

The application of organic acids as feed additives in sustainable aquaculture: Effects on growth, nutrient absorption, and microbial load control

Hadiseh Alizadeh¹, Bahram Falahatkar^{2*}

1- Fisheries Department, Faculty of Animal Sciences and Fisheries, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Mazandaran, Iran

2- Fisheries Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran

Received: 29 April 2025

Accepted: 22 August 2025

Extended Abstract:

Introduction: Aquaculture is currently the fastest-growing sector of animal protein production, playing a vital role in global food security. However, challenges such as rising feed costs, disease outbreaks, and restrictions on antibiotic growth promoters have intensified the need for alternative feed additives. Organic acids and their salts have gained significant attention due to their multifaceted benefits including antimicrobial properties, enhancement of nutrient digestibility, immune stimulation, and environmental sustainability. This extended abstract provides an overview of the current knowledge regarding the use of organic acids in aquaculture, summarizing their mechanisms of action, potential benefits, limitations, and future research directions.

Methodology: This review article is based on a comprehensive analysis of published peer-reviewed papers, conference proceedings, and experimental reports that investigate the dietary application of organic acids in finfish aquaculture. Studies included were selected based on their relevance to fish growth performance, digestive physiology, immune modulation, and microbial balance. Both freshwater and marine aquaculture species such as tilapia, rainbow trout, carp, and seabream were considered. Attention was also given to comparative differences among carnivorous and omnivorous fish species to highlight species-specific responses.

Finding: Organic acids such as formic, acetic, propionic, butyric, citric, lactic, and malic acids have been widely tested as dietary additives in aquaculture. Their mechanisms of action are diverse, including the reduction of intestinal pH, suppression of pathogenic bacteria, stimulation of digestive enzymes, and improvement in mineral bioavailability. Research demonstrates that supplementation with these acids improves feed utilization, enhances weight gain, and reduces feed conversion ratio (FCR). For instance, sodium butyrate has been reported to nourish intestinal epithelial cells and improve immune responses, while citric acid improves calcium and phosphorus absorption. Beyond growth performance, organic acids also contribute to microbial balance by suppressing harmful species such as *Escherichia coli* and *Vibrio* spp. while promoting beneficial bacteria such as *Lactobacillus* spp. Their immunomodulatory effects include increased white blood cell counts, activation of macrophages, and upregulation of immune-related genes like *IL-1 β* and *TNF- α* .

Nevertheless, there are challenges associated with their use. Excessive supplementation, particularly with formic and propionic acids, can cause hyperacidity leading to intestinal mucosal damage and reduced enzyme activity. Species-specific differences are also evident; carnivorous fish such as rainbow trout and cobia generally tolerate organic acids better due to their highly acidic stomachs, while omnivorous species such as Nile tilapia, which have weaker gastric buffering, are more prone to negative effects. Additionally, legal regulations on permissible levels of organic acids in feed differ between regions, complicating their universal adoption.

Conclusion: In conclusion, organic acids offer great promise as sustainable alternatives to antibiotics in aquaculture, with proven benefits for growth, nutrient absorption, microbial balance, and immune defense. Their potential role in improving product quality and reducing the environmental impact of aquaculture systems also makes them attractive for future development. However, the variability of responses among species, risks associated with overdosing, and regulatory challenges highlight the need for species-specific formulations and carefully designed feeding protocols. Future research should focus on clarifying molecular mechanisms, developing encapsulation technologies to improve stability, and evaluating long-term safety under commercial farming conditions. With targeted applications, organic acids can significantly enhance the sustainability and profitability of modern aquaculture.

Conflict of Interest: There is no conflict of interest between the authors of the article

Acknowledgment: The authors of the article are grateful for the support of their respected colleagues.

Keywords: Organic acids, Aquaculture, Antibiotic alternatives, Growth, Immunity

* Corresponding Author falahatkar@guilan.ac.ir

"مقاله پژوهشی"

کاربرد اسیدهای آلی به عنوان افزودنی های غذایی در آبرزی پروری پایدار: تأثیر بر رشد، جذب مواد مغذی و کنترل بار میکروبی

حدیثه علیزاده^۱، بهرام فلاحتکار^{۲*}

۱- گروه شیلات، دانشکده علوم دام و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه سرا، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۹

چکیده

استفاده از اسیدهای آلی در تغذیه ماهی به عنوان یک راهکار کلیدی در آبرزی پروری مطرح شده است که هدف آن بهبود سلامت و عملکرد رشد گونه های مختلف ماهی است. با افزایش نظارت های قانونی و تقاضای مصرف کنندگان برای محصولات ماهی ایمن و با کیفیت، علاقه فزاینده ای به جایگزین هایی برای محرک های رشد آنتی بیوتیکی به وجود آمده است. تحقیقات نشان داده اند که گنجاندن اسیدهای آلی در جیره غذایی ماهی فواید قابل توجهی از جمله بهبود قابلیت هضم مواد مغذی، تقویت پاسخ ایمنی و کاهش بار میکروبی در سیستم های آبرزی پروری دارند. به عنوان مثال، اسیدهای آلی می توانند pH روده را کاهش دهند، که این امر رشد باکتری های مفید را تقویت و در عین حال پاتوژن های مضر مانند *Escherichia coli* و *Salmonella* را مهار می کند. در نتیجه تعادل میکروبیوم روده را بهبود می بخشد. با این حال، اثربخشی اسیدهای آلی بسته به عواملی مانند گونه ماهی، دوز و ترکیب غذایی می تواند متفاوت باشد و نیازمند کاربردهای متناسب برای دستیابی به نتایج بهینه است. علی رغم مزایای آن، استفاده از اسیدهای آلی در تغذیه ماهی بدون چالش نیست. نگرانی هایی درباره اثرات منفی احتمالی ناشی از غلظت های بیش از حد، مانند آسیب بافتی و افزایش التهاب، به ویژه در گونه هایی مانند تیلپیا (*Oreochromis niloticus*) گزارش شده است. علاوه بر این، تنوع در پاسخ های خاص گونه ای و پیچیدگی های قانونی پیرامون استفاده از اسیدهای آلی چالش هایی را ایجاد می کند که تولید کنندگان آبریان باید با آنها روبرو شوند. گونه های مختلف ماهیان واکنش های متفاوتی به مکمل های اسید آلی در جیره نشان می دهند که عمدتاً ناشی از تفاوت های فیزیولوژیک در دستگاه گوارش و الگوهای تغذیه ای آنهاست. به طور مشخص، گونه های گوشت خوار مانند کویا (*Rachycentron canadum*) و قزل آلا (*Oncorhynchus mykiss*) با دارا بودن معده توسعه یافته و اسیدیته پایین (۲-۴ pH)، تحمل بیش تری نسبت به اسیدهای آلی افزوده شده دارند. در مقابل، گونه های همه چیز خوار مانند تیلپیا نیل به دلیل ظرفیت بافری محدود معده، pH گوارشی بالاتر (۴-۶ pH) و ساختار روده ای حساس، مستعد اختلالات ناشی از اسیدیته اضافی (Hyperacidity) هستند، که می تواند منجر به تخریب مخاط روده، اختلال در فعالیت آنزیم های گوارشی و کاهش جذب مواد مغذی گردد. این تنوع فیزیولوژیک، لزوم طراحی گونه-محور (Species-specific) جیره های حاوی اسیدهای آلی را اجتناب ناپذیر می سازد. پژوهش های آینده در این حوزه، پتانسیل بالایی برای بهینه سازی سلامت آبریان، کاهش وابستگی به آنتی بیوتیک ها و توسعه آبرزی پروری پایدار در مواجهه با چالش های سیستم های متراکم پرورشی دارند. در مجموع، استفاده هدفمند از اسیدهای آلی در جیره های غذایی ماهی، با در نظر گرفتن ویژگی های گونه ای و تنظیم دقیق دوز مصرف، می تواند نقش مؤثری در ارتقاء سلامت، بهبود عملکرد رشد و توسعه پایدار صنعت آبرزی پروری ایفا کند.

