University of Guilan with collaboration of Iranian Aquaculture Society

Aquatic Animals Nutrition

Vol. 11, No. 4, 2026, pages: 71-84
DOI: 10.22124/janb.2026.34551.1315

RESEARCH PAPER **OPEN ACCESS**

Assessment of growth performance, immune responses, and hepatic enzyme activities in juvenile beluga sturgeon (*Huso huso*) fed different levels of selenium nanoparticles

SeyedJavad Abolghasemi[1*], Mahmoud Mohseni[2], Shayan Pourseyedian[1]
1- Department of Fisheries, Tal.C., Islamic Azad University, Talesh, Guilan, Iran
2- International Sturgeon Research Institute, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Guilan, Iran

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

KEYWORDS
Feed additives
Fish
immunity
Growth
performance
Huso huso
Nano-
selenium

ABSTRACT

Introduction: Selenium is an essential trace element in aquaculture nutrition, playing a pivotal role in antioxidant defense, physiological homeostasis, growth, and immune competence through its integration into selenoproteins and selenoenzymes. Nanoscale selenium (nano-Se, NS) has garnered significant attention as an efficacious feed additive in aquafeeds due to its superior bioavailability, lower toxicity, and enhanced biological activity relative to conventional selenium sources. While numerous studies have documented the effects of nano-Se in various teleost species, empirical data regarding its application in beluga sturgeon (*Huso huso*), a highly valuable species native to the Caspian Sea, remain scarce. Therefore, this study investigated the effects of dietary nano-Se supplementation at various levels on the growth performance, non-specific immune responses, and hepatic health indicators of juvenile *Huso huso*.

Materials and Methods: A total of 120 juvenile *Huso huso* (initial weight: 50.34 ± 1.97 g) were randomly distributed into 12 fiberglass tanks (500 L capacity, 50 cm water depth). The fish were acclimated to the experimental conditions for 7 days using a commercial diet. The feeding trial followed a completely randomized design with four dietary treatments including a control diet (NS_0) and diets supplemented with 0.1 ($NS_{0.1}$), 0.2 ($NS_{0.2}$), and 0.4 ($NS_{0.4}$) mg/kg in triplicate over a 10-week period. Fish were fed to apparent satiation thrice daily at 08:00, 15:00, and 21:00 h. At the end of the trial, fish were fasted for 48 hours prior to sampling. All fish from each tank were weighed and measured for length. Blood samples were collected from the caudal vein using

heparinized syringes after anesthesia, and plasma was separated by centrifugation and used to determine lysozyme activity, immunoglobulin M (IgM) levels, alternative complement pathway (ACH_{50}) activity, and hepatic enzyme profiles. Data were analyzed using One-Way ANOVA followed by Duncan's multiple range test at a significance level of $P<0.05$ using SPSS software.

Results and Discussion: Dietary nano-Se supplementation, particularly at 0.2 mg/kg, significantly increased final weight and specific growth rate, while concurrently reducing the feed conversion ratio compared to the control group ($P<0.05$). This growth enhancement may be attributed to the regulatory role of selenium in metabolism, its reinforcement of antioxidant defenses, and the upregulation of growth-related gene expression. Regarding immune responses, plasma lysozyme, IgM, and ACH_{50} activities were significantly elevated in the 0.2 and 0.4 mg/kg nano-Se treatments ($P<0.05$), indicating a strengthened non-specific humoral barrier in *Huso huso*. Furthermore, the activities of all measured hepatic enzymes (alanine aminotransferase, aspartate aminotransferase, and alkaline phosphatase) were significantly reduced in fish fed nano-Se supplemented diets ($P<0.05$). This decline suggests improved hepatocyte integrity and cell membrane stability, driven by mitigated oxidative stress.

Conclusion: In conclusion, dietary supplementation of nano-Se at 0.2 mg/kg significantly enhances growth performance, improves feed utilization efficiency, boosts non-specific immunity, and promotes hepatic health in juvenile *H. huso*. Consequently, this level is suggested as an optimal dietary inclusion dose to support overall growth and physiological well-being during juvenile sturgeon rearing.

Conflicts of interest: The authors have no conflicts of interest to declare for the publication of the present work.

Acknowledgments: We sincerely thank the respected experts and personnel of the Beluga Farm for their assistance in the preparation, maintenance of the fish, and the advancement of this research.

*Corresponding author: abolghasemi99@iau.ac.ir

دانشگاه گیلان با مشارکت انجمن آبزی‌پروری ایران

تغذیه آبزیان

سال یازدهم، شماره سوم، دی ۱۴۰۴، صفحات ۸۴-۷۱

DOI: 10.22124/janb.2026.34551.1315

"مقاله پژوهشی"

ارزیابی پاسخ‌های رشد، ایمنی و فعالیت آنزیم‌های کبدی فیل‌ماهی (*Huso huso*) جوان تغذیه شده با سطوح مختلف نانوذرات سلنیوم

سید جواد ابوالقاسمی[1*]، محمود محسنی[2]، شایان پورسیدیان[1]

۱- گروه شیلات، واحد تالش، دانشگاه آزاد اسلامی، تالش، گیلان

۲- انستیتو تحقیقات بین المللی ماهیان خاویاری، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، گیلان

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

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر سطوح مختلف نانوسلنیوم اضافه شده به جیره غذایی بر عملکرد رشد، پاسخ‌های ایمنی غیر اختصاصی و شاخص‌های کبدی فیل‌ماهی جوان (*Huso huso*) انجام شد. به این‌منظور، ۱۲۰ عدد فیل‌ماهی جوان با وزن اولیه ۱/۹۷ ± ۵۰/۳۴ گرم در ۱۲ مخزن فایبرگلاس ۵۰۰ لیتری (۱۰ عدد ماهی در هر مخزن) توزیع شدند. تیمارها (سه تکرار) شامل شاهد (فاقد نانوذرات سلنیوم، NS_0)، ۰/۱ mg/kg ($NS_{0.1}$)، ۰/۲ mg/kg ($NS_{0.2}$) و ۰/۴ mg/kg ($NS_{0.4}$) نانوسلنیوم بودند و ماهیان طی دوره ۱۰ هفته‌ای تا حد سیری روزانه سه مرتبه با آنها تغذیه شدند. در طی دوره، میانگین دما و اکسیژن به‌ترتیب معادل °C ۱۷/۳ و mg/L ۸/۲ بود. در پایان دوره، شاخص‌های رشد، تغذیه، ایمنی شامل فعالیت لایزوزیم، ایمونوگلوبولین M، فعالیت مسیر جایگزین کمپلمان (ACH_{50}) و آنزیم‌های پلاسمایی کبد بررسی شدند. نتایج نشان داد که افزودن نانوسلنیوم در سطح ۰/۲ mg/kg، موجب بهبود معنی‌دار وزن نهایی، نرخ رشد ویژه و کاهش ضریب تبدیل غذایی نسبت به گروه شاهد می‌شود؛ به‌طوری‌که وزن نهایی در این تیمار حدود ۲۸٪ بیش از گروه شاهد بود ($P<0/05$). فعالیت لایزوزیم، ایمونوگلوبولین M و ACH_{50} پلاسما در تیمارهای ۰/۲ mg/kg و ۰/۴ mg/kg به‌طور معنی‌دار افزایش یافت ($P<0/05$). همچنین، فعالیت تمامی آنزیم‌های کبدی در تیمارهای دریافت‌کننده نانوسلنیوم کاهش معنی‌دار نشان داد ($P<0/05$). در مجموع، افزودن ۰/۲ mg/kg نانوسلنیوم در جیره به‌دلیل بهبود عملکرد رشد، افزایش کارایی مصرف خوراک، تقویت دستگاه ایمنی غیر اختصاصی و ارتقای شاخص‌های سلامت کبدی به‌عنوان دوز مطلوب و کاربردی در جیره غذایی این گونه پیشنهاد می‌شود و می‌تواند کارایی تولید را در مزارع پرورشی بهبود بخشد.

