۲-۵-۱. سنجش عملکرد رشد و تغذیه

به منظور بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر عملکرد رشد و تغذیه ماهیان، شاخص های رشد و تغذیه با استفاده از روابط زیر به دست آمد (Cho and Kaushik, 1990).

$$\begin{aligned} \text{وزن کسب شده}^1 &= (\text{وزن نهایی (گرم)} - \text{وزن اولیه (گرم)}) \\ \text{شاخص وضعیت}^2 &= (\text{وزن ماهی (گرم)}) / (\text{طول کل (سانتی متر)}) \times 100 \\ \text{نرخ رشد ویژه}^3 &= ((\text{لگاریتم وزن نهایی (گرم)} - \text{لگاریتم وزن ابتدایی (گرم)}) / \text{تعداد روزها (زمان)}) \times 100 \\ \text{ضریب تبدیل غذایی}^4 &= \text{غذای خشک خورده شده (گرم به ازای ماده خشک)} / \text{وزن تر کسب شده (گرم)} \\ \text{افزایش وزن بدن}^5 &= ((\text{میانگین وزن نهایی (گرم)} - \text{میانگین وزن اولیه (گرم)}) / \text{وزن اولیه (گرم)}) \times 100 \\ \text{نرخ کارایی پروتئین}^6 &= \text{وزن به دست آمده ماهیان (گرم)} / \text{پروتئین خورده شده (گرم به ازای ماده خشک)} \\ \text{بقا}^7 &= (\text{تعداد ماهی ها در انتهای آزمایش} - \text{تعداد ماهی ها در ابتدای آزمایش}) \times 100 \end{aligned}$$

۲-۶-۱. نمونه برداری جهت سنجش شاخص های ایمنی و آنتی اکسیدانی

به منظور سنجش شاخص های ایمنی و آنتی اکسیدانی، از ماهیان مورد آزمایش (سه قطعه از هر تکرار؛ مجموعاً نه قطعه از هر تیمار غذایی) به وسیله سرنگ های انسولین یک میلی لیتری مجهز به سوزن شماره ۲۹-۳۰ گیج، آغشته به هیپارین از ورید ساقه دمی خون گیری به عمل آمد. سپس نمونه های خون در لوله های استریل قرار گرفته و پلاسمای خون با استفاده از سانتریفیوژ (به مدت ۱۵ دقیقه، در دور ۱۵۰۰ دور در دقیقه با دمای ۴ درجه سانتی گراد) توسط سمپلر جدا گردید. سرم های جدا شده توسط سمپلر به میکروتیوب های استریل منتقل شده و تا زمان اندازه گیری شاخص های مورد بررسی، در دمای ۸۰- درجه سانتی گراد نگهداری شدند (Martínez-Álvarez et al., 2005).

۲-۶-۱. فعالیت لایزوزیم پلاسما

مطابق روش Ellis و با تغییر نوع باکتری مورد استفاده انجام شد. بدین منظور، ۱/۷۵ میلی گرم بر میلی لیتر از سوسپانسیون باکتریایی *Micrococcus luteus* مقاوم به لایزوزیم به عنوان سوبسترا با مقادیر مشخصی از هر نمونه مخلوط شده و جذب نوری این محلول در مقابل شاهد (کووت حاوی بافر فسفات سدیم) در طول موج ۵۳۰ نانومتر برابر ۰/۷-۰/۶ تنظیم گردید. سپس ۵/۲ میلی لیتر از سوسپانسیون باکتریایی به کووت اضافه و ۴-۵ دقیقه به دمای تعادل رسید. به کووت شاهد، بافر و به کووت نمونه، پلاسما اضافه گردید. از بافر PBS به عنوان بلانک استفاده شده و مقدار لایزوزیم بر حسب میکروگرم بر میلی لیتر نمونه با استفاده از منحنی استاندارد در بافر سدیم فسفات کالیبره و از طریق روش کدورت سنجی محاسبه شد (Ellis, 1990).

۲-۶-۲. فعالیت مسیر فرعی کمپلمان ACH50

غلظت پروتئین کمپلمان ACH₅₀ سرم، به عنوان شاخصی از فعالیت سیستم کمپلمان، با استفاده از روش ایمونوتوربیدیمتری (Immunoturbidimetry) و کیت های تجاری پارس آزمون (کرج، ایران) تعیین شد. در این روش، پروتئین ACH₅₀ موجود در هر

¹Weight Gain

²Condition Factor

³Specific Growth Rate

⁴Feed Conversion Ratio

⁵Body Weight Increase

⁶Protein Efficiency Ratio

⁷Survival Rate

نمونه سرم با آنتی‌بادی‌های اختصاصی کیت واکنش داده و یک کمپلکس آنتی‌ژن-آنتی‌بادی ایجاد می‌کند که منجر به کدورت می‌شود. میزان کدورت تولید شده توسط جذب نوری در طول موج ۳۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. غلظت پروتئین ACH₅₀ برحسب میلی‌گرم بر میلی‌لیتر در مقایسه با منحنی استاندارد کیت‌های تجاری محاسبه گردید (Sunyer and Tort, 1995).

۲-۶-۳. کاتالاز

آنزیم کاتالاز براساس روش Goth با اندکی تغییرات مورد سنجش قرار گرفت (Goth, 1991). فعالیت آنزیم کاتالاز براساس فرآیند تجزیه پراکسید هیدروژن و تشکیل کمپلکس با ثبات با مولبیدات آمونیوم اندازه‌گیری شد. در این روش ۲۰۰ میکرولیتر از مایع رویی (پلازما) با ۱۰۰۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن و ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات (pH: ۷/۴) مخلوط و به مدت ۶۰ ثانیه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انکوباسیون گردید. سپس ۱۰۰۰ میکرولیتر ۳۲/۴ میلی‌مول بر لیتر مولبیدات سدیم به محلول واکنش افزوده شد و تغییرات رنگی کمپلکس مولبیدات و پراکسید هیدروژن در طول موج ۴۰۵ نانومتر قرائت شد. فعالیت آنزیم کاتالاز در نهایت براساس رابطه زیر محاسبه گردید (Goth, 1991).

$$271 \times (\text{جذب بلانک سه} - \text{جذب بلانک دو}) \div (\text{جذب بلاک یک} - \text{جذب عدد نمونه}) = (\text{KU.L} / 1) \text{ فعالیت کاتالاز}$$

در این رابطه، بلانک یک، شامل ۱ میلی‌لیتر سوپسترا (پراکسید هیدروژن، ۱ میلی‌لیتر مولبیدات و ۲ میلی‌لیتر آب مقطر) است. بلانک دو، شامل ۱ میلی‌لیتر سوپسترا (پراکسید هیدروژن، یک میلی‌لیتر مولبیدات و ۲ میلی‌لیتر بافر فسفات) بود. بلانک دو، شامل ۱ میلی‌لیتر بافر فسفات، ۱ میلی‌لیتر مولبیدات و ۲ میلی‌لیتر بافر فسفات بود.