کلمات کلیدی: اسیدهای آلی، آبرزی پروری، جایگزین های آنتی بیوتیکی، رشد، ایمنی

مقدمه

افزایش جمعیت انسانی به‌ویژه در قرن حاضر، نیاز روزافزون به منابع پروتئینی حیوانی را تشدید کرده است. در این میان، آبرزی پروری به‌عنوان سریع‌ترین بخش تولید پروتئین حیوانی، نقش حیاتی در امنیت غذایی جهانی ایفا می‌کند. با این وجود، محدودیت‌های جغرافیایی، چالش‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های فزاینده خوراک (۷۰-۶۰٪ هزینه‌های تولید)، بهینه‌سازی عملکرد رشد را به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده‌است. در این راستا، محرک‌های رشد نظیر اسیدهای آلی، پروبیوتیک‌ها، آنزیم‌ها و مشتقات گیاهی با هدف بهبود ضریب تبدیل غذایی (FCR)، تقویت سلامت روده و کاهش تلفات مورد توجه قرار گرفته‌اند (Onomu and Okuthe, 2024).

استفاده از محرک‌های رشد آنتی‌بیوتیکی در جیره ماهی و میگو در صنعت آبرزی پروری به‌خوبی پذیرفته شده‌است. این محرک‌ها می‌توانند سبب بهبود افزایش وزن زنده، ضریب تبدیل خوراک و میزان بقا شوند، اما نگرانی‌های عمومی خصوصاً در اتحادیه اروپا در ارتباط با مقاومت شدن عوامل بیماری‌زا و مسائل زیست‌محیطی سبب ممنوعیت یا کاهش استفاده از این مواد در سراسر جهان شده‌است. متعاقباً، توجه صنعت خوراک آبریان، به دیگر افزودنی‌های خوراکی به‌منظور حفظ عملکرد و افزایش میزان بقا در آبرزی پروری معطوف شده‌است (Lückstädt, 2008).

در میان جایگزین‌های پیشنهادی، اسیدهای آلی و نمک‌های آنها به‌دلیل ویژگی‌های ضد میکروبی، بهبود هضم پذیری مواد مغذی و تقویت سد مخاطی روده، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند (Hosseini et al., 2023). مطالعات پایه‌ای که نخستین بار در دام و طیور انجام شد

(Kirchgeßner et al., 1995) و سپس در آبریان تأیید گردید، نشان می‌دهند که مکمل‌سازی جیره با اسیدهای آلی از طریق کاهش pH دستگاه گوارش، جمعیت پاتوژن‌های گرم‌منفی مانند *Aeromonas hydrophila* و *Vibrio spp.* را با اختلال در غشای سلولی و مهار متابولیسم میکروبی سرکوب می‌کند (Hosseini et al., 2018)، جذب مواد معدنی (به‌ویژه فسفر، کلسیم و روی) را از طریق تشکیل کمپلکس‌های محلول و کاهش پیوند با فیتات‌ها افزایش می‌دهد (Ng and Koh, 2017)، و فعالیت آنزیم‌های گوارشی (پسین و تریپسین) را با کاهش pH بهینه محیط فعالیت آنزیم‌ها و القای ترشح پانکراسی تحریک می‌کند (Dawood et al., 2020). با این حال، پاسخ گونه‌های مختلف آبرزی (گوشت‌خوار در مقابل غیرگوشت‌خوار) به این مکمل‌ها به‌دلیل تفاوت‌های فیزیولوژیک در ساختار معده، ظرفیت بافری و میکروبیوم روده، به‌طور معنی‌داری متفاوت است (Zhou et al., 2008). این مقاله، با هدف بررسی عمیق‌تر مکانیسم‌های اثر، دوزهای بهینه و چالش‌های کاربردی اسیدهای آلی در گونه‌های کلیدی آبرزی پروری تهیه شده‌است.

منابع و تولید اسیدهای آلی

اسیدهای آلی عمدتاً از طریق تخمیر میکروبی کربوهیدرات‌ها توسط گونه‌های مختلف باکتریایی در مسیرهای متابولیکی و شرایط گوناگون تولید می‌شوند. این فرآیند تخمیر، منجر به تولید اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین مانند اسید استیک، اسید پروپیونیک و اسید بوتیریک می‌شود که به‌ویژه در روده بزرگ انسان و حیوانات توسط جوامع میکروبی بی‌هوازی در

غلظت های بالا تشکیل می شوند (Pandey and Satoh, 2008; Koh *et al.*, 2014). بسیاری از اسیدهای آلی کوتاه زنجیره (C1-C7) به طور طبیعی به عنوان اجزای عادی بافت های گیاهی و حیوانی وجود دارند که نشان دهنده نقش اساسی آنها در سیستم های بیولوژیک است. این اسیدها همچنین در فرآیندهای فیزیولوژیک مختلف حیوانات از جمله گوارش و متابولیسم نقش دارند (Koh *et al.*, 2014).