کلمات کلیدی

افزودنی‌های غذایی

ایمنی ماهیان

عملکرد رشد

فیل‌ماهی

نانوسلنیوم

نویسنده مسئول: abolghasemi99@iau.ac.ir

مقدمه

آبزی‌پروری به‌عنوان یکی از بخش‌های کلیدی تأمین پروتئین حیوانی، نقش مهمی در امنیت غذایی جهان ایفا می‌کند و با افزایش جمعیت جهانی، توسعه تولید پایدار در این بخش بیش از پیش ضروری شده است (van Riel et al. 2023). یکی از راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار افزایش سطح تراکم سیستم‌های پرورشی است که اگرچه موجب ارتقای بازده می‌شود، اما همزمان بروز استرس‌های محیطی و شیوع بیماری‌ها را نیز افزایش می‌دهد (Boyd et al. 2020). در این شرایط، تغذیه مناسب و استفاده از افزودنی‌های کارآمد، از مهم‌ترین راهکارهای بهبود رشد، سلامت، ایمنی و کاهش اثرات تنش‌زا در ماهیان پرورشی به شمار می‌روند (Tacon and Metian, 2015; Dawood et al. 2018; El-Dahhar et al. 2024). در این میان، عناصر معدنی کمیاب به‌دلیل نقش مؤثر در تقویت سیستم دفاع ضد اکسایشی، بهبود جذب مواد مغذی و ارتقای کارایی جیره، جایگاه ویژه‌ای در تغذیه آبزیان یافته‌اند (Khan et al. 2017; Chakroborty et al. 2025).

سلنیوم یکی از ریزمغذی‌های ضروری است که در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیک، به‌ویژه از طریق مشارکت در ساختار و عملکرد سلنوپروتئین‌ها، نقش کلیدی دارد و از یاخته‌ها در برابر آسیب اکسایشی محافظت می‌کند (Saremi et al. 2024; Ahmed et al. 2025). در سیستم‌های پرورشی متراکم، تأمین کافی سلنیوم از طریق جیره اهمیت بیشتری می‌یابد، زیرا کمبود این عنصر می‌تواند با اختلال در فعالیت ضد اکسایشی، کاهش رشد و افزایش حساسیت به استرس همراه باشد (Wang et al. 2021; Mohammady et al. 2024). اگرچه سلنیوم در دو شکل معدنی و آلی در جیره‌ها استفاده می‌شود، اما نانوسلنیوم در سال‌های اخیر به‌دلیل زیست‌فراهمی بالاتر، سمیت کمتر، پایداری مناسب و فعالیت زیستی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Sumana et al. 2023; Sharif-Kanani et al. 2024; El-Dahhar et al. 2024). این فرم می‌تواند با افزایش کارایی سنتز سلنوپروتئین‌ها و بهبود وضعیت فیزیولوژیک ماهی، در ارتقای عملکرد تولید نقش مؤثری داشته باشد (Khalil et al. 2023; Rezaei et al. 2024).

مطالعات انجام‌شده در گونه‌های مختلف ماهیان نشان داده‌اند که نانوسلنیوم می‌تواند رشد، کارایی خوراک، ظرفیت ضد اکسایشی، پاسخ ایمنی و مقاومت در برابر تنش را بهبود بخشد. برای نمونه، در تیلاپیای نیل (*Oreochromis niloticus*)، استفاده از نانوسلنیوم موجب بهبود رشد، کارایی تغذیه‌ای و ایمنی شد (Neamat-Allah et al. 2019). همچنین در باس دریایی آسیایی (*Lates calcarifer*)، افزایش رشد و مقاومت به استرس گزارش شده است (Mohtashemipour et al. 2024). نتایج مشابهی نیز در کپور معمولی *Cyprinus carpio* (Sharif-Kanani et al. 2024)، قزل‌آلای رنگین‌کمان *Oncorhynchus mykiss* (Naderi et al. 2017) و کپور علفخوار *Ctenopharyngodon idella* (Yu et al. 2020) مشاهده شده است. با وجود این، سطح بهینه سلنیوم بسته به گونه، شرایط پرورش و فرم مصرفی متفاوت است و همچنان نیاز به بررسی‌های اختصاصی در گونه‌های مختلف وجود دارد (Khan et al. 2017; Ahmed et al. 2025).

فیل‌ماهی (*Huso huso*) به‌عنوان بزرگ‌ترین و ارزشمندترین گونه ماهیان خاویاری بومی دریای خزر، به‌دلیل کیفیت ممتاز گوشت و خاویار، جایگاهی راهبردی در صنعت آبزی‌پروری جهان دارد. با وجود این، طولانی بودن دوره پرورش و حساسیت‌های فیزیولوژیک این گونه، ضرورت بهینه‌سازی جیره غذایی برای دستیابی به بیشینه توان بالقوه رشد و تقویت دستگاه ایمنی را دوچندان می‌کند (Falahatkar and Efatpanah, 2016; Ciulli et al. 2020). به رغم گزارش‌های متعدد از اثرات مثبت نانوسلنیوم بر ماهیان استخوانی، اطلاعات در خصوص پاسخ‌های فیزیولوژیک ماهیان خاویاری به این نانوذره بسیار اندک است. از سوی دیگر، بررسی اثر نانوسلنیوم بر پروفایل آنزیمی کبد در کنار شاخص‌های ایمنی، می‌تواند دیدگاه جامع‌تری از عملکرد این افزودنی در فیل‌ماهی ارائه دهد. تاکنون، مطالعه‌ای که به‌طور اختصاصی اثر سطوح مختلف نانوسلنیوم خالص (بدون ترکیب با دیگر ویتامین‌ها) را بر عملکرد رشد و وضعیت فیزیولوژیک فیل‌ماهی جوان بررسی کرده باشد، انجام نشده است (Sohrabi et al. 2021). لذا، پژوهش حاضر به بررسی کارایی رشد و پاسخ ایمنی

فیل‌ماهی جوان پس از تغذیه با سطوح مختلف نانوسلنیوم در جیره این گونه پرداخت.

مواد و روش‌ها

تهیه و نگهداری ماهیان

تعداد ۱۲۰ قطعه فیل‌ماهی جوان (متوسط وزن اولیه ۲ g ± ۵۰/۳) از مزرعه خصوصی بلوگا در بخش سنگر، گیلان تهیه و در ۱۲ مخزن فایبرگلاس ۵۰۰ لیتری با عمق آب ۵۰ cm توزیع شدند. برای سازگاری اولیه، ماهیان به‌مدت ۷ روز با جیره تجاری پایه شرکت فرادانه (شهرکرد، ایران) با قطر ۳ mm تغذیه شدند که شامل ۴۴٪ پروتئین خام، ۱/۵٪ فیبر خام، ۱۴٪ چربی خام، ۱۰٪ خاکستر و ۱۰٪ رطوبت بود. در طی دوره تحقیق فراسنجه‌های کیفی آب مانند میزان دما، اکسیژن و pH به صورت روزانه اندازه‌گیری شد و به‌ترتیب شامل ۰/۱ ± ۱۷/۳ °C، ۰/۲ ± ۸/۲ mg/L و ۰/۲ ± ۷/۸ بودند.