۲-۶-۴. فعالیت انفجار تنفسی

برای ارزیابی انفجار تنفسی، ۲۵ میکرولیتر از خون هپارینه همراه با ۲۵ میکرولیتر محلول ۰/۲ درصد Nitro Blue Tetrazolium و رتکس و سپس ۵ میکرولیتر محلول Triton به محلول قبلی اضافه و مجدد ورتکس شد. محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای آزمایشگاه نگهداری شد (تا رنگ آن تیره شود). بعد از آن، مجدداً ورتکس گردید. سپس ۲۵ میکرولیتر از محلول را برداشته و به ۲۵ میکرولیتر Dimethylformamide اضافه شد و به مدت ۵ دقیقه با دور ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس ۵۰ میکرولیتر از محلول رویی برداشته شده و در داخل گوده‌های میکروپلیت ۹۶ خانه تخت قرار داده و با دستگاه الیزا (Thermo Fisher Scientific, Helsinki, Finland) در طول موج ۵۷۰ نانومتر ثبت گردید (Graham and Secombes, 1990).

۲-۷. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS (IBM, Version 24, Armonk, NY, USA) انجام شد. برای کنترل نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، برای کنترل همگنی واریانس‌ها از آزمون Levene و جهت مشخص نمودن اختلاف میانگین بین تیمارهای مختلف از تجزیه واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) استفاده شد. همچنین برای مقایسه میانگین‌ها، از آزمون Tukey استفاده شد. تحلیل‌ها در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام شد. نمودارها و جداول نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ تهیه گردید.

۳. یافته‌های پژوهشی

۳-۱. شاخص‌های رشد

براساس داده‌های جدول ۲، وزن نهایی، افزایش وزن، نرخ رشد ویژه، نسبت بازده پروتئین، درصد افزایش وزن بدن و ضریب تبدیل غذایی تحت تأثیر سطوح مختلف جایگزینی پودر لارو مگس سرباز سیاه قرار گرفتند ($P < 0/05$). در تمام شاخص‌های مذکور، سطح جایگزینی ۱۰ درصد به‌طور معنی‌داری بهترین عملکرد رشد را نشان داد ($P < 0/05$), در حالی‌که بین تیمارهای شاهد، سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ($P > 0/05$). افزون بر این، شاخص‌های ضریب چاقی و میانگین طول نهایی تحت تأثیر سطوح مختلف جایگزینی قرار نگرفتند ($P > 0/05$).

جدول ۲- عملکرد رشد بچه ماهیان قزل آلاهی رنگین کمان (*Oncorhynchus mykiss*)تغذیه شده با سطوح مختلف پودر لارو مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*) پس از هشت هفته آزمایش (میانگین $\pm$ انحراف معیار؛ $n = 3$).

تیمارها				شاخص
BSFL30	BSFL20	BSFL10	گروه شاهد	
$4/9 \pm 0/2$	$5/2 \pm 0/1$	$5/4 \pm 0/4$	$5/1 \pm 0/1$	وزن اولیه (گرم)
$25/7 \pm 2/6^b$	$24/3 \pm 1/7^b$	$30/8 \pm 6/2^a$	$23/3 \pm 6/1^b$	وزن نهایی (گرم)
$20/8 \pm 2/6^b$	$19/1 \pm 1/5^b$	$25/4 \pm 1/2^a$	$18/2 \pm 0/4^b$	افزایش وزن (گرم)
$10/6 \pm 0/7$	$10/8 \pm 0/3$	$9/5 \pm 0/5$	$10/5 \pm 0/1$	طول اولیه (سانتی متر)
$12/3 \pm 0/2$	$12/6 \pm 0/5$	$12/4 \pm 0/8$	$11/8 \pm 0/2$	طول نهایی (سانتی متر)
$1/3 \pm 0/0$	$1/2 \pm 0/2$	$1/6 \pm 0/2$	$1/4 \pm 0/0$	ضریب چاقی
$1/1 \pm 0/0^{ab}$	$1/1 \pm 0/0^{ab}$	$1/3 \pm 0/0^a$	$1/1 \pm 0/0^{ab}$	نرخ رشد ویژه (% در روز)
$1/0 \pm 0/1^a$	$1/1 \pm 0/0^a$	$0/8 \pm 0/0^b$	$1/2 \pm 0/0^a$	ضریب تبدیل غذایی
$419/4 \pm 52/6^{ab}$	$367/6 \pm 18/5^b$	$466/2 \pm 60/6^a$	$357/4 \pm 4/0^b$	درصد افزایش وزن بدن
$2/0 \pm 0/2^b$	$1/9 \pm 0/1^b$	$2/5 \pm 0/1^a$	$1/8 \pm 0/0^b$	نسبت بازده پروتئین
$73/3 \pm 13/3$	$66/6 \pm 17/6$	$62/2 \pm 7/7$	$66/6 \pm 13/3$	درصد بقا