اسیدهای آلی می توانند با فلزات قلیایی مانند پتاسیم (K)، سدیم (Na) یا کلسیم (Ca) ترکیب شده و نمک های تک یا دوگانه تشکیل دهند. این نمک ها ممکن است مزایای اضافی در تغذیه و نگهداری داشته باشند و کاربردهای اسیدهای آلی در خوراک دام، به ویژه در فرمولاسیون خوراک ماهی را گسترش دهند (Pandey and Satoh, 2008; Koh *et al.*, 2014).

زمینه تاریخی در تغذیه ماهی

استفاده از اسیدهای آلی در نگهداری ماهی و احشای آن برای تولید سیلاژ به طور گسترده ای رواج داشته است. این تکنیک که به دهه ۱۹۳۰ باز می گردد که در ابتدا شامل استفاده از اسیدهای سولفوریک و هیدروکلریک برای حفظ ضایعات ماهی بود. این روش منجر به افزایش علاقه جامعه علمی به تأثیرات اسیدهای آلی کوتاه زنجیره بر خوراک ماهی و مزایای بالقوه آنها برای سلامت و رشد ماهی شده است (Busti *et al.*, 2020).

انواع اسیدهای آلی

اسیدهای آلی از اجزای ضروری در تغذیه ماهی هستند که نقش های مختلفی از بهبود سلامت روده تا

افزایش جذب مواد مغذی ایفا می کنند. آنها را می توان بر اساس ساختار شیمیایی و عملکردهای متابولیک دسته بندی کرد. در جدول ۱ انواع اسیدهای آلی مورد استفاده در تغذیه آبزیان، همراه با فرمول شیمیایی و نقش کلیدی آنها خلاصه شده است. استفاده صحیح از این اسیدهای آلی می تواند عملکرد رشد و پاسخ های ایمنی ماهی را بهبود بخشد. این امر چالش های ناشی از شیوع بیماری در سیستم های متراکم آبی پروری را کاهش می دهد.

مکانیسم های اثر اسیدهای آلی

اسیدهای آلی از طریق چندین مکانیسم مرتبط، نقش مهمی در بهبود سلامت و عملکرد ماهی ها ایفا می کنند. اثربخشی آنها ناشی از توانایی شان در تغییر میکروبیوتای روده، بهبود جذب مواد مغذی و اثرات ضد میکروبی است.

خواص ضد باکتریایی

یکی از مکانیسم های اصلی اسیدهای آلی، فعالیت ضد باکتریایی آنهاست. این اسیدها با کاهش pH روده، رشد پاتوژن های حساس به اسید مانند *E. coli* و *Salmonella* را مهار می کنند، در حالی که برای باکتری های مفید مانند *Lactobacillus spp.* اثر کمتری دارند (Pelyuntha *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2024; Torres-Maravilla *et al.*, 2024). این اثر ضد میکروبی انتخابی نه تنها به حفظ تعادل میکروبیوم روده کمک می کند، بلکه با کاهش بار پاتوژن ها، سلامت کلی را بهبود می بخشد.

جدول ۱: انواع اسیدهای آلی رایج در آبی‌پروری

Table 1: Common types of organic acids in aquaculture

Common name	Type of acid	Chemical formula	Properties and their role in aquaculture	References
Formic acid	Short-chain fatty acid	HCOOH	Reduces intestinal pH and inhibits the growth of pathogenic bacteria	Pandey and Satoh (2008)
Acetic acid	Short-chain fatty acid	CH ₃ COOH	Improves microbial balance and increases feed digestibility	Ng and Koh (2017)
Propionic acid	Short-chain fatty acid	C ₂ H ₅ COOH	Prevents mold growth and enhances gut health	Fabay <i>et al.</i> (2022)
Butyric acid	Short-chain fatty acid	C ₃ H ₇ COOH	Nourishes intestinal epithelial cells, strengthens immunity	Pelyuntha <i>et al.</i> (2022)
Lactic acid	Fermentation-derived organic acid	C ₃ H ₆ O ₃	Increases beneficial bacteria population and improves protein absorption	Chen <i>et al.</i> (2024)
Citric acid	Tricarboxylic acid	C ₆ H ₈ O ₇	Increases bioavailability of calcium and phosphorus	Freitag (2007)
Malic acid	Natural organic acid	C ₄ H ₆ O ₅	Aids energy metabolism and stabilizes digestive function	Alizadeh <i>et al.</i> (2019a,b, 2020)
Fumaric acid	Natural organic acid	C ₄ H ₄ O ₄	Antibacterial properties and reduces microbial load in the digestive tract	Huyben <i>et al.</i> (2021)

تعدیل میکروبیوتای روده

تحقیقات نشان داده‌اند که اسیدهای آلی غذایی می‌توانند تغییراتی در ترکیب میکروبیوتای روده گونه‌های آبی ایجاد کنند. به‌عنوان مثال، Busti و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که اسیدهای آلی باعث افزایش باکتری‌های مفید مانند *Lactobacillus* و *Leuconostoc* در روده ماهی سی باس اروپایی (*Dicentrarchus labrax*) شده و در عین حال باکتری‌های مضر التهاب‌زا را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، قرار گرفتن در معرض اسیدهای آلی می‌تواند میکروبیوتای روده را بازسازی کند و با افزایش بیان ژن‌های مرتبط با ایمنی، پاسخ‌های ایمنی و خواص پری‌بیوتیکی را تقویت نماید. به‌عنوان مثال،

مکمل‌سازی سدیم بوتیرات در جیره ماهی سی باس آسیایی (*Lates calcarifer*) منجر به افزایش باکتری‌های گرم‌مثبت در انتهای روده شد (Goh *et al.*, 2025). اگرچه این امر ممکن است سلامت روده را بهبود بخشد، اما پیامدهای بلندمدت تغییر میکروبیوتای روده هنوز نامشخص است و نیاز به تحقیقات بیشتر دارد تا از بروز عدم تعادل‌های احتمالی که می‌تواند سلامت ماهی را تحت تأثیر قرار دهد، جلوگیری شود.