تهیه جیره غذایی

سطوح آزمایشی نانوسلنیوم بر مبنای میزان خالص مکمل اضافه شده به جیره پایه محاسبه شد. نانوسلنیوم (خلوص ۹۹٪/۹۹، اندازه ۵۰-۳۰ nm؛ شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان، مشهد، ایران) به‌صورت محلول در آب، روی جیره پایه پودر شده افشانه شد. خمیر حاصل توسط چرخ‌گوشت صنعتی به رشته‌های ۳ میلی‌متری تبدیل و در دمای °C ۴۵ به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شد. پلت‌ها تا زمان مصرف در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

طراحی آزمایش

این پژوهش در قالب کاملاً تصادفی با ۴ تیمار و ۳ تکرار (۳ = n) به‌مدت ۱۰ هفته اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل شاهد (فاقد نانوذرات سلنیوم، NS0)، ۰/۱ mg/kg (NS0.1)، ۰/۲ mg/kg (NS0.2) و ۰/۴ mg/kg (NS0.4) نانوسلنیوم در جیره بود (Sohrabi et al. 2021). تغذیه ماهیان تا حد سیری ظاهری در سه نوبت طی ساعات ۸:۰۰، ۱۵:۰۰ و ۲۱:۰۰ انجام شد. روزانه دو مرتبه تمامی مخازن یک ساعت قبل و پس از آخرین وعده غذادهی، سیفون شدند.

بررسی عملکرد رشد

در پایان دوره تغذیه، ۴۸ ساعت قبل از نمونه‌گیری، تغذیه ماهیان متوقف شد. تمامی ماهیان از هر مخزن با محلول پودر گل میخک (۵۰ mg/L) بیهوش (Adel et al. 2016) و از نظر وزن و درازا بررسی شدند. برای زیست‌سنجی از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ g و تخته زیست‌سنجی با دقت ۱ mm استفاده شد. ارزیابی روند رشد و عملکرد تغذیه‌ای ماهیان توسط معادله‌های زیر انجام شد (Falahatkar, 2015):

وزن کسب شده (WG[1]): $WG\ (g) = \text{وزن نهایی} - \text{وزن ابتدایی}$

نرخ رشد ویژه (SGR[2]): $SGR\ (\text{درصد به ازای روز}) = (\ln \text{وزن نهایی} - \ln \text{وزن ابتدایی}) / \text{تعداد روزها (زمان)} \times 100$

افزایش وزن بدن (BWI[3]): $BWI\ (\%) = \text{وزن کسب شده (g)} / \text{وزن ابتدایی (g)} \times 100$

ضریب چاقی (CF[4]): $CF = [\text{وزن} / (\text{طول کل})^3] \times 100$

ضریب تبدیل غذایی (FCR[5]): $FCR = \text{غذای خشک مصرفی} / \text{وزن کسب شده}$

برای بررسی مصرف کل غذا در مراحل مختلف آزمایش، تمامی ضایعات از حوضچه‌ها سیفون شده و سپس غذای خورده نشده از مدفوع ماهیان جداسازی شد. با اندازه‌گیری وزن تعداد پلت‌های خورده نشده و وزن خشک اولیه، مصرف غذا محاسبه شد (De Silva and Anderson 1994).

نمونه برداری از خون

[1] Weight gain
[2] Specific growth rate
[3] Body weight increase
[4] Condition factor
[5] Feed conversion ratio

پس از اتمام دوره تغذیه، برای ارزیابی شاخص‌های خونی ماهیان، ۵ عدد ماهی از هر تکرار (۱۵ ماهی به‌ازای هر تیمار) به‌شکل تصادفی صید شدند. پس از بیهوشی با اسانس میخک، توسط سرنگ هپارینه از سیاهرگ ناحیه ساقه دمی آنها خون‌گیری به عمل آمد. حجمی از نمونه خون از طریق سرنگ‌های هپارینه به لوله‌های شماره‌گذاری شده برای انجام مطالعه فاکتورهای بیوشیمیایی و ایمنی منتقل شد. نمونه خون موجود در تیوب با دور g ۳۰۰۰ به‌مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شده و پلاسمای آن جداسازی و توسط سمپلر به تیوب‌های مجزا انتقال داده شد. نمونه‌های پلاسما تا انجام آزمایش در دمای °C ۸۰- نگهداری شدند.

بررسی شاخص‌های ایمنی

برای اندازه‌گیری سطوح فعالیت لایزوزیم، mg/mL ۱/۷۵ از سوسپانسیون باکتریایی *Micrococcus luteus* مقاوم به لایزوزیم به‌عنوان سوبسترا با مقادیر مشخصی از هر نمونه مخلوط و جذب نوری این محلول در مقابل بلانک (کووت حاوی بافر فسفات سدیم) در طول موج nm ۵۴۰ برابر ۰/۶-۰/۷ تنظیم شد. سپس، mL ۲/۵ از سوسپانسیون باکتریایی به کووت اضافه و ۵-۴ دقیقه به دمای تعادل رسید. به کووت بلانک، بافر و به کووت نمونه، پلاسما اضافه شد. از بافر PBS به‌عنوان بلانک استفاده شد و مقدار لایزوزیم نمونه با استفاده از منحنی استاندارد در بافر سدیم فسفات کالیبره و از طریق روش کدورت‌سنجی محاسبه شد. یک واحد فعالیت آنزیم لایزوزیم، بر مبنای کاهش جذب ۰/۰۰۱ در دقیقه تعریف می‌شود (Ellis 1990). شاخص ایمونوگلوبولین M (IgM) [1] بر مبنای روش ایمونوتوربیدومتریک و به‌وسیله کیت سنجش بایرکس فارس (شیراز، ایران) و دستورالعمل مربوطه اندازه‌گیری شد. بر اساس دستورالعمل، ابتدا µL ۲۵۰ معرف اول (R1: بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار با pH = ۷/۴، حاوی پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰ گرم بر لیتر و کلرید سدیم ۸/۹ گرم بر لیتر) به پلاسمای هر یک از تکرارها اضافه و پس از ۵ دقیقه به‌وسیله اسپکتروفتومتر در طول موج nm ۳۴۰ خوانش شدند. پس از گذشت ۵ دقیقه، µL ۵۰ از معرف دوم (R2: پادتن ضد IgM، کلرید سدیم ۸/۹ گرم بر لیتر و سدیم آزید ۰/۹۵ گرم در لیتر) افزوده و مجدداً در طول موج پیشین خوانش شدند. با داشتن غلظت کالیبراتور و رسم منحنی استاندارد، غلظت IgM بر اساس mg/dL محاسبه شد (Zhang et al. 2020). فعالیت ACH50، بر اساس روش Amar و همکاران (۲۰۰۰) و بر پایه همولیز گلبول‌های قرمز خرگوش (RArbc) اندازه‌گیری شد. در این آزمایش، ابتدا منحنی همولیز یاخته‌ای ترسیم و سپس فعالیت کمپلمان با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد که در این فرمول، k حجم پلاسما (بر حسب mL) است و موجب ۵۰٪ همولیز می‌شود و عدد ۰/۵ به‌عنوان یک ضریب ثابت به‌کار رفته است:

$$ACH_{50}\ (U/mL) = k \times (\text{فاکتور رقت}) \times ۰/۵$$

طول‌موج nm ۳۴۰ خوانش شد (Schmidt and Schmidt, 1963). برای اندازه‌گیری فعالیت آلکالین فسفاتاز در پلاسما نیز از روش کالریمتریک مبتنی بر بستر پی-نیتروفنیل فسفات استفاده شد. این آنزیم، پی-نیتروفنیل فسفات را به پی-نیتروفنول هیدرولیز می‌کند و میزان آن در طول موج nm ۴۰۵ خوانده می‌شود (Bessey et al. 1946).

سنجش آنزیم‌های پلاسمایی کبد

این سنجش‌ها با کیت‌های تجاری بایرکس فارس (شیراز، ایران) و مطابق شیوه‌نامه شرکت سازنده انجام شد. فعالیت آلانین آمینوترانسفراز در پلاسما با روش آنزیمی-کالریمتریک بر پایه واکنش آلانین با آلفاکتوگلوتارات سنجیده شد. در این واکنش، پیرووات حاصل توسط آنزیم LDH به لاکتات تبدیل و با مصرف NADH، کاهش جذب نوری در طول‌موج nm ۳۴۰ با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. فعالیت آسپارتات آمینوترانسفراز نیز از طریق واکنش ترانس‌آمیناسیون میان آسپارتات و آلفاکتوگلوتارات و متعاقباً تبدیل اگزالواستات به مالات با آنزیم مالات دهیدروژناز سنجش شد که طی آن، میزان کاهش جذب نوری ناشی از اکسایش NADH در

سنجش آماری

داده‌های حاصل از این پژوهش در تمامی مراحل، ابتدا از نظر نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها به‌ترتیب توسط آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و آزمون Levene بررسی شدند. تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل به روش آنالیز واریانس

[1] Immunoglobulin M

یک‌طرفه (One-Way ANOVA) با استفاده از آزمون Duncan در سطح P<۰/۰۵ انجام شد. بررسی آماری داده‌ها در نرم‌افزار SPSS V.16 (Chicago Inc., IL) انجام شد.