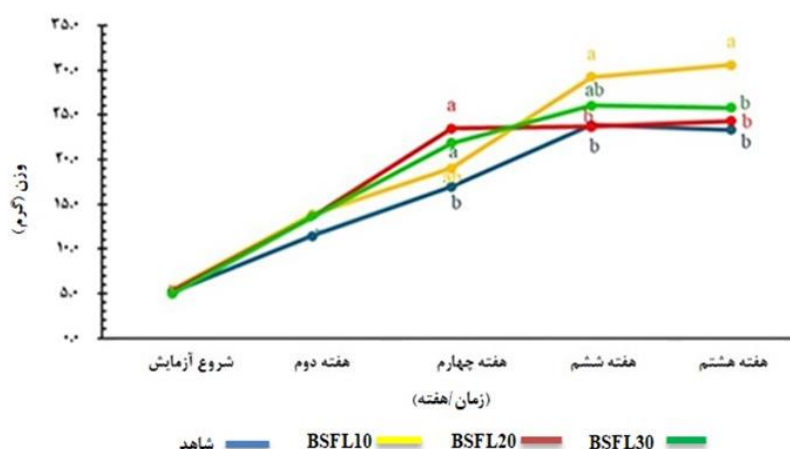
حروف انگلیسی متفاوت در هر ردیف نشان دهنده اختلاف معنی دار آماری در سطح ۰/۰۵ است.

BSFL20: میزان ۲۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

BSFL10: میزان ۱۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

BSFL30: میزان ۳۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

براساس نتایج شکل ۱، روند تغییرات میانگین وزن بچه ماهیان قزل آلاهی رنگین کمان طی دوره هشت هفته ای پرورش تحت تأثیر سطوح مختلف پودر لارو مگس سرباز سیاه قرار گرفت ($P < 0/05$). در دو هفته نخست، تفاوت معنی داری بین تیمارها مشاهده نشد ($P > 0/05$). در پایان هفته چهارم اختلاف معنی داری پدیدار شد ($P < 0/05$)، به طوری که سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد نسبت به شاهد کاهش معنی دار نشان دادند، در حالی که سطح جایگزینی ۱۰ درصد تفاوتی با شاهد نداشت ($P > 0/05$). در هفته ششم نیز اختلاف معنی دار میان تیمارها مشاهده شد ($P < 0/05$)؛ به گونه ای که سطح جایگزینی ۱۰ درصد بالاترین وزن را نسبت به شاهد و سطح جایگزینی ۲۰ درصد داشت ($P < 0/05$)، اما با سطح جایگزینی ۳۰ درصد اختلافی نداشت ($P > 0/05$). در پایان دوره (هفته هشتم)، سطح جایگزینی ۱۰ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه به طور معنی داری بیشترین وزن نهایی را نشان داد ($P < 0/05$) و بین تیمار شاهد و سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد تفاوت معنی داری دیده نشد ($P > 0/05$).



شکل ۱- نمودار روند افزایش میانگین وزن در بچه ماهیان قزل آلاهی رنگین کمان (*Oncorhynchus mykiss*) تغذیه شده با سطوح مختلف پودر لارو مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*) (میانگین $\pm$ انحراف معیار؛ $n = 3$).

حروف انگلیسی متفاوت بر روی نمودار نشان دهنده اختلاف معنی دار آماری در سطح ۰/۰۵ است.

BSFL20: میزان ۲۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

BSFL10: میزان ۱۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

BSFL30: میزان ۳۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

۳-۲. شاخص‌های ایمنی

براساس نتایج جدول ۳، فعالیت لایزوزیم بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری نشان داد ($P < 0.05$)؛ به‌طوری‌که سطح جایگزینی ۱۰ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه نسبت به شاهد و سطح جایگزینی ۳۰ درصد بالاتر بود ($P < 0.05$)، ولی با سطح جایگزینی ۲۰ درصد اختلاف معنی‌داری نداشت ($P > 0.05$). بین شاهد و سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد نیز تفاوتی مشاهده نشد ($P > 0.05$). همچنین فعالیت کمپلمان، در میان تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت ($P < 0.05$) و بیشترین مقدار مربوط به سطح جایگزینی ۱۰ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه بود ($P < 0.05$)، در حالی‌که میان شاهد و سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ($P > 0.05$).

جدول ۳. فعالیت لایزوزیم و مسیر فرعی کمپلمان در بچه ماهیان قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*)

تغذیه شده با سطوح مختلف پودر لارو مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*) پس از هشت هفته آزمایش (میانگین $\pm$ انحراف معیار؛ $n = 3$).

تیمارها				
BSFL30	BSFL20	BSFL10	گروه شاهد	شاخص
$37/93 \pm 1/38^b$	$39/4 \pm 1/25^{ab}$	$45/27 \pm 4/31^a$	$36/8 \pm 11/66^b$	لایزوزیم پلاسما ($\mu\text{g/ml}$)
$124/47 \pm 2/49^b$	$129/5 \pm 1/11^b$	$135/63 \pm 3/11^a$	$123/8 \pm 2/16^b$	کمپلمان (ACH_{50}) (mg/dl)

حروف انگلیسی متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

BSFL20: میزان ۲۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

BSFL10: میزان ۱۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

BSFL30: میزان ۳۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

۳-۳. فعالیت آنتی‌اکسیدانی

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، بین تیمارهای مختلف از نظر فعالیت آنزیم کاتالاز تفاوت معنی‌داری مشاهده شد ($P < 0.05$). فعالیت این آنزیم در سطح جایگزینی ۱۰ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه به‌طور معنی‌داری بالاتر از تیمار شاهد و سطح جایگزینی ۳۰ درصد بود ($P < 0.05$)، اما نسبت به سطح جایگزینی ۲۰ درصد تفاوت معنی‌داری نشان نداد ($P > 0.05$). همچنین، بین تیمار شاهد و سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ($P > 0.05$). نتایج سنجش فعالیت انفجار تنفسی نیز نشان داد که بین تیمار شاهد و سطوح جایگزینی حاوی پودر لارو مگس سرباز سیاه تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ($P > 0.05$).

جدول ۴. فعالیت آنزیم کاتالاز و سطح انفجار تنفسی در بچه ماهیان قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*)

تغذیه شده با سطوح مختلف پودر لارو مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*) پس از هشت هفته آزمایش (میانگین $\pm$ انحراف معیار؛ $n = 3$).