بهبود جذب مواد مغذی

ثابت شده است که اسیدهای آلی، قابلیت هضم مواد مغذی و جذب مواد معدنی را در ماهی‌ها افزایش می‌دهند. آن‌ها فعالیت آنزیم‌های پانکراس را بهبود

افزایش یافت (Hadidi and Taati, 2016; Seleymani, 2012). اسیدهای آلی همچنین به سلامت کلی آبزیان کمک می کنند. خواص ضد میکروبی آنها به ویژه در برابر باکتری های گرم منفی حساس به اسید مانند *E. coli* و گونه های *Vibrio* مؤثر است، در حالی که تأثیر کمتری بر باکتری های مقاوم به اسید مانند *Lactobacillus* دارند (Pelyuntha et al., 2022). این مهار انتخابی باکتری های بیماری زا مقاومت در برابر بیماری را در ماهی ها افزایش داده و منجر به کاهش عفونت ها و جمعیت های سالم تر می شود (Alizadeh et al., 2019b; Simón et al., 2020).

مزایای اسیدهای آلی در تغذیه ماهی

اسیدهای آلی به دلیل فواید چندجانبه شان در تغذیه و سلامت ماهی ها، توجه قابل ملاحظه ای را در آبی پروری به خود جلب کرده اند. این ترکیبات، از جمله اسید فرمیک، اسید بوتیریک و اسید پروپیونیک، نقش حیاتی در بهبود کارایی و اثربخشی خوراک ماهی ایفا می کنند (Ng and Koh, 2017; Busti et al., 2020). از جمله این مزایا می توان به موارد زیر اشاره کرد:

بهبود قابلیت هضم مواد مغذی

یکی از مزایای اصلی استفاده از اسیدهای آلی در جیره غذایی ماهی، افزایش قابلیت هضم مواد مغذی است. با کاهش pH خوراک، اسیدهای آلی ظرفیت بافری را کاهش داده و منجر به فعال سازی بهتر آنزیم های گوارشی مانند پپسین می شوند (Ng and Koh, 2017). این امر به نوبه خود هضم بهینه پروتئین و جذب بهتر مواد مغذی را تسهیل می کند. علاوه بر این، اسیدهای آلی با مواد معدنی ضروری مانند کلسیم،

بخشیده، رشد اپیتلیال روده را تحریک می کنند و در دسترس بودن مواد معدنی ضروری مانند فسفر، منیزیم و کلسیم را افزایش می دهند (Alizadeh et al., 2019a, 2020; Dostani Dezfoli et al., 2019; Fabay et al., 2022). به عنوان مثال، یک مطالعه گزارش کرده است که افزودن ترکیب خاصی از اسیدهای آلی به جیره غذایی تیلپای نیل (*Oreochromis niloticus*)، موجب بهبود حفظ مواد مغذی و قابلیت هضم کلی شد. همچنین، این اسیدها ممکن است فعالیت آنزیم های گوارشی را افزایش دهند (Badzohreh et al., 2020) و به جذب مؤثرتر مواد مغذی کمک کنند (Pelyuntha et al., 2022).

پاسخ ایمنی و وضعیت سلامت

مصرف اسیدهای آلی به نظر می رسد پاسخ ایمنی در ماهی ها را نیز بهبود می بخشد. خاصیت اسیدی آنها می تواند با افزایش مقاومت در برابر پاتوژن های مختلف، سلامت کلی آبزیان پرورشی را تقویت کند (Ng and Koh, 2017; Chen et al., 2024). مطالعات نشان داده اند که اسیدهای آلی ممکن است اثرات ضدالتهابی داشته باشند که منجر به بهبود عملکرد رشد و مقاومت در برابر بیماری ها می شود (Chen et al., 2024). به عنوان مثال، در مطالعه ای بازماندگی ماهیان قزل آلای رنگین کمان تغذیه شده با هومیک اسید در مواجهه با باکتری *Yersinia ruckeri* به میزان چشمگیری بالاتر از ماهیان تغذیه نشده با اسید آلی بود (Yilmaz et al., 2018). همچنین در مطالعاتی بر روی بچه ماهیان قزل آلای رنگین کمان و ماهی اسکار (*Astronotus ocellatus*)، تعداد گلبول های سفید در ماهیان تغذیه شده با اسیدهای آلی به میزان قابل توجهی

فسفر، منیزیم و روی کمپلکس تشکیل داده و قابلیت هضم آن‌ها را بهبود می‌بخشند (Ng and Koh, 2017; da Silva *et al.*, 2022).

کاهش بار میکروبی

استفاده از اسیدهای آلی در خوراک ماهی به‌طور قابل توجهی بار میکروبی را کاهش می‌دهد که می‌تواند تأثیرات مثبتی بر سیستم‌های آبی‌پروری داشته باشد. کاهش باکتری‌های بیماری‌زا در روده ماهی منجر به آلودگی میکروبی کم‌تر در مدفوع و در نهایت بهبود کیفیت آب در محیط‌های پرورش، به‌ویژه در مخازن آب و سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته می‌شود (da Silva *et al.*, 2022; Fabay *et al.*, 2022).

بهبود عملکرد رشد

تحقیقات نشان داده‌اند که اسیدهای آلی می‌توانند تأثیر مثبتی بر عملکرد رشد گونه‌های مختلف ماهی داشته باشند. به‌عنوان مثال، دوزهای خاصی از سدیم بوتیرات و مخلوط‌های اسیدهای آلی با افزایش وزن و بهبود ضریب تبدیل غذایی مرتبط بوده‌اند (Lückstädt, 2007; Pelusio *et al.*, 2020). با این حال، اثربخشی اسیدهای آلی ممکن است بسته به گونه ماهی، نوع اسید و دوز مصرفی متفاوت باشد که نشان‌دهنده ضرورت کاربردهای اختصاصی برای حداکثر بهره‌وری است (Lückstädt, 2008; Pelusio *et al.*, 2020).