نتایج

نتایج مربوط به شاخص‌های رشد و تغذیه فیل‌ماهی جوان پس از ۱۰ هفته تغذیه با جیره‌های حاوی سطوح مختلف نانوذرات سلنیوم در جدول ۱ ارائه شده است. وزن نهایی تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت به‌طوری‌که بیشترین وزن نهایی در تیمار ۰/۲ mg/kg نانوسلنیوم مشاهده شد که به‌طور معنی‌دار بیش از تیمار شاهد بود (P<۰/۰۵). روند مشابهی در وزن کسب شده مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که تیمارهای دریافت‌کننده نانوسلنیوم وزن کسب شده بالاتری نسبت به شاهد داشتند و بیشترین مقدار آن در تیمار ۰/۲ mg/kg ثبت شد (P<۰/۰۵). نرخ رشد ویژه نیز در تیمارهای حاوی نانوسلنیوم افزایش یافت و تیمارهای $NS_{0.2}$ و $NS_{0.4}$ مقادیر بالاتری نسبت به تیمار شاهد نشان دادند (P<۰/۰۵). ضریب تبدیل غذایی در تیمارهای ۰/۲ mg/kg و ۰/۴ mg/kg به‌طور معنی‌دار کمتر از تیمار شاهد بود (P<۰/۰۵).

جدول ۱ عملکرد رشد فیل‌ماهی جوان (*Huso huso*) تغذیه شده با جیره‌های حاوی سطوح مختلف نانوسلنیوم به‌مدت ۱۰ هفته (میانگین ± انحراف معیار، ۳ = n)

Table 1 Growth performances of juvenile beluga (*Huso huso*) fed diets containing different levels of nano-selenium for 10 weeks (mean ± SD, n = 3)

Growth indices	Treatments			
	NS_0	$NS_{0.1}$	$NS_{0.2}$	$NS_{0.4}$
Initial weight (g)	50.58 ± 1.71	50.41 ± 2.35	50.19 ± 1.92	50.16 ± 1.93
Final weight (g)	274.49 ± 13.99^{c}	315.50 ± 12.26^{b}	351.07 ± 7.70^{a}	334.71 ± 9.23^{ab}
Weight gain (g)	223.91 ± 15.69^{b}	265.09 ± 14.54^{a}	300.88 ± 8.46^{a}	284.55 ± 7.49^{a}
Specific growth rate (%/day)	2.42 ± 0.12^{b}	2.62 ± 0.12^{ab}	2.78 ± 0.07^{a}	2.71 ± 0.02^{a}
Body weight increase (%)	443.68 ± 45.88^{b}	527.59 ± 54.65^{ab}	600.31 ± 34.28^{a}	567.54 ± 11.28^{a}
Condition factor	0.38 ± 0.02^{b}	0.43 ± 0.02^{a}	0.47 ± 0.02^{a}	0.43 ± 0.01^{a}
Feed intake (g/fish)	272.90 ± 3.55^{b}	284.97 ± 0.74^{a}	273.00 ± 2.14^{b}	276.93 ± 3.95^{b}
Feed conversion ratio	1.22 ± 0.09^{a}	1.08 ± 0.06^{a}	0.91 ± 0.02^{b}	0.97 ± 0.02^{b}

Different superscript letters in the same row indicate significant differences among treatments (P<0.05). NS_0 (Control diet without selenium nanoparticles), $NS_{0.1}$ (0.1 mg/kg selenium nanoparticles), $NS_{0.2}$ (0.2 mg/kg selenium nanoparticles), and $NS_{0.4}$ (0.4 mg/kg selenium nanoparticles)

نتایج شاخص‌های ایمنی غیر اختصاصی فیل‌ماهی جوان تغذیه شده با سطوح مختلف نانوسلنیوم در جدول ۲ ارائه شده است. فعالیت لایزوزیم سرم تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت، به‌طوری‌که تیمارهای ۰/۲ mg/kg و ۰/۴ mg/kg بالاترین مقادیر را نشان دادند و به‌طور معنی‌دار بیش از تیمار شاهد بودند (P<۰/۰۵). میزان IgM نیز روند مشابهی داشت، به‌طوری‌که بیشترین مقادیر در تیمارهای $NS_{0.2}$ و $NS_{0.4}$ مشاهده شد که به‌طور معنی‌دار بالاتر از تیمار شاهد بود (P<۰/۰۵). علاوه بر این، فعالیت ACH_{50} در تیمارهای دریافت‌کننده نانوسلنیوم افزایش یافت، به‌طوری‌که تیمار $NS_{0.2}$ بالاترین مقدار را نشان داد (P<۰/۰۵).

نتایج مربوط به فعالیت آنزیم‌های کبدی فیل‌ماهی جوان تغذیه شده با جیره‌های حاوی سطوح مختلف نانوسلنیوم در شکل ۱ ارائه شده است. فعالیت آنزیم آلانین آمینوترانسفراز (شکل A۱) تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت، به‌طوری‌که کمترین مقدار در تیمار $NS_{0.4}$ و پس از آن در تیمار $NS_{0.2}$ مشاهده شد که اختلاف معنی‌دار با شاهد داشتند (P<۰/۰۵). فعالیت آنزیم آسپارتات آمینوترانسفراز (شکل B۱) نیز روند مشابهی را نشان داد؛ به‌طوری‌که کمترین مقادیر در تیمارهای $NS_{0.2}$ و $NS_{0.4}$ مشاهده شد که به‌طور معنی‌دار کمتر از شاهد بود (P<۰/۰۵). فعالیت آلکالین فسفاتاز (شکل C۱) نیز در تیمارهای دریافت‌کننده نانوسلنیوم کاهش یافت، به‌طوری‌که کمترین مقادیر در

تیمارهای $NS_{0.4}$ و $NS_{0.2}$ مشاهده شد که اختلاف معنی‌دار با شاهد داشتند ($P<۰/۰۵$).

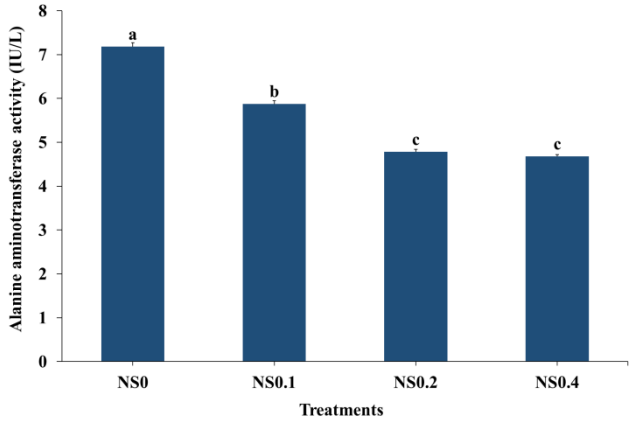
جدول ۲ پاسخ‌های ایمنی فیل‌ماهی جوان (*Huso huso*) تغذیه شده با جیره‌های حاوی سطوح مختلف نانوسلنیوم به‌مدت ۱۰ هفته (میانگین ± انحراف معیار، ۳ = n)

Table 2 Immune responses of juvenile beluga (*Huso huso*) fed diets containing different levels of nano-selenium for 10 weeks (mean ± SD, n = 3)