تیمارها				
BSFL30	BSFL20	BSFL10	گروه شاهد	شاخص
$17/2 \pm 1/23^b$	$20/9 \pm 0/97^{ab}$	$24/33 \pm 2/67^a$	$16/77 \pm 1/11^b$	کاتالاز (u/ml)
$46/00 \pm 2/00$	$53/67 \pm 3/05$	$55/67 \pm 6/66$	$45/00 \pm 4/00$	*NBT (mg/ml)

حروف انگلیسی متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

BSFL20: میزان ۲۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

BSFL10: میزان ۱۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

BSFL30: میزان ۳۰ درصد جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه

*NBT: فعالیت انفجار تنفسی

۴. بحث و نتیجه‌گیری نهایی

در پژوهش حاضر، تأثیر جایگزینی پودر ماهی با سطوح مختلف پودر لارو مگس سرباز سیاه بر عملکرد رشد، پاسخ‌های ایمنی و آنتی‌اکسیدانی بچه‌ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان با هدف ارزیابی کارایی پودر لارو مگس سرباز سیاه به‌عنوان منبع پروتئینی پایدار و غنی در تغذیه این گونه اقتصادی بررسی شد. نتایج نشان داد که سطح جایگزینی ۱۰ درصد به‌طور معنی‌داری موجب بهبود وزن

نهایی، ضریب رشد ویژه و کاهش ضریب تبدیل غذایی نسبت به شاهد گردید. همچنین، جایگزینی پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه تا سطح جایگزینی ۳۰ درصد اثرات منفی بر رشد ماهی قزل آلا رنگین کمان نداشت. این یافته‌ها نشان می‌دهند پودر لارو مگس سرباز سیاه نه تنها در سطح جایگزینی پایین‌تر (BSFL10) می‌تواند به عنوان یک محرک رشد طبیعی در جیره غذایی قزل آلا رنگین کمان عمل کند، بلکه در سطوح بالاتر جایگزینی (BSFL20 و BSFL30) نیز عملکردی معادل جیره‌های مبتنی بر پودر ماهی فراهم می‌کند. یافته‌های این پژوهش هم‌راستا با مطالعاتی است که استفاده از پودر لارو مگس سرباز سیاه را به عنوان یک منبع جایگزین پروتئینی در تغذیه ماهیان پیشنهاد کرده‌اند (Makkar et al., 2014). جایگزینی پودر ماهی با ۲۸/۴ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه در جیره لارو مگس سرباز سیاه در جیره لارو ماهی سی‌باس آسیایی (*Lates calarifer*) اثر منفی بر عملکرد رشد نداشت (Katya et al., 2017)، که با نتایج مطالعه حاضر هم‌راستا است. همچنین جایگزینی ۳۳ درصد پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه در جیره غذایی ماهی تیلایپای نیل موجب بالاترین رشد در این گونه شد (Nairuti et al., 2021). این نتایج با روند کلی مشاهده شده در مطالعه حاضر مطابقت نسبی دارد؛ به‌ویژه از این منظر که سطوح مشخصی از پودر لارو مگس سرباز سیاه می‌توانند بدون اثرات منفی، موجب بهبود رشد شوند، با این تفاوت که در مطالعه حاضر بهبود رشد در سطح جایگزینی ۱۰ درصد بارزتر بود. همچنین مطالعه Shati و همکاران (۲۰۲۲)، نشان داد که گنجاندن پودر لارو مگس سرباز سیاه در جیره تیلایپای نیل تا سطح ۱۰۰ درصد، بیشترین افزایش وزن را به دنبال داشت، سپس تیمار ۵۰ درصد و در نهایت گروه شاهد قرار گرفتند. همچنین گزارش شده است که سطوح بالای پودر لارو مگس سرباز سیاه باعث کاهش وزن به دست آمده در تیلایپای نیل (Devic et al., 2018) و در ماهی‌های *Ctenopharyngodon idella* (Lu et al., 2020) می‌شود که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت ندارد. این ناهمخوانی‌ها در نتایج مطالعات را می‌توان به تفاوت‌های گونه‌ای، سطوح جایگزینی و شیوه‌های فرآوری پودر لارو مگس سرباز سیاه نسبت داد. در برخی گزارش‌ها عنوان شده است که عدم تعادل اسیدهای آمینه و مقادیر بالای کیتین موجود در پودر لارو مگس سرباز سیاه می‌تواند موجب کاهش قابلیت هضم پروتئین در برخی گونه‌های ماهی شود (Kariuki et al., 2024). مطالعات نشان داده‌اند در مقادیر بالای مصرف پودر حشرات، کیتین موجود در حشرات با کاهش زمان عبور غذا از روده و ممانعت از تجزیه آنزیمی پروتئین‌ها، اثر منفی بر قابلیت هضم پروتئین بر جای می‌گذارد. این اثر، به‌ویژه در گونه‌های تک‌مده‌ای و آبزیانی که به هضم کارآمد پروتئین متکی هستند، می‌تواند بیشتر نمود پیدا کند (Marono et al., 2015). همچنین ماهیان گوشت‌خوار به دلیل نیاز بالاتر به پروتئین‌های حیوانی و اسیدهای آمینه ضروری، حساسیت بیشتری نسبت به تغییر منابع پروتئینی در جیره خود دارند. بنابراین در این ماهیان، جایگزینی پودر لارو مگس سرباز سیاه که عمدتاً منبع پروتئین حیوانی است، محدود به درصدهای پایین‌تر است (Oliveira et al., 2024). در ماهیان همه‌چیزخوار به دلیل برخورداری از دستگاه گوارش با قابلیت سازگاری بالاتر و فعالیت گسترده‌تر آنزیم‌های گوارشی، توانایی استفاده مؤثر از منابع پروتئینی متنوع‌تر وجود دارد. از این رو، این گونه‌ها قادرند بخش قابل توجهی از پروتئین جیره (حدود ۵۰ تا ۷۵ درصد) را از پودر لارو مگس سرباز سیاه تأمین کرده و بدون بروز کاهش معنی‌دار در شاخص‌های رشد، عملکرد تغذیه‌ای مناسبی حفظ کنند (Gasco et al., 2020). در این ماهیان، احتمالاً ترکیبات زیست‌فعال موجود در پودر لارو از جمله اسیدهای چرب ضروری و آنتی‌اکسیدان‌ها به بهبود سلامت روده و سیستم ایمنی کمک می‌کنند که عملکرد رشد را بهبود می‌بخشد. هرچند پودر لارو مگس سرباز سیاه واجد پتانسیل ارزشمندی به عنوان منبع پروتئین جایگزین است اما، درصد بهینه جایگزینی پودر لارو مگس سرباز سیاه در جیره ماهیان با توجه به نوع رژیم غذایی و خصوصیات فیزیولوژیک گونه‌ها متفاوت است و نیازمند تعیین شاخص‌های رشد، کارایی تبدیل غذایی و سلامت دستگاه گوارش است. همچنین اثربخشی آن در رشد به متغیرهایی نظیر کیفیت فرآوری، توازن اسیدهای آمینه و طراحی فرمولاسیون جیره وابسته است.