روش‌های کاربرد

اسیدهای آلی در آبی‌پروری عمدتاً به‌عنوان مکمل‌های غذایی برای بهبود عملکرد رشد و سلامت گونه‌های ماهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های

کاربرد آنها بر اساس نوع اسید مورد استفاده، گونه پرورشی و اهداف خاص عملیات آبی‌پروری متفاوت بوده و می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مکمل‌سازی خوراک

اسیدهای آلی اغلب مستقیماً در فرمولاسیون خوراک ماهی گنجانده می‌شوند. این روش با هدف بهبود بهره‌وری و قابلیت هضم خوراک از طریق تغییر محیط روده انجام می‌شود. افزودن اسیدهایی مانند سیتریک، استیک و هیدروکلریک نشان داده است که باعث فعال‌سازی پپسین می‌شود و در نتیجه هضم پروتئین و جذب مواد معدنی را در گونه‌هایی مانند تیلپیا افزایش می‌دهد (Pelyuntha *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2024). لازم به ذکر است که pH خوراک نقش مهمی در اثربخشی این مکمل‌ها دارد، که نشان می‌دهد نوع خاص اسید ممکن است کم‌تر از اسیدیته کلی جیره اهمیت داشته باشد (Asriqah *et al.*, 2018). از جمله روش‌های مکمل‌سازی اسیدهای آلی در خوراک آبزیان می‌توان از اختلاط مستقیم با خوراک (پیش از پلت‌سازی)، که اسیدهای آلی به صورت مایع یا پودری مستقیماً به اجزای جیره اضافه و قبل از فرآیند پلت‌سای کاملاً مخلوط می‌شوند (Ng and Koh, 2017)، استفاده از طریق آب محیط پرورش، که اسیدهای آلی مستقیماً به آب استخرها یا سیستم‌های مدار بسته اضافه می‌شوند (Chen *et al.*, 2024)، فناوری‌های نوین و نانوکپسول‌ها (Encapsulation)، که اسیدهای آلی در پوشش‌های لیپیدی یا پلیمری (مانند نانو ذرات کیتوسان) محافظت می‌شوند تا در دمای پلت‌سازی تخریب نشوند (Khursheed Khan *et al.*, 2024)، و استفاده از

نمک های اسیدی، که نمک های پتاسیمی یا کلسیمی اسیدهای آلی به جیره افزوده می شوند (Luckstadt, 2008) اشاره نمود.

تصفیه آب

اسیدهای آلی علاوه بر خوراک، از طریق آب نیز قابل استفاده هستند. این روش کیفیت میکروبی آب در سیستم های پرورش ماهی را بهبود می بخشد. ایجاد محیط اسیدی، بقای عوامل بیماری زا را کاهش داده و خطر عفونت ماهی ها را کم می کند (Ng and Koh, 2017). برنامه های درمانی معمولاً ترکیبی از روش های متناسب با نیازهای مزرعه بوده که کیفیت میکروبی آب را تضمین می نماید. برخی از مزایا و چالش های استفاده از اسیدهای آلی در تغذیه آبزیان در جدول ۲ به طور خلاصه آورده شده است.

ملاحظات ذخیره سازی و حمل و نقل

اسیدهای آلی به دلیل ماهیت خورنده ای که دارند، چالش های خاصی در نگهداری و جابجایی ایجاد می کنند. برخی اسیدها مانند اسید فرمیک و پروپیونیک نیاز به راهکارهای ویژه نگهداری دارند تا از تخریب ظروف و ایمنی استفاده اطمینان حاصل شود (Chen et al., 2024). مدیریت صحیح این جنبه ها برای حفظ اثربخشی اسیدهای آلی و رعایت مقررات ایمنی ضروری است.

چالش های نظارتی

علاقه فزاینده به اسیدهای آلی، به ویژه پس از ممنوعیت محرک های رشد آنتی بیوتیکی در چندین کشور، با چالش های نظارتی همراه شده است. قوانین کشورهای

مختلف در مورد استفاده از اسیدهای آلی در خوراک دام متفاوت است که می تواند پذیرش و گسترش بازار آن ها را پیچیده کند (Pelyuntha et al., 2022; Chen et al., 2024). رعایت این مقررات برای آبی پروران که به دنبال استفاده مؤثر از اسیدهای آلی هستند، حیاتی است. با افزایش نگرانی ها در مورد مقاومت ضد میکروبی، مراجع نظارتی در سراسر جهان محدودیت های سختگیرانه ای بر استفاده از محرک های رشد آنتی بیوتیکی در خوراک دام اعمال کرده اند. در نتیجه، تقاضا برای جایگزین های ایمن و طبیعی افزایش یافته و علاقه به اسیدهای آلی بیش تر شده است (Butucel et al., 2022). با این حال، چارچوب نظارتی استفاده از اسیدهای آلی می تواند به طور قابل توجهی در مناطق مختلف متفاوت باشد و تولیدکنندگان باید این مقررات را به دقت رعایت کنند تا ضمن رعایت قوانین، انتظارات مصرف کنندگان در مورد ایمنی و اثربخشی را نیز برآورده سازند.

ملاحظات اقتصادی

پیامدهای اقتصادی استفاده از اسیدهای آلی در جیره غذایی ماهی ها باید به دقت ارزیابی شود. اگرچه برخی مطالعات نشان دهنده بهبود عملکرد رشد و بازده خوراک با مکمل سازی اسیدهای آلی هستند (Rsd et al., 2024)، اما مقرون به صرفه بودن این تغییرات غذایی به عوامل مختلفی از جمله قیمت بازار مواد تشکیل دهنده خوراک و پاسخ های رشد خاص مشاهده شده در گونه های مختلف ماهی بستگی دارد. بنابراین، تحلیل های جامع هزینه-فایده برای تولیدکنندگانی که در نظر دارند اسیدهای آلی را در استراتژی های تغذیه ای خود بگنجانند، ضروری است.

عوامل کلیدی در ارزیابی اقتصادی عبارتند از: هزینه-
های اولیه تهیه اسیدهای آلی، تغییرات در بازده تولید و
عملکرد رشد، کاهش هزینه‌های درمان بیماری‌ها،
افزایش کیفیت و ارزش بازار محصول نهایی و صرفه
جویی‌های ناشی از کاهش ضریب تبدیل غذایی.
تولیدکنندگان باید این عوامل را در کنار هم سنجیده و
با در نظر گرفتن شرایط خاص مزرعه خود،
تصمیم‌گیری نمایند.

جدول ۲: مزایا و چالش‌های استفاده از اسیدهای آلی در تغذیه آبزیان.