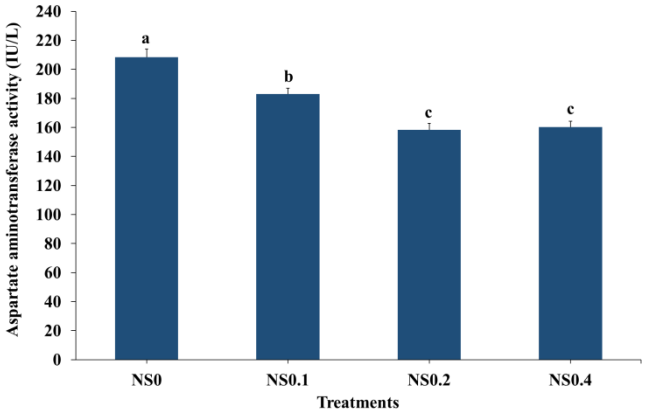
Immune indices	Treatments			
	NS_0	$NS_{0.1}$	$NS_{0.2}$	$NS_{0.4}$
Lysozyme (IU/mL)	19.58 ± 0.82^{c}	22.37 ± 1.75^{b}	29.04 ± 0.75^{a}	28.75 ± 0.31^{a}
Immunoglobulin M (mg/dL)	36.07 ± 0.40^{c}	38.64 ± 0.90^{b}	46.29 ± 0.67^{a}	45.70 ± 0.76^{a}
ACH50 (IU/mL)	132.00 ± 4.00^{b}	135.48 ± 3.15^{ab}	140.59 ± 0.87^{a}	138.80 ± 0.95^{a}

Different superscript letters in the same row indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). NS_0 (Control diet without selenium nanoparticles), $NS_{0.1}$ (0.1 mg/kg selenium nanoparticles), $NS_{0.2}$ (0.2 mg/kg selenium nanoparticles), and $NS_{0.4}$ (0.4 mg/kg selenium nanoparticles)

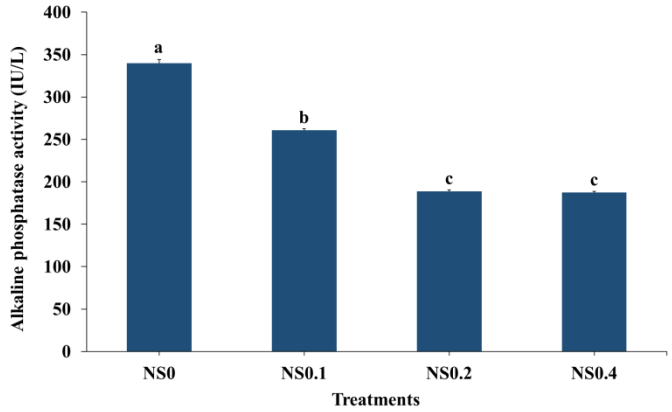
A



B



C



شکل ۱ فعالیت آنزیم‌های کبدی در فیل‌ماهی جوان (*Huso huso*) تغذیه‌شده با جیره‌های حاوی سطوح مختلف نانوسلنیوم به‌مدت ۱۰ هفته (میانگین ± انحراف معیار، ۳ = n). A) آلانین آمینوترانسفراز، B) آسپارتات آمینوترانسفراز و C) آلکالین فسفاتاز. حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها است (P<۰/۰۵). NS_0 (جیره شاهد فاقد نانوذرات سلنیوم)، $NS_{0.1}$ (۰/۱ mg/kg نانوذرات سلنیوم)، $NS_{0.2}$ (۰/۲ mg/kg نانوذرات سلنیوم) و $NS_{0.4}$ (۰/۴ mg/kg نانوذرات سلنیوم).

Figure 1. Activities of liver enzymes in juvenile beluga (*Huso huso*) fed diets containing different levels of nano-selenium for 10 weeks (mean ± SD, n = 3). (A) Alanine aminotransferase, (B) Aspartate aminotransferase, and (C) Alkaline phosphatase. Different superscript letters in the same row indicate significant differences among treatments (P<0.05). NS_0 (Control diet without selenium nanoparticles), $NS_{0.1}$ (0.1 mg/kg selenium nanoparticles), $NS_{0.2}$ (0.2 mg/kg selenium nanoparticles), and $NS_{0.4}$ (0.4 mg/kg selenium nanoparticles)

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین وزن نهایی، افزایش وزن بدن و نرخ رشد ویژه در تیمار ۰/۲ mg/kg نانوسلنیوم مشاهده شد. بنابراین، استفاده از نانوسلنیوم در سطح مناسب می‌تواند موجب بهبود عملکرد رشد در فیل‌ماهی جوان شود. بهبود شاخص‌های رشد در حضور نانوسلنیوم احتمالاً به نقش فیزیولوژیک سلنیوم در تنظیم فرایندهای متابولیک، تقویت سیستم ضد اکسایشی و افزایش کارایی استفاده از مواد مغذی مرتبط است (Mohammady et al. 2024; Ahmed et al. 2025). علاوه بر این، گزارش شده است که نانوسلنیوم می‌تواند بیان ژن‌های مرتبط با رشد مانند *GH* و *IGF-I* را افزایش داده و در نتیجه باعث تسریع سنتز پروتئین و رشد بافتی شود (Abd El-Kader et al. 2020). نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه با یافته‌های بسیاری از پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد. به‌عنوان مثال، Jahanbakhsh و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای روی ماهی طلایی (*Carassius auratus*) گزارش کردند که استفاده از ۰/۶ mg/kg نانوسلنیوم سبب افزایش معنی‌دار وزن نهایی و نرخ رشد ویژه و بهبود کارایی غذایی شد. به‌طور مشابه، Eissa و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش کردند که افزودن نانوسلنیوم تا سطح ۱ mg/kg باعث افزایش معنی‌دار شاخص‌های رشد و بهبود فعالیت آنزیم‌های گوارشی در تیلاپیای نیل می‌شود که با افزایش ظرفیت جذب مواد مغذی در روده همراه است. نتایج پژوهش حاضر همچنین با مطالعه Hoseinpour Zelati و همکاران (۲۰۲۳) بر روی تاسماهی ازون برون (*Acipenser stellatus*) همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که آن‌ها گزارش کردند که استفاده از ۰/۱ mg/kg و ۰/۲ mg/kg نانوسلنیوم موجب بهبود شاخص‌های رشد و ضریب چاقی در این گونه شد و تیمار ۰/۲ mg/kg بهترین عملکرد را نشان داد که با نتایج مطالعه حاضر در فیل‌ماهی مطابقت دارد. در مقابل، Sohrabi و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی اثر ترکیبی نانوسلنیوم به همراه ویتامین‌های C و E در فیل‌ماهی جوان گزارش کردند که اگرچه این ترکیب موجب بهبود شاخص‌های ایمنی شد، اما تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های رشد مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که اثرات نانوسلنیوم بر رشد فیل‌ماهی می‌تواند تحت تأثیر تداخلات مواد مغذی یا اثرات متقابل با ویتامین‌ها قرار گیرد و استفاده

از نانوسلنیوم به‌صورت مجزا، پتانسیل بالاتری برای تحریک مستقیم محور رشد و بهبود عملکرد در این گونه دارد.