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که سطح جایگزینی ۱۰ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه در جیره قزل آلا رنگین کمان باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم لایروزیم و کمپلمان نسبت به تیمار شاهد می‌شود که بیانگر تحریک ایمنی ذاتی است. در سطح جایگزینی ۲۰ درصد اگرچه مقادیر شاخص‌های ایمنی نسبت به شاهد بیشتر بود، ولی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. این الگو نشان‌دهنده یک رابطه وابسته به دوز با بیشینه پاسخ ایمنی در سطح جایگزینی ۱۰ درصد است. بنابراین نمی‌توان با قطعیت از اثربخشی ایمونولوژیک این سطح صحبت کرد. همچنین سطح جایگزینی ۳۰ درصد، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد

نشان داد. نتایج این تحقیق با گزارش Yildirim-Aksoy و همکاران (۲۰۲۰)، روی تیلاپای نیل همسو است، به طوری که افزودن ۱۰ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه به جیره موجب افزایش معنی دار لایزوزیم و مقاومت در برابر باکتری *Streptococcus iniae* شد، در حالی که سطوح بالاتر پودر لارو مگس سرباز سیاه بهبود بیشتری ایجاد نکرد. مشابه این روند، Guerreiro و همکاران (۲۰۲۲)، در ماهی باس اروپایی (*Dicentrarchus labrax*) گزارش کردند که جایگزینی ۵ تا ۱۰ درصد پودر بارو مگس سرباز سیاه، فعالیت لایزوزیم و انفجار تنفسی را بالا برد، اما جایگزینی ۲۰ درصد یا بیشتر اثر واضحی نداشت. Fawole و همکاران (۲۰۲۰) در گربه ماهی آفریقایی نشان دادند که استفاده از ۷/۵ تا ۱۵ درصد پودر لارو مگس سرباز سیاه، شاخص های ایمنی غیراختصاصی و بقا در برابر باکتری *Aeromonas hydrophila* را بهبود داد، ولی مقادیر بالاتر موجب افت جزئی پاسخ ها شد. در مطالعات Chemello و همکاران (۲۰۲۲)، بر ماهی سیم دریایی (*Sparus aurata*)، افزایش ۱۰ درصدی پودر لارو مگس سرباز سیاه منجر به تقویت ایمنی ذاتی و سلامت روده شد، در حالی که سطوح بیشتر با کاهش جزئی عملکرد ایمنی همراه بود. نتایج پژوهش های Xiao و همکاران (۲۰۲۴)، روی ۳۸ مطالعه نیز تأیید کرد که افزایش بیش از حد پودر لارو مگس سرباز سیاه می تواند موجب کاهش شاخص های ایمنی و آنتی اکسیدانی شود، و کارایی بالاتر در سطوح پایین تا میانی و در ماهیان همه چیزخوار مشاهده می شود. بررسی مطالعات نشان می دهد که مکانیسم های تقویت ایمنی ناشی از تغذیه با پودر لارو مگس سرباز سیاه، اگرچه در اغلب گونه های آبی مشابه گزارش شده اند، اما شدت هر عامل در گونه ها یا شرایط مختلف متفاوت است. تفاوت در نتایج مطالعات مختلف می تواند ناشی از شرایط محیطی صنعتی و نوع فرآوری پودر لارو مگس سرباز سیاه نیز باشد. از آنجا که تقویت ایمنی در سطح جایگزینی ۱۰ درصد احتمالاً به وجود ترکیبات زیست فعال این منبع، مانند دوز پایین کیتین، کیتوزان، اسیدهای چرب زنجیره متوسط و پپتیدهای ضد میکروبی، مرتبط است؛ این ترکیبات می توانند از طریق فعال سازی فاگوسیتوز، تحریک سلول های ایمنی غیراختصاصی و موجب ارتقاء سلامت ایمنی ماهی شوند (Vogel et al., 2018). به نظر می رسد پاسخ سیستم ایمنی ذاتی نسبت به پودر لارو مگس سرباز سیاه وابسته به مقدار مصرف باشد؛ به گونه ای که بیشینه تحریک ایمنی در سطح میانی (BSFL10) مشاهده شده است و افزایش بیش از این مقدار ممکن است به دلیل حضور با مقادیر بالاتر ترکیبات سخت هضم نظیر کیتین، باعث ایجاد مشکلات گوارشی، کاهش هضم و جذب و در نتیجه اثرات کاهشی بر ایمنی شود. بنابراین، جایگزینی پودر لارو مگس سرباز سیاه در سطح ۱۰ درصد، با ایجاد تحریک سیستم ایمنی ذاتی و تقویت ظرفیت دفاعی، می تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود سلامت عمومی و افزایش مقاومت ماهیان پرورشی در برابر بیماری ها به کار گرفته شود، در حالی که سطوح جایگزینی بالاتر فاقد چنین اثر معنی داری بودند. در نهایت، این داده ها پتانسیل بالای پودر لارو مگس سرباز سیاه را به عنوان افزودنی تغذیه ای ایمن، مؤثر و جایگزین بخشی از پودر ماهی در آبی پروری تأیید می کند. با این وجود، تأیید این ارتباط، نیازمند انجام تحقیقات تکمیلی در سطوح بالاتر جایگزینی است.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد جایگزینی بخشی از پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه موجب بهبود شاخص های آنتی اکسیدانی بچه ماهی قزل آلا رنگین کمان، به ویژه در سطح ۱۰ درصد شد. در این سطح، فعالیت آنزیم کاتالاز به طور معنی داری نسبت به شاهد افزایش یافت و بیانگر ارتقای ظرفیت خنثی سازی رادیکال های آزاد و تقویت حفاظت سلولی در برابر استرس اکسیداتیو بود. تفاوت معنی داری بین سطوح ۱۰ و ۲۰ درصد مشاهده نشد، در حالی که سطح ۲۰ درصد نسبت به شاهد و سطح ۳۰ درصد نیز اختلاف معنی داری نداشت، که احتمالاً به کاهش هضم پذیری در اثر افزایش فیبر کیتینی مربوط است. ارزیابی NBT نشان داد اختلاف معنی داری بین تیمارها وجود نداشت، که حاکی از پایداری عملکرد اکسیداتیو سلول های ایمنی در برابر تغییر ترکیب جیره است. در همین راستا، نتایج Guerreiro و همکاران (۲۰۲۲)، در باس اروپایی و همچنین نتایج Fayed و همکاران (۲۰۲۳)، در تیلاپای نیل نشان داد که، تغذیه با سطوح پایین تا میانی پودر لارو مگس سرباز سیاه باعث افزایش معنی دار فعالیت کاتالاز و نیز بهبود سایر شاخص های آنزیم های آنتی اکسیدانی می شود. همچنین در باس اروپایی (Abdel-Latif et al., 2021) و مارماهی *Channa striata* (Siddaiah et al., 2023)، جایگزینی تا ۵۰ درصد پودر ماهی با پودر لارو مگس سرباز سیاه باعث افزایش فعالیت کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، گلوکاتایون پراکسیداز و ارتقاء ایمنی غیراختصاصی شد. اثر مثبت مشاهده شده احتمالاً به ترکیب هم افزای کیتین و مشتقات آن، اسید لوریک و پپتیدهای ضد میکروبی در پودر لارو مگس سرباز سیاه مربوط است. علاوه