Table 2: Advantages and challenges of using organic acids in aquatic nutrition

Organic acids	Function	Effects	References
Advantages			
Improving the gut microbiome	Increasing beneficial bacteria such as <i>Lactobacillus</i> and reducing pathogens like <i>Vibrio</i> and <i>E. coli</i> through lowering gut pH	Reducing the gut pathogen load	Zhou <i>et al.</i> (2008); Torres-Maravilla <i>et al.</i> (2024)
Enhancing nutrient digestibility	Increasing the activity of digestive enzymes (amylase, protease) and improving the absorption capacity of amino acids and fats	Improving FCR	Alizadeh <i>et al.</i> (2019b); Kotzamanis <i>et al.</i> (2007)
Increasing growth and production efficiency	Increasing final weight and improving specific growth rate through enhanced digestion and energy metabolism	Increasing the final weight of fish	Ng and Koh (2017)
Strengthening the immune response	Increasing the expression of immune genes such as <i>IL-1β</i> and <i>TNF-α</i> , and improving macrophage phagocytic activity	Increasing disease resistance	Huyben <i>et al.</i> (2021)
Reducing the need for antibiotics	A sustainable alternative to antibiotic growth promoters, reducing the risk of antibiotic resistance	Reducing antibiotic use	Katya <i>et al.</i> (2018)
Improving carcass and meat quality	Increasing the storage of beneficial fats (omega-3 fatty acids) and improving sensory properties (taste, color) in the final products	Improving the profile of beneficial fatty acids	Hussein <i>et al.</i> (2023)
Challenges			
Toxicity at high doses	High doses of formic acid or propionic acid can cause intestinal tissue necrosis or increased inflammation	Increased tissue damage at high doses	Kumar <i>et al.</i> (2011)
Species-specific responses	Differences in species' responses to organic acids; carnivorous and omnivorous fish have different requirements	Reduced growth in some species	Ng and Koh (2017)
Legal challenges	Legal restrictions on the permissible levels of organic acids that can be added to feed, particularly in Europe and North America	Requiring separate registration permits	Butucel <i>et al.</i> (2022)
Interaction with other dietary components	Interaction with proteins, fats, and fiber; may affect the activity of organic acids	Reduced efficacy in high-fiber diets	Chen <i>et al.</i> (2024)
Low stability in the environment	Reduced effectiveness of certain acids in saltwater or at high temperatures (above 28°C)	Reduced antibacterial activity	Katya <i>et al.</i> (2018)

نتیجه گیری و چشم اندازهای پژوهشی

مطالعات حاضر به وضوح نشان می دهند که اسیدهای آلی و نمک های آنها به عنوان جایگزین های مؤثری برای آنتی بیوتیک ها در صنعت آبی پروری عمل می کنند. این ترکیبات از طریق سه مکانیسم اصلی شامل بهبود فرآیندهای گوارشی، تعدیل ترکیب میکروبیوتای روده و تقویت سد روده ای، سلامت و عملکرد رشد آبیان را به ویژه در گونه های فاقد معده اسیدی قوی مانند تیلپیا و کپور (*Cyprinus carpio*) ارتقا می دهند. با این وجود، اثربخشی مطلوب مستلزم در نظر گرفتن ویژگی های گونه ای، تنظیم دقیق دوز مصرفی و غلبه بر چالش های فنی موجود است.

در راستای پاسخ به این چالش ها و تکمیل دانش موجود، پژوهش های آتی باید تمرکز ویژه ای بر کشف مکانیسم های مولکولی ناشناخته داشته باشند. تحلیل تغییرات بیان ژن های مرتبط با ناقلین معدنی نظیر SLC34A2 و TRPV6، پروتئین های اتصال کننده مانند occludin و claudin-5، و همچنین مسیرهای سیگنالینگ کلیدی از جمله mTOR و NF-κB ضروری به نظر می رسد. بررسی تغییرات اپی ژنتیک در ژن های ایمنی روده نیز می تواند زوایای جدیدی از نحوه تأثیر این ترکیبات را آشکار سازد.

به موازات این مطالعات بنیادین، تعیین پروتکل های بهینه گونه محور برای ماهیان اقتصادی مهم، در اولویت قرار دارد. این امر مستلزم انجام مطالعات دوز-پاسخ دقیق با در نظر گرفتن تداخلات فرمولاسیونی، به ویژه تأثیر همزمان اسیدهای آلی با منابع مختلف لیپیدی و سطوح متغیر پروتئین جیره است. همچنین توسعه فناوری های نوین برای غلبه بر محدودیت های عملیاتی، از جمله طراحی ریزکپسول های نانولیپیدی مقاوم به

دمای پلت سازی و سیستم های رهاسازی هدفمند در روده میانی، از ضروریات این حوزه پژوهشی محسوب می شود.

ارزیابی ایمنی بلندمدت مصرف اسیدهای آلی نیز نیازمند توجه ویژه است. پایش شاخص های استرس اکسیداتیو مانند مالون دی آلدئید و سوپراکسید دیسموتاز، بررسی عملکرد کبدی از طریق آنزیم های آلانین آمینوترانسفراز و آسپاراتات آمینوترانسفراز و تحلیل تأثیر بر پروفیل اسیدهای چرب ضروری نظیر ایکوزاپنتانوئیک اسید و دوکوزاهگزانوئیک اسید در کیفیت نهایی محصول باید در دستور کار پژوهش های آتی قرار گیرد. در نهایت، بررسی سینرژیسم اسیدهای آلی با پروبیوتیک های اختصاصی مانند *Lactobacillus plantarum* و توسعه فناوری های پایش آنالین pH روده ای می تواند گام مؤثری در جهت توسعه سیستم های هوشمند تغذیه در آبی پروری مدرن باشد. فناوری های پایش آنالین pH روده ای مبتنی بر حسگرهای زیستی خوراکی (Ingestible Biosensors) که به طور بی سیم داده های اسیدیته روده را در زمان واقعی به پلتفرم های هوش مصنوعی منتقل می کنند، امکان تنظیم خودکار دوز اسیدهای آلی در جیره غذایی را فراهم ساخته و با ادغام این سیستم ها در زیرساخت اینترنت اشیاء مزارع، توسعه سیستم های هوشمند تغذیه در آبی پروری مدرن را محقق می سازند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت های همکاران محترم کمال تشکر را دارند.