در این پژوهش، میزان مصرف غذا در تیمار ۰/۱ mg/kg نانوسلنیوم بیشترین مقدار را داشت، در حالی که ضریب تبدیل غذایی در تیمارهای ۰/۲ mg/kg و ۰/۴ mg/kg کمتر از تیمار شاهد بود که بیانگر بهبود کارایی استفاده از غذا در این تیمارهاست. بهبود ضریب تبدیل غذایی در حضور نانوسلنیوم احتمالاً ناشی از افزایش کارایی هضم و جذب مواد مغذی، بهبود سلامت دستگاه گوارش و افزایش فعالیت آنزیم‌های گوارشی است. در این راستا، Foroshani و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که سلنیوم فعالیت آنزیم‌های گوارشی و بهبود ساختار پرزهای روده در تاسماهی سیبری (*Acipenser baerii*) را افزایش داد که در نهایت به افزایش کارایی استفاده از خوراک منجر شد. همچنین، Abd El-Kader و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که کاهش معنی‌دار ضریب تبدیل غذایی ماهی باس دریایی (*Dicentrarchus labrax*) در گروه‌های دریافت‌کننده نانوسلنیوم با بهبود وضعیت هماتولوژیک و ضد اکسایشی همراه بود که این امر می‌تواند مصرف کارآمدتر مواد مغذی را تسهیل کند. به‌طور کلی، افزودن نانوسلنیوم تا سطح ۰/۲ mg/kg جیره غذایی فیل‌ماهی جوان می‌تواند عملکرد رشد و کارایی استفاده از غذا را بهبود بخشد.

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که افزودن نانوسلنیوم به جیره غذایی فیل‌ماهی جوان موجب تقویت معنی‌دار پاسخ‌های ایمنی غیر اختصاصی شد، به‌طوری‌که فعالیت لایزوزیم، IgM و ACH_{50} در تیمارهای حاوی ۰/۲ mg/kg و ۰/۴ mg/kg نانوسلنیوم بالاتر از گروه شاهد بود. افزایش فعالیت لایزوزیم بیانگر تقویت نخستین سد دفاعی ایمنی ذاتی و افزایش توانایی ماهی در تخریب دیواره یاخته‌ای پاتوژن‌ها است، در حالی‌که افزایش IgM و ACH50 نشان‌دهنده تحریک پاسخ‌های هومورال و افزایش ظرفیت دستگاه کمپلمان در حذف عوامل بیماری‌زا هستند. بهبود در این شاخص‌ها احتمالاً ناشی از نقش سلنیوم در تقویت دستگاه ضد اکسایشی، کاهش استرس اکسیداتیو و حفظ عملکرد یاخته‌های ایمنی است (Chakroborty et al. 2025). کاهش تنش اکسیداتیو می‌تواند موجب افزایش فعالیت فاگوسیتی، تحریک سنتز ایمونوگلوبولین‌ها و بهبود عملکرد مسیر کمپلمان شود. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که نانوسلنیوم قادر است بیان ژن‌های مرتبط با ایمنی و التهاب مانند *IL-1β*، *IL-8* و *TNF-α* را تنظیم کرده و مقاومت ماهیان را در برابر تنش‌ها و عوامل بیماری‌زا افزایش دهد (Abd El-Kader et al. 2020; Khaled et al. 2024). یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات متعددی همسو است. Sohrabi و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که استفاده ترکیبی از نانوسلنیوم همراه با ویتامین‌های C و E موجب افزایش معنی‌دار ایمونوگلوبولین کل و فعالیت ACH_{50} در فیل‌ماهی جوان شد که نشان‌دهنده نقش مثبت نانوسلنیوم در تحریک ایمنی غیر اختصاصی ماهیان خاویاری است. Khan و همکاران (۲۰۱۷) نیز در ماهی *Tor putitora* نشان دادند که ترکیب نانوسلنیوم و ویتامین C موجب افزایش فعالیت لایزوزیم سرم و بهبود شاخص‌های خونی شد. Abd El-Kader و همکاران (۲۰۲۰) در باس اروپایی گزارش کردند که مکمل‌سازی نانوسلنیوم موجب افزایش معنی‌دار لایزوزیم، پروتئین کل، گلوبولین و بیان ژن‌های ایمنی شد و در کنار آن فعالیت آنزیم‌های ضد اکسایشی نیز افزایش یافت. با وجود این، برخی مطالعات پاسخ‌های متفاوتی را گزارش کرده‌اند. برای مثال، Hoseinpour Zelati و همکاران (۲۰۲۳) اگرچه افزایش فعالیت لایزوزیم را مشاهده کردند، اما اختلاف معنی‌داری در IgM و ACH50 بین تیمارها گزارش نکردند. همچنین، Jahanbakhsh و همکاران (۲۰۲۱) در ماهی طلایی نشان دادند که پاسخ‌های ایمنی و بیوشیمیایی در سطوح متوسط نانوسلنیوم بهبود یافت، اما در سطوح بالاتر تغییرات بافتی مانند لیپیدوز کبدی مشاهده شد که بیانگر محدود بودن دامنه ایمن مصرف سلنیوم است. تفاوت میان نتایج مطالعات مختلف احتمالاً به عوامل متعددی از جمله گونه ماهی، مرحله رشد، سطح و مدت مکمل‌سازی، ترکیب جیره پایه، شرایط محیطی و نوع شاخص‌های ایمنی اندازه‌گیری شده مربوط است. از سوی دیگر، پاسخ دستگاه ایمنی به سلنیوم وابسته به دوز است و اگرچه مقادیر بهینه می‌توانند موجب تحریک پاسخ‌های ایمنی شوند، اما سطوح بیش از حد ممکن است از طریق ایجاد عدم تعادل اکسیداتیو یا تجمع بافتی، اثرات منفی ایجاد کنند. در مطالعه حاضر، به نظر می‌رسد سطوح ۰/۲ mg/kg و ۰/۴ mg/kg نانوسلنیوم در محدوده بهینه قرار دارد، زیرا ضمن افزایش فعالیت لایزوزیم، IgM و ACH_{50}، هیچ‌گونه نشانه‌ای از اختلال فیزیولوژیک مشاهده نشد.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزودن نانوسلنیوم به جیره غذایی فیل‌ماهی جوان موجب کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های کبدی شد، به‌طوری‌که کمترین مقادیر این آنزیم‌ها در تیمارهای ۰/۲ mg/kg و ۰/۴ mg/kg مشاهده شد. از آنجا که افزایش فعالیت آنزیم‌های آسپارتات آمینوترانسفراز و آلکالین فسفاتاز در پلاسما معمولاً به‌عنوان شاخص آسیب یاخته‌ای، اختلال عملکرد کبد و افزایش نفوذپذیری غشای هپاتوسیت‌ها شناخته می‌شود، کاهش این آنزیم‌ها در تیمارهای دریافت‌کننده نانوسلنیوم می‌تواند بیانگر بهبود وضعیت فیزیولوژیک و سلامت کبد باشد. احتمالاً نانوسلنیوم از طریق تقویت دستگاه دفاع ضد اکسایشی، کاهش پراکسیداسیون چربی و جلوگیری از تخریب غشای یاخته‌ای موجب کاهش آنزیم‌های کبدی در جریان خون شده است (Khan et al. 2017). سلنیوم به‌عنوان جزء اصلی آنزیم گلوتاتیون پراکسیداز نقش مهمی در حذف گونه‌های فعال اکسیژن و حفظ پایداری غشای یاخته‌ای ایفا می‌کند و فرم نانویی آن به‌دلیل فراهمی زیستی بالاتر و سمیت کمتر، کارایی بیشتری در محافظت از بافت کبد دارد. در همین راستا، Li و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که نانوسلنیوم در قزل‌آلای رنگین‌کمان باعث تقویت مسیرهای دفاع ضد اکسایشی و کاهش آسیب‌های ناشی از استرس حرارتی در بافت‌ها شد. همچنین، Kianersi و همکاران (۲۰۲۰) در ماهی شانک زردباله (*Acanthopagrus latus*) نشان دادند که نانوسلنیوم موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های ضد اکسایشی مانند گلوتاتیون پراکسیداز و کاتالاز و کاهش مالون‌دی‌آلدئید کبدی شد که این نتایج بیانگر کاهش استرس اکسیداتیو و حفاظت از یاخته‌های کبدی است. Abd El-Kader و همکاران (۲۰۲۰) نیز در ماهی باس اروپایی نشان دادند که استفاده از نانوسلنیوم نه تنها شاخص‌های رشد و ایمنی را بهبود داد، بلکه موجب بهبود وضعیت بیوشیمیایی خون و افزایش ظرفیت ضد اکسایشی شد که می‌تواند با کاهش تنش اکسایشی در بافت کبد مرتبط باشد. در مقابل، Hoseinpour Zelati و همکاران (۲۰۲۳) در تاسماهی ازون برون مشاهده کردند که افزودن نانوسلنیوم اگرچه شاخص‌های رشد و برخی پاسخ‌های ایمنی را بهبود داد، اما تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیم‌های پلاسمای کبد بین تیمارها ایجاد نکرد. همچنین، Jahanbakhshi و همکاران (۲۰۲۱) در ماهی طلایی گزارش کردند که برخی شاخص‌های بیوشیمیایی از جمله آلکالین فسفاتاز در تیمارهای حاوی نانوسلنیوم افزایش یافت. این تفاوت‌ها احتمالاً ناشی از تفاوت در گونه‌های مورد مطالعه، سطح مکمل‌سازی، طی دوره تغذیه، شرایط محیطی و وضعیت فیزیولوژیک ماهیان است. از سوی دیگر، پاسخ‌های کبدی به سلنیوم به شدت وابسته به دوز مصرفی است و استفاده از سطوح بالاتر ممکن است منجر به تجمع سلنیوم و ایجاد تغییرات بافتی شود. بنابراین، به نظر می‌رسد کاهش فعالیت آنزیم‌های پلاسمایی کبد در تیمارهای ۰/۲ mg/kg و ۰/۴ mg/kg در مطالعه حاضر ناشی از قرار گرفتن ماهیان در محدوده بهینه دریافت نانوسلنیوم بوده است.