بر این، نبود ترکیبات ضدتغذیه‌ای و کیفیت بالای پروتئین و لیپیدها در پودر لارو مگس سرباز سیاه احتمالاً شرایط متابولیک بدن را برای عملکرد بهتر سیستم دفاعی فراهم کرده است. برخلاف یافته‌های این پژوهش، Pascon و همکاران (۲۰۲۵)، گزارش کردند که کاهش کارایی کیتین در سطوح بالای جایگزینی با افت هضم‌پذیری پروتئین و افزایش ترکیبات کم‌هضم همراه است. همچنین Shiau و همکاران (۱۹۹۹)، در تیلاپپای هیبرید (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) نشان دادند مصرف زیاد کیتین می‌تواند اثرات آنتی‌اکسیدانی را محدود سازد. علاوه بر این، مطالعات انجام شده ب روی کپور معمولی (Li et al., 2017) و قزل‌آلای رنگین‌کمان (Elia et al., 2018)، تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیم کاتالاز در جیره‌های حاوی پودر لارو مگس سرباز سیاه نشان ندادند. تفاوت در گونه‌های ماهی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ذاتی، نوع و سطح جایگزینی پودر لارو مگس سرباز سیاه، بافت نمونه‌برداری، مدت تغذیه و روش فرآوری لارو می‌تواند علت این اختلاف‌ها باشد. براساس نتایج حاضر، استفاده هدفمند از پودر لارو مگس سرباز سیاه در جیره بچه‌ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان می‌تواند از طریق ترکیب اثرات مستقیم آنتی‌اکسیدانی و غیرمستقیم پری‌بیوتیکی، به تقویت سیستم دفاعی و کاهش استرس اکسیداتیو کمک کند. این اثر در محدوده جایگزینی مشخصی بهینه است و افزایش بیش از آن مزیتی ندارد.

۵. نتیجه‌گیری نهایی

در مجموع، نتایج نشان داد که پودر لارو مگس سرباز سیاه تا سطح ۳۰ درصد بدون افت معنی‌دار عملکرد قابل استفاده است، اما سطح ۱۰ درصد بیشترین اثر مثبت را بر رشد و ایمنی بچه‌ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان داشت. سطوح ۲۰ و ۳۰ درصد نیز عملکردی مشابه شاهد نشان دادند و احتمال می‌رود در دوره‌های طولانی‌تر موجب سازگاری متابولیک شوند. در نتیجه، انتخاب سطح بهینه باید بر پایه توازن میان اهداف تولید، سلامت و پایداری اقتصادی صورت گیرد.

تشکر و قدردانی

این مطالعه برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول می‌باشد؛ بدینوسیله از همکاری و مساعدت‌های فنی و پشتیبانی‌های ارزشمند کارخانه فرادانه در اجرای بخش‌های عملی پروژه نیز صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان گزارش نشده است.

References

- Abdel-Latif, H.M., Abdel-Tawwab, M., Khalil, R.H., Metwally, A.A., Shakweer, M.S., Ghetas, H.A., Khallaf, M.A., 2021. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in diets of European seabass: Effects on antioxidative capacity, non-specific immunity, transcriptomic responses, and resistance to the challenge with *Vibrio alginolyticus*. *Fish and Shellfish Immunology* 111, 111-118. DOI: 10.1016/j.fsi.2021.01.013
- Boyd, C., McNevin, A.A., Hasan, M.R., New, M.B., Davis, D.A., 2023. Overview of aquaculture feeds: Global impacts of ingredient use. In: Davis, D.A. (Ed.), *Feed and Feeding Practices in Aquaculture*. 2nd ed. Woodhead Publishing, Cambridge, UK. 3–25. DOI: 10.1016/B978-0-12-823627-7.00001-1
- Chemello, G., Zarantonello, M., Randazzo, B., Gioacchini, G., Truzzi, C., Cardinaletti, G., Riolo, P., Olivotto, I., 2022. Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens*) enriched with *Schizochytrium* sp. on zebrafish (*Danio rerio*) reproductive performances. *Aquaculture* 550, 737853. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.737853
- Cho, C.Y., Kaushik, S.J., 1990. Nutritional energetics in fish: energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *World Review of Nutrition and Dietetics* 61, 132-172. DOI: 10.1159/000417529