منابع

- immune parameters and gut microbiota of European sea bass. *Scientific Reports*, 10(1), 21321. DOI: 10.1038/s41598-020-78441-9
7. Butucel, E., Balta, I., McCleery, D., Marcu, A., Stef, D., Pet, I., Callaway, T., Stef, L. and Corcionivoschi, N., 2022. The prebiotic effect of an organic acid mixture on *Faecalibacterium prausnitzii* metabolism and its anti-pathogenic role against *Vibrio parahaemolyticus* in shrimp. *Biology*, 12(1), 57. DOI: 10.3390/biology12010057
 8. Chen, J., He, S., Zhang Z., Li, J., Zhang, X., Li, J., Xu, J., Zheng, P., Xian, J. and Lu, Y., 2024. Application of organic acid salts as feed additives in some aquatic organisms: Potassium diformate. *Fishes*, 9(3), 85. DOI: 10.3390/fishes9030085
 9. da Silva, V.G., Favero, L.M., Mainardi, R.M., Ferrari, N.A., Chideroli, R.T., Di Santis, G.W., de Souza, F.P., da Costa, A.R., Gonçalves, D.D., Nuez-Ortin, W.G., Isern-Subich, M.M., de Oliveira-Junior, A.G., Lopera-Barrero, N.M. and de Pádua Pereira, U., 2023. Effect of an organic acid blend in Nile tilapia growth performance, immunity, gut microbiota, and resistance to challenge against francisellosis. *Research in Veterinary Science*, 159(1), pp.214-224. DOI: 10.1016/j.rvsc.2023.04.019
 10. Dawood, M.A.O., Zommara, M., Eweedah, N.M. and Helal, A., 2020. The evaluation of growth performance, blood health, oxidative status and immune-related gene expression in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed dietary nanoselenium sphere produced by lactic acid bacteria. *Aquaculture*, 515(15), 734571. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2019.73457
 11. Dostani Dezfoli, M., Rajabzadeh Ghatrami, E. and Abdi, R., 2019. Effects of sodium diformate and citric acid on body composition, serum enzymes activity and alimentary canal tissue of the juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquatic*
 1. Alizadeh, H. and Falahatkar, B., 2020. Effects of dietary organic acids on growth performance and physiology of fish. *8th Iranian Conference of Ichthyology Tarbiat Modares University*, Mazandaran, Noor, October 2020. [In Persian]
 2. Alizadeh, H., Oraj, H., Falahatkar, B. and Efatpanah, I., 2019a. Effect of dietary Malic acid on growth performance and body composition of juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt, 1869). *Iranian Scientific Fisheries Journal*, 27(6), pp.1-12. DOI: 10.22092/isfj.2019.118318 [In Persian]
 3. Alizadeh, H., Oraj, H., Falahatkar, B. and Efatpanah, I., 2019b. Effect of dietary malic acid on hematological, biochemical and immunological indices of juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt, 1869). *Journal of Fisheries*, 72(4), pp.419-436. DOI: 10.22059/jfisheries.2020.297616.1138 [In Persian]
 4. Asriqah, L., Nugroho, R.A. and Aryani, R., 2018. Effect of various organic acid supplementation diets on *Clarias gariepinus* BURCHELL, 1822: Evaluation of growth, survival and feed utilization. *F1000Research*, 7(1), 1465. DOI: 10.12688/f1000research.15954.1
 5. Badzohreh, G., Zarei, S., Davoodi, R., Nasifi Bahabadi, M., Salehi, F., Morshedi, V., Sotudeh, E., 2020. Effects of different levels of dietary butyric acid on some growth performance, immunity and digestive enzymes activity of yellowfin seabream (*Acanthopagrus latus* Houttuyn, 1782). *Aquatic Animals Nutrition*, 6(3), pp.55-67. DOI: 10.22124/janb.2021.18938.1124 [In Persian]
 6. Busti, S., Rossi, B., Volpe, E., Ciulli, S., Piva, A., D'Amico, F., Soverini, M., Candela, M., Gatta, P.P., Bonaldo, A., Grilli, E. and Parma, L., 2020. Effects of dietary organic acids and nature identical compounds on growth,

- means of diseases control in aquaculture, a review of current knowledge and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 12(9), pp.24-29. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02429
18. Hussein, E.E., Habiba, M.M., Ashry, A.M., Al-Zayat, A.M., Teiba, I.I., Shehata, A.I., Shahin, S.A., El-Ratel, I.T., Mzengereza, K., Tembo, M. and El Basuini, M.F., 2023. Effects of dietary supplementation with organic acids mixture on growth, feed efficiency, hematobiochemical parameters, immunity, and intestinal microbiota of Gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles. *Aquaculture Reports*, 23(1), 101846. DOI: 10.1016/j.aqrep.2023.101846
 19. Huyben, D., Chiasson, M., Lumsden, J.S., Pham, P.H. and Chowdhury, M.A.K., 2021. Dietary Microencapsulated Blend of Organic Acids and Plant Essential Oils Affects Intestinal Morphology and Microbiome of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Microorganisms*, 9(10), 2063. DOI: 10.3390/microorganisms9102063
 20. Katya, K., Park, G., Bharadwaj, A.S., Browdy, C.L., Vazquez-Anon, M., Bai, S.C., 2018. Organic acids blend as dietary antibiotic replacer in marine fish olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Aquaculture Research*, 49(1), pp.137-149. DOI: 10.1111/are.13749
 21. Khursheed Khan, S., Dutta, J., Ahmad, I. and Ashraf Rather, M., 2024. Nanotechnology in aquaculture: Transforming the future of food security. *Food Chemistry: X*, 24(7), 101974. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101974
 22. Kirchgessner, M. and Roth, F.X., 1995. Organic acids as a feed additive in pig nutrition. *Animals*, 43(1), pp.253-254. DOI: 10.22358/jafs/69953/1998
 23. Koh, C.B., Romano, N., Siti Zahrah, A. and Ng, W.K., 2014. Effects of a dietary organic acids blend and oxytetracycline on the growth, nutrient *Animals Nutrition*, 5(2), pp.27-38. DOI: 10.22124/janb.2020.15896.1082 [In Persian]
 12. Fabay, R.V., Serrano Jr, A.E., Alejos, M.S. and Fabay, J.V., 2022. Effects of dietary acidification and acid source on fish growth and feed efficiency (Review). *World Academy of Sciences Journal*, 4(3), pp.2632-2919. DOI: 10.3892/wasj.2022.156
 13. Freitag, M., 2007. Organic acids and salt promote performance and health in animal husbandry. In: Luckstadt C, editor. Acidifier in animal nutrition. A Guide for Feed Preservation and Acidification to promote Animal Performance. 1st ed: Nottingham University press, Nottingham, UK; pp.1-11.
 14. Goh, C., Gibson-Kueh, S., Bal, D., Chen, I.T., Nuez-Ortín, W., Domingos, J.S. and Shen, X., 2025. A synergistic blend of dietary organic acids, monoglycerides and phytobiotics enhance growth performance, intestinal mucosal height, and anti-viral immune gene expression in juvenile Barramundi (*Lates calcarifer*). *Aquaculture Reports*, 41(2), 102692. DOI: 10.1016/j.aqrep.2025.102692
 15. Hadidi, S. and Taati, R., 2016. Effect of different levels of dietary Biotronic™ as acidifier supplement on feed efficiency and some hematological and immune parameters of tiger Oscar (*Astronotus ocellatus*). *Iranian Veterinary Journal*, 12(3), pp.32-41. DOI: 10.22055/ivj.2016.34438 [In Persian]
 16. Hosseini, S.M., Yousefi, M., Afzali-Kordmahalleh, A., Pagheh, E. and Taheri Mirghaed, A., 2023. Effect of dietary lactic acid supplementation on the activity of digestive and antioxidant enzymes, gene expression, and bacterial communities in the intestine of Common carp, *Cyprinus carpio*. *Animals*, 13(12), 1934. DOI: 10.3390/ani13121934
 17. HosseiniFar, S.H., Sun, Y.Z., Wang, A. and Zhang, Z., 2018. Probiotics as