به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزودن نانوسلنیوم به جیره غذایی فیل‌ماهی جوان اثرات مثبتی بر عملکرد رشد، پاسخ‌های ایمنی غیر اختصاصی و وضعیت سلامت کبدی دارد. افزایش پاسخ ایمنی در تیمارهای دریافت‌کننده نانوسلنیوم بیانگر تقویت دستگاه ایمنی غیر اختصاصی بود. از سوی دیگر، کاهش فعالیت آنزیم‌های کبدی در تیمارهای حاوی نانوسلنیوم نشان داد که این مکمل به حفظ یکپارچگی ساختاری بافت کبد و کاهش آسیب یاخته های کبدی کمک کرده است. در میان سطوح آزمایش شده، دوز ۰/۲ mg/kg نانوسلنیوم مؤثرترین سطح بود، زیرا بیشترین بهبود را در شاخص‌های رشد، پاسخ‌های ایمنی ایجاد کرد و در عین حال کمترین ضریب تبدیل غذایی و پایین‌ترین فعالیت آنزیم‌های کبدی را نشان داد. بنابراین، به نظر می‌رسد سطح ۰/۲ mg/kg نانوسلنیوم، به‌دلیل ایجاد تعادل مناسب میان بهبود رشد، تقویت ایمنی و حفظ سلامت فیزیولوژیک، سطح بهینه برای استفاده در جیره فیل‌ماهی جوان باشد. با وجود این، انجام پژوهش‌های آینده با محوریت ارزیابی اثرات طولانی‌مدت، بررسی مسیرهای مولکولی مرتبط با ضداکسایش‌ها، ژن‌های رشد، سنجش مقادیر سلنیوم انباشته شده در بافت و تعیین دوزهای بهینه در مراحل مختلف زندگی فیل‌ماهی می‌تواند درک جامع‌تری از نقش نانوسلنیوم فراهم کند.

تشکر و قدردانی

از کارشناسان و پرسنل محترم مزرعه بلوگا به پاس کمک در تهیه، نگهداری ماهیان و پیشبرد این تحقیق، صمیمانه تشکر می‌شود.

منابع

Abd El-Kader, M.F., Fath El-Bab, A.F., Abd-Elghany, M.F., Abdel-Warith, A.W.A., Younis, E.M., Dawood, M.A. 2021. Selenium nanoparticles act potentially on the growth performance, hemato-biochemical indices, antioxidative, and immune-related genes of European seabass (*Dicentrarchus labrax*). Biological Trace Element Research 199: 3126-3134. DOI: 10.1007/s12011-020-02431-1

Adel, M., Sadeghari, A.B., Yeganeh, S., Movafagh, A.N., Saoud, I.P. 2016. Anesthetic efficacy of clove oil, propofol, 2-phenoxyethanol, and ketamine hydrochloride on Persian Sturgeon, *Acipenser persicus*, juveniles. Journal of the World Aquaculture Society 47: 812-819. DOI: 10.1111/jwas.12286

Ahmed, S.R., Van Doan, H., Davies, S., Hassaan, M.S., Goda, A.M., El-Haroun, E. 2025. Effect of selenium and nano-selenium applications on biological functions in aquaculture–a review. Annals of Animal Science 25: 905-919. DOI: 10.2478/aoas-2025-0021

Amar, E.C., Kiron, V., Satoh, S., Okamoto, N., Watanabe, T. 2000. Effects of dietary β-carotene on the immune response of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Fisheries Science 66: 1068-1075. DOI: 10.1046/j.1444-2906.2000.00170.x

Bessey, O.A., Lowry, O.H., Brock, M.J. 1946. A method for the rapid determination of alkaline phosphatase with five cubic millimeters of serum. Journal of Biological Chemistry 164: 321-329. DOI: 10.1016/S0021-9258(18)43072-4

Boyd, C.E., D'Abramo, L.R., Glencross, B.D., Huyben, D.C., Juarez, L.M., Lockwood, G.S., McNevin, A.A., Tacon, A.G., Teletchea, F., Tomasso Jr, J.R., Tucker, C.S. 2020. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. Journal of the World Aquaculture Society 51: 578-633. DOI: 10.1111/jwas.12714

Chakroborty, K., Lima, R.A., Hossain, M.F., Rafiquzzaman, S.M. 2025. Biobased functional feed additives in Asian aquaculture: Trends, impacts, and future directions. Animal Feed Science and Technology 320: 116222. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2025.116222

Ciulli, S., Volpe, E., Sirri, R., Tura, G., Errani, F., Zamperin, G., Toffan, A., Silvi, M., Renzi, A., Abbadi, M., Biasini, L. 2020. Multifactorial causes of chronic mortality in juvenile sturgeon (*Huso huso*). Animals 10: 1866. DOI: 10.3390/ani10101866

Dawood, M.A., Koshio, S., Esteban, M.Á. 2018. Beneficial roles of feed additives as immunostimulants in aquaculture: a review. Reviews in Aquaculture 10: 950-974. DOI: 10.1111/raq.12209

De Silva, S.S., Anderson, T.A. 1995. Fish nutrition in aquaculture. Chapman and Hall, London, UK. 320 p.

Eissa, E.S.H., Bazina, W.K., Abd El-Aziz, Y.M., Abd Elghany, N.A., Tawfik, W.A., Mossa, M.I., Abd El Megeed, O.H., Abd El-Hamed, N.N., El-Saeed, A.F., El-Haroun, E., Davies, S.J. 2024. Nano-selenium impacts on growth performance, digestive enzymes, antioxidant, immune resistance and histopathological scores of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* against *Aspergillus flavus* infection. Aquaculture International 32: 1587-1611. DOI: 10.1007/s10499-023-01230-4

El-Dahhar, A.A., Khaleefa, G.A., El-Zaeem, S.Y., Mourad, M.M., Raheem, M.M.A. 2024. Impact of organic and nanoparticle-selenium fortified larval weaning diet on survival, growth, gastrointestinal, and (GPx) activity of European Sea Bass (*Dicentrarchus*

labrax) Larvae. Aquaculture International 32: 8501-8517. DOI: 10.1007/s10499-024-01576-3

Ellis, T.A. 1990. Lysozyme assays. In: Stolen, J. S., Fletcher, T C., Anderson D.P., Roberson, B.S., Van Muiswinkel, W. B. (Eds). Techniques in Fish Immunology. SOS Publications, Fair Haven, USA. pp: 101-103.