- Cummins, V.C., Rawles, S.D., Thompson, K.R., Velasquez, A., Kobayashi, Y., Hager, J., Webster, C.D., Hyde, N.M., Gannam, A.L., Twibell, R.G., 2017. Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larval meal as partial or total replacement of marine fish meal in diets for juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 473, 337-344. DOI: 10.1111/eff.70000
- Devic, E., Leschen, W., Murray, F., Little, D.C., 2018. Growth performance, feed utilization and body composition of advanced nursing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal. *Aquaculture Nutrition* 24, 416-423. DOI: 10.1111/anu.12573
- Elia, A.C., Capucchio, M.T., Caldaroni, B., Magara, G., Dörr, A.J.M., Biasato, I., Biasibetti, E., Righetti, M., Pastorino, P., Prearo, M., 2018. Influence of *Hermetia illucens* meal dietary inclusion on the histological traits, gut mucin composition and the oxidative stress biomarkers in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 496, 50-57. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.07.009
- Ellis, A.E., 1990. Lysozyme assays. *Techniques in Fish Immunology* 1, 101-103. DOI: 10.1001/anu.19873
- English, G., Ray, A.J., Zhu, L., Tomberlin, J.K., Hahn, D.A., Tarone, A.M., 2021. The nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae reared on different waste streams for use as aquaculture feed. *Aquaculture* 530, 735732. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.07.009
- Ewald, N., Vidakovic, A., Langeland, M., Kiessling, A., Sampels, S., Lalander, C., 2020. Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) possibilities and limitations for modification through diet. *Waste Management* 102, 40-47. DOI: 10.1111/anu.12573
- FAO., 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Food Security Information for Action Pactical Guide, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 266.
- FAO., 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 252.
- Fawole, F.J., Adeoye, A.A., Tiamiyu, L.O., Ajala, K.I., Obadara, S.O., Ganiyu, I.O., 2020. Substituting fish meal with *Hermetia illucens* in the diets of African catfish (*Clarias gariepinus*): Effects on growth, nutrient utilization, haemato-physiological response, and oxidative stress biomarker. *Aquaculture* 518, 734849. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2019.734849
- Fayed, W., Mansour, A.T., Zaki, M.A.A., Omar, E.A., Mohammadi, G., Sallam, G., El-Haroun, E.R., Moustafa, M.M., 2023. Water quality change, growth performance, health status in response to dietary inclusion of black soldier fly larvae meal in the diet of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Annals of Animal Science* 24, 2478. DOI: 10.1111/raq.12666
- Gasco, L., Acuti, G., Bani, P., Dalle Zotte, A., Danieli, P.P., De Angelis, A., Fortina, R., Marino, R., Parisi, G., Piccolo, G., 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: 1743209 1828051/10.1080/X.2020
- Glencross, B., Papadimitriou, V., Huyben, D., 2025. Removing trophic levels from the fish feed-chain: evaluating the nutritional and microbiome effects of feeding brewery protein isolate as an alternative to insect meal to Atlantic salmon. *Aquaculture* 606, 742797. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2025.742797
- Goth, L., 1991. A simple method for determination of serum catalase activity and revision of reference range. *Clinica Chimica Acta* 196, 143-151. DOI: 8981-0009/10.1016(91)90067-M
- Graham, S., Secombes, C.J., 1990. Cellular requirements for lymphokine secretion by rainbow trout *Salmo gairdneri* leucocytes. *Developmental and Comparative Immunology* 14, 59-68. DOI: 10.1016/0145-305X(90)9008-3
- Guerreiro, I., Castro, C., Serra, C.R., Coutinho, F., Couto, A., Peres, H., Pousão-Ferreira, P., Gasco, L., Gai, F., Oliva-Teles, A., Enes, P., 2022. Oxidative stress response of meagre to dietary black soldier fly meal. *Animals* 12, 32-39. DOI: 10.3390/ani12233232
- Hardy, R.W., Barrows, F.T., 2003. Diet formulation and manufacture. In: Halver, J.E., Hardy, R.W., (Eds.), *Fish Nutrition*, Academic Press, San Diego, USA, 505-600.
- Hoseini, S.M., Yousefi, M., Mirghaied, A.T., Paray, B.A., Hoseinifar, S.H., Van Doan, H., 2020. Effects of rearing density and dietary tryptophan supplementation on intestinal immune and antioxidant responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 528, 735-837. DOI: 10.3390/biology10060505