- Volpe, E., Ciulli, S., Piva, A., D'Amico, F., Scicchitano, D., Candela, M., Gatta, P.P., Bonaldo, A. and Grilli, E., 2020. Effects of increasing dietary level of organic acids and nature-identical compounds on growth, intestinal cytokine gene expression and gut microbiota of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared at normal and high temperature. *Fish and Shellfish Immunology*, 107(1), pp.324-335. DOI: 10.1016/j.fsi.2020.10.021
31. Pelyuntha, W., Yafa, A., Charoenwong, B. and Vongkamjan, K., 2022. Effectiveness of the organic acid-based antimicrobial agent to prevent bacterial contamination in fish meal. *Animals*, 12(23), 3367. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12233367>
32. Rsd, R., Pamungkas, W., Handajani, H. and Puspaningsih, D., 2024. Sustaining aquaculture: Organic acid as feed additives in aquaculture. In: Gabriel, N.N., Abasubong, K.P., Erasmus, V.N., Kamble, M.T. (Eds). Sustainable feed ingredients and additives for aquaculture farming. Sustainability Sciences in Asia and Africa. Springer, Singapore. pp. 481-500.
33. Simón, R., Docando, F., Nuñez-Ortiz, N., Tafalla, C. and Díaz-Rosales, P., 2021. Mechanisms used by probiotics to confer pathogen resistance to teleost fish. *Frontiers in Immunology*, 12(1), 653025. DOI: 10.3389/fimmu.2021.653025
34. Soleymani Iraei, M., Sajjadi, M.M., Keramat Amirkolaei, A., Fathi, A. and Karimzadeh, S., 2012. Effects of different levels of organic acids on growth performance, body composition and hematological parameters of rainbow trout fry (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 1(3), pp.1-14. [In Persian]
35. Torres-Maravilla, E., Parra, M., Maisey, K., Vargas, R.A., Cabezas-Cruz, A., Gonzalez, A., Tello, M. and Bermúdez-Humarán, L.G., 2024. Importance of probiotics in fish utilization and total cultivable gut microbiota of the red hybrid tilapia, *Oreochromis* sp., and resistance to *Streptococcus agalactiae*. *Aquaculture Research*, 47(2), pp.357-369. DOI: 10.1111/are.12492
24. Kotzamanis, Y.P., Gisber, E., Gatesoup, F.J., Zambonino Infant, J. and Cahu, C., 2007. Effect of different dietary levels of fish protein hydrolysates on growth, digestive enzyme, gut microbiota, and resistance to *Vibrio anguillarum* in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 147(1), pp.205-214. DOI: 10.1016/j.cbpa.2006.12.037
25. Lückstädt, C., 2007. Effect of organic acid containing additives in worldwide aquaculture-sustainable production the non-antibiotic way. In: Acidifier in Animal Nutrition-A Guide for Feed Preservation and Acidification to Promote Animal Performance. Nottingham University Press, Nottingham; pp, 71-77.
26. Luckstadt, C., 2008. The use of acidifiers in fish nutrition. *Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 3(044), pp.1-8. DOI: 10.1079/PAVSNNR20083044
27. Ng, W.K. and Koh, C.B., 2017. The utilization and mode of action of organic acids in the feeds of cultured aquatic animals. *Reviews in Aquaculture*, 9(4), pp.342-368. DOI: 10.1111/raq.12141
28. Onomu, A.J. and Okuthe, G.E., 2024. The role of functional feed additives in enhancing aquaculture sustainability. *Fishes*, 9(5), 167. DOI: 10.3390/fishes9050167
29. Pandey, A. and Satoh, S., 2008. Effects of organic acids on growth and phosphorus utilization in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Fisheries Science*, 74(4), pp.867-874. DOI: 10.1111/j.1444-2906.2008.01601.x
30. Pelusio, N.F., Rossi, B., Parma, L.,

- aquaculture: Towards the identification and design of novel probiotics. *Microorganisms*, 12(3), 626. DOI: DOI:10.3390/microorganisms12030626
36. Yilmaz, S., Ergun, S., Çelik, E.Ş., Yigit, M., 2018. Effects of dietary humic acid on growth performance, haemato-immunological and physiological responses and resistance of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* to *Yerdinia ruckeri*. *Aquaculture Research*, 49(3), pp.3338-3349. DOI: 10.1111/are.13798
37. Zhou, Z., Liu, Y., Wang, P., He, S., Yao, B., Gao, X. and Wang, X., 2008. The effect of dietary potassium diformate on growth performance, feed conversion and intestinal microbiota of hybrid tilapia. Book of Abstract XIII International and Feeding, June 1-5, Brazil, p.193.