Falahatkar, B. 2015. Aquatic Nutrition and Feed Formulation. Institute of Higher Technical and Vocational, Tehran, Iran. 334 p. [In Persian].

Falahatkar, B., Efatpanah, A. 2016. Biology and Physiology of Caspian Sea Sturgeons. University of Guilan Press, Rasht, Iran. 245 p. [In Persian].

Foroshani, N.S., Islami, H.R., Mousavi, S.A., Khara, H., Siahkalroodi, S.Y. 2024. Supplementation of juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) diet with different levels of selenium: growth performance, digestive enzyme activities, and intestinal histomorphology. Aquaculture Reports 38: 102325. DOI: 10.1016/j.aqrep.2024.102325

Hoseinpour Zelati, A., Hasani, M.H., Sohrabi, T., Adineh, H. 2023. The effect of dietary Nanoselenium on growth indicators, Immune system and liver enzymes of juvenile (*Acipenser stellatus*). Journal of Applied Ichthyological Research 11: 43-50. DOI: 10.22034/jair.11.3.5 [In Persian].

Jahanbakhshi, A., Pourmozaffar, S., Adeshina, I., Mahmoudi, R., Erfanifar, E., Ajdari, A. 2021. Selenium nanoparticle and selenomethionine as feed additives: effects on growth performance, hepatic enzymes' activity, mucosal immune parameters, liver histology, and appetite-related gene transcript in goldfish (*Carassius auratus*). Fish Physiology and Biochemistry 47: 639-652. DOI: 10.1007/s10695-021-00937-6

Khaled, A.A., Shabaan, A.M., Hammad, S.M., Hafez, E.E., Saleh, A.A. 2024. Exploring the impact of nano-Se and nano-clay feed supplements on interleukin genes, immunity and growth rate in European Sea Bass (*Dicentrarchus labrax*). Scientific Reports 14: 2631. DOI: 10.1038/s41598-024-53274-y

Khalil, H.S., Maulu, S., Verdegem, M., Abdel-Tawwab, M. 2023. Embracing nanotechnology for selenium application in aquafeeds. Reviews in Aquaculture 15: 112-129. DOI: 10.1111/raq.12705

Khan, K.U., Zuberi, A., Nazir, S., Ullah, I., Jamil, Z., Sarwar, H. 2017. Synergistic effects of dietary nano selenium and vitamin C on growth, feeding, and physiological parameters of mahseer fish (*Tor putitora*). Aquaculture Reports 5: 70-75. DOI: 10.1016/j.aqrep.2017.01.002

Kianersi, F., Salati, A.P., Hosmand, H.H. 2020. Comparison of dietary sodium selenite and selenium nanoparticles on growth performance, liver enzymes and antioxidant status of yellowfin porgy, *Acanthopagrus latus*. Iranian Scientific Fisheries Journal 28: 57-68. [In Persian].

Li, L., Liu, Z., Quan, J., Lu, J., Zhao, G., Sun, J. 2022. Metabonomics analysis reveals the protective effect of nano selenium against heat stress of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Journal of Proteomics 259: 104545. DOI: 10.1016/j.jprot.2022.104545

Mohammady, E.Y., Soaudy, M.R. 2024. Comparative effects of organic and inorganic selenium supplementation on growth performance, feed utilization, hemato-biochemical parameters, and hepatic antioxidant enzyme activity in Nile tilapia. Annals of Agricultural Science, Moshtohor 62: 1-6. DOI: 10.21608/assjm.2024.293931.1283

Mohtashemipour, H., Mohammadian, T., Torfi Mozanzadeh, M., Mesbah, M., Jangaran Nejad, A. 2024. Dietary selenium nanoparticles Improved Growth and Health indices in Asian Seabass (*Lates calcarifer*) juveniles reared in high saline water. Aquaculture Nutrition 2024: 7480824. DOI: 10.1155/2024/7480824

Naderi, M., Keyvanshokooh, S., Salati, A.P., Ghaedi, A. 2017. Combined or individual effects of dietary vitamin E and selenium nanoparticles on humoral immune status and serum parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under high stocking density. Aquaculture 474: 40-47. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2017.03.036

Neamat-Allah, A.N., Mahmoud, E.A., Abd El Hakim, Y. 2019. Efficacy of dietary Nano-selenium on growth, immune response, antioxidant, transcriptomic profile and resistance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* against *Streptococcus iniae* infection. Fish and Shellfish Immunology 94: 280-287. DOI: 10.1016/j.fsi.2019.09.019

Rezaei, S., Mohammadiazarm, H., Keyvanshokooh, S., Pasha-Zanoosi, H., Sharif-Kanani, H. 2024. Nutritional nano-selenium inclusion in fishmeal-free plant-based diets enhances stress resistance and post-stress recovery of common carp (*Cyprinus carpio*). Aquaculture Reports 38: 102298. DOI: 10.1016/j.aqrep.2024.102298

Saremi, N., Keyvanshokooh, S., Mousavi, S.M., Mohammadiazarm, H. 2024. Synergistic effects of dietary selenium nanoparticles and vitamin C improve growth performance, immune response, and antioxidant status of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*). Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 86: 127530. DOI: 10.1016/j.jtemb.2024.127530

Sharif-Kanani, H., Keyvanshokooh, S., Mohammadiazarm, H., Pasha-Zanoosi, H., Rezaei, S. 2024. Nano-selenium (nano-Se) removes the detrimental impacts of plant-based diets on the production performance and well-being of common carp (*Cyprinus carpio*). Aquaculture Reports 36: 102107. DOI: 10.1016/j.aqrep.2024.102107

Schmidt, E., Schmidt, F.W. 1963. Determination of serum transaminases: a modified photometric method. Clinical Chemistry 9: 120-130.

Sohrabi, T., Hassani, M.S., Zelti, A.H.P., Adineh, H. 2021. The effects of a mixture of nano selenium, vitamin C and E on growth indices, liver enzymes and nonspecific immune response in juvenile *Huso huso*. Aquatic Animals Nutrition 7: 43-56. DOI: 10.22124/janb.2021.19996.1143. [In Persian].

Sumana, S.L., Chen, H., Shui, Y., Zhang, C., Yu, F., Zhu, J., Su, S. 2023. Effect of dietary selenium on the growth and immune systems of fish. Animals 13: 2978. DOI: 10.3390/ani13182978

Tacon, A.G., Metian, M. 2015. Feed matters: satisfying the feed demand of aquaculture. Reviews in Fisheries Science and Aquaculture 23: 1-10. DOI: 10.1080/23308249.2014.987209

van Riel, A.J., Nederlof, M.A., Chary, K., Wiegertjes, G.F., de Boer, I.J. 2023. Feed-food competition in global aquaculture: Current trends and prospects. Reviews in Aquaculture 15: 1142-1158. DOI: 10.1111/raq.12804

Wang, L., Zhang, D., Li, S., Wang, L., Yin, J., Xu, Z., Zhang, X. 2021. Dietary selenium promotes somatic growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by accelerating the hypertrophic growth of white muscle. Biological Trace Element Research 199: 2000-2011. DOI: 10.1007/s12011-020-02282-w

Yu, H., Zhang, C., Zhang, X., Wang, C., Li, P., Liu, G., Yan, X., Xiong, X., Zhang, L., Hou, J., Liu, S. 2020. Dietary nano-selenium enhances antioxidant capacity and hypoxia tolerance of grass carp *Ctenopharyngodon idella* fed with high-fat diet. Aquaculture Nutrition 26: 545-557. DOI: 10.1111/anu.13016

Zhang, M., Li, M., Li, X., Qian, Y., Wang, R., Hong, M. 2020. Protective effects of selenium against chronic ammonia toxicity in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). Fish and Shellfish Immunology 107: 137-145. DOI: 10.1016/j.fsi.2020.10.004