- Hu, J., Wang, G., Huang, Y., Sun, Y., He, F., Zhao, H., Li, N., 2017. Effects of substitution of fish meal with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) meal, in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) diets. *Israeli Journal of Aquaculture Bamidgah* 69, 1-9
- Kariuki, M.W., Barwani, D.K., Mwash, V., Kioko, J.K., Munguti, J.M., Tanga, C.M., Kiiru, P., Gicheha, M.G., Osuga, I.M., 2024. Partial replacement of fish meal with black soldier fly larvae meal in Nile tilapia diets improves performance and profitability in earthen pond. *Scientific African* 24, 223-253. DOI: 10.1016/j.sciaf.2024.e02222
- Katya, K., Borsra, M., Ganesan, D., Kuppusamy, G., Herriman, M., Salter, A., Ali, S.A., 2017. Efficacy of insect larval meal to replace fish meal in juvenile barramundi, *Lates calcarifer* reared in freshwater. *International Aquatic Research* 9, 303-312. DOI: 10.1007/s40071-017-0178-x
- Li, S., Ji, H., Zhang, B., Zhou, J., Yu, H., 2017. Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in diets for juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. *Jian*): Growth performance, antioxidant enzyme activities, digestive enzyme activities, intestine and hepatopancreas histological structure. *Aquaculture* 477, 62-70. DOI: 10.1111/raq.12888
- Li, Q., Zheng, L., Qiu, N., Cai, H., Tomberlin, J.K., Yu, Z., 2019. Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) for biodiesel and protein production. *Waste Management* 102, 880-888. DOI: 10.1093/sysbio/syac069
- Lu, R., Chen, Y., Yu, W., Lin, M., Yang, G., Qin, C., Meng, X., Zhang, Y., Ji, H., Nie, G., 2020. Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal can replace soybean meal in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) diets. *Aquaculture Reports* 18, 100520. DOI: 10.106/j.aqrep.2020.100520
- Makkar, H.P., Tran, G., Heuzé, V., Ankers, P., 2014. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology* 197, 1-33. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008
- Marono, S., Piccolo, G., Loponte, R., Di Meo, C., Attia, Y.A., Nizza, A., Bovera, F., 2015. In vitro crude protein digestibility of *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* insect meals and its correlation with chemical composition traits. *Italian Journal of Animal Science* 14, 3889. DOI: 10.4081/ijas.2015.3889
- Martínez-Álvarez, R.M., Morales, A.E., Sanz, A., 2005. Antioxidant defenses in fish: biotic and abiotic factors. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 15, 75-88. DIO: 10.1007/s11160-005-7846-4
- Nairuti, R.N., Munguti, J.M., Waidbacher, H., Zollitsch, W., 2021. Growth performance and survival rates of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) reared on diets containing black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal. *Journal of Land Management, Food and Environment* 19, 75-90. DOI: 10.1060/105287.2021.164055
- Nogales-Mérida, S., Gobbi, P., Józefiak, D., Mazurkiewicz, J., Dudek, K., Rawski, M., Kierończyk, B., Józefiak, A., 2019. Insect meals in fish nutrition. *Reviews in Aquaculture* 11, 1080-1103. DOI: org/10.1111/raq.12281
- Nunes, A.J., Dalen, L.L., Leonardi, G., Burri, L., 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
- Oliveira, C.G.D., Freitas, D.D.A., Ribeiro, P.A.P., Teixeira, R.R.C., Silva, R.F.D., Gamarano, P.G., Araújo, R.D.D., Prado, V.G.L., Guilherme, H.D.O., Paulino, R.R., Costa, L.S., 2024. Impact of replacing fish meal with black soldier fly (*Hermetia illucens*) meal on diet acceptability in juvenile Nile tilapia: Palatability and nutritional and health considerations for dietary preference. *Aquaculture Research* 6, 340995. DOI: 10.1155/2024/3409955
- Pascon, G., Opere Akinyi, R., Cardinaletti, G., Daniso, E., Messina, M., 2025. Chitin and its effects when included in aquafeed. *Aquaculture International* 33, 202-224. DOI: 10.1007/s10499-025-01879-z
- Peguero, D.A., Gold, M., Velasquez, L., Niu, M., Zurbrugg, C., Mathys, A., 2024. Physical pretreatment of three biowastes to improve black soldier fly larvae bioconversion efficiency. *Waste Management* 178, 280-291. DIO: 10.1016/j.wasman.2024.02.024
- Shah, M.R., Lutzu, G.A., Alam, A., Sarker, P., Kabir Chowdhury, M.A., Parsaeimehr, A., Liang, Y., Daroch, M., 2018. Microalgae in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry. *Journal of Applied Phycology* 30, 197-213. DOI: 10.1007/s10811-017-1234-z
- Shati, S., Opiyo, M., Nairuti, R., Shoko, A., Munyi, F., Ogello, E., 2022. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal improves growth performance, feed utilization, amino acids profile, and economic benefits of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, L.). *Aquatic Research* 5, 238-249. DOI: 11,1897/215876.5401.1236

- Shiau, S.Y., Yu, Y.P., Hwa, S., Hsieh, J.F., Lin, S.J., 1999. The influence of chitin and chitosan on the growth of tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*. *Aquaculture* 179, 439-446. DOI: 10.1016/S0044-8486(99)00177-5
- Sicuro, B., Piccinno, M., Daprà, F., Gai, F., Vilella, S., 2021. Utilization of rice protein concentrate in Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) nutrition. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 15, 311-317. DOI: 10.105/j.anifeedsci.2023.115597
- Siddaiah, G., Kumar, R., Kumari, R., Chandan, N., Debbarma, J., Damle, D., Das, A., Giri, S., 2023. Dietary fishmeal replacement with *Hermetia illucens* (black soldier fly) larvae meal affected production performance, whole body composition, antioxidant status, and health of snakehead (*Channa striata*) juveniles. *Animal Feed Science and Technology* 297, 115597. DOI: 10.105/j.anifeedsci.2023.115597
- Small, B.C., Sneddon, L.U., 2003. Physiological responses of fish to anesthesia with clove oil and tricaine methanesulfonate (MS-222). *Aquaculture Research* 34, 1041-1048. DIO: 10.1046/j.1365-2109.2003.00922.x
- Sunyer, J.O., Tort, L., 1995. Natural hemolytic and bactericidal activities of sea bream *Sparus aurata* serum are effected by the alternative complement pathway. *Veterinary Immunology and Immunopathology* 45, 333-345. DIO: 10.1016/0165-2427(94)05430-Z
- Thorarensen, H., Kubiriza, G.K., Imsland, A.K., 2015. Experimental design and statistical analyses of fish growth studies. *Aquaculture* 448, 483-490. DIO: 10.1016/j.aquaculture.2015.05.018
- Vogel, H., Müller, A., Heckel, D.G., Gutzeit, H., Vilcinskas, A., 2018. Nutritional immunology: diversification and diet-dependent expression of antimicrobial peptides in the black soldier fly *Hermetia illucens*. *Developmental and Comparative Immunology* 78, 141-148. DOI: 10.1016/j.dci.2018.09.008
- Xiao, W., Zhang, Y., Li, H., Chen, M., Zhou, J., 2024. Effects of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) meal on growth performance, immune response, and oxidative status in aquaculture: A meta-analysis. *Comparative Immunology Reports* 8, 101-162. DOI: 20.1026/j.aqrep.2024.182373
- Yildirim-Aksoy, M., Eljack, R., Schrimsher, C., Beck, B.H., 2020. Use of dietary frass from black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, in hybrid tilapia (Nile × Mozambique, *Oreochromis niloticus* × *O. mozambique*) diets improves growth and resistance to bacterial diseases. *Aquaculture Reports* 17, 100373. DOI: 10.1016/j.aqrep.2020.100373