CC BY

مقاله مروری:

کاربردهای متابولومیک و ژنومیک برای بهبود رشد و تولید در آبزی‌پروری زینتی

رضا نهاوندی*[1]، سجاد پورمظفر[2]، اسد عباسپور انبی[3]

*Rezanahavandi91@gmail.com

۱- موسسه تحقیقات علوم دامی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲- ایستگاه تحقیقات نرم تنان خلیج فارس، پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرلنگه، ایران
۳- مرکز تحقیقات آرتمیای کشور، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: آبان ۱۴۰۴

چکیده

صنعت آبزی‌پروری تزئینی به یکی از عوامل مهم در اقتصاد آبزیان تبدیل شده است و در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته و تأثیر قابل توجهی بر اشتغال و صادرات گذاشته است. به دلیل حساسیت‌های زیستی و تنوع گونه‌ها در این بخش، به‌کارگیری رویکردهای بیوتکنولوژی مولکولی، مانند ژنومیک و متابولومیک، باعث بهبود عملکرد رشد، سلامت و پایداری سیستم‌های آکواریومی شده است. ژنومیک به شناسایی ژن‌های مرتبط با صفات ارزشمند کمک می‌کند، در حالی که متابولومیک نمایه‌های متابولیکی را برای پایش و بهینه‌سازی دقیق ارائه می‌دهد. استفاده ترکیبی از این فناوری‌های «اومیکس»، با کمک توالی‌یابی نسل جدید و تحلیل داده‌ها، مدیریت هوشمند سیستم و کارایی اقتصادی را ممکن می‌سازد. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا، نیاز به تخصص‌های بین‌رشته‌ای و محدودیت‌های زیستی همچنان وجود دارد و لزوم همکاری علمی و نوآوری تکنولوژیک را نشان می‌دهد. پیشرفت‌های مستمر و توسعه زیرساخت‌ها نوید آینده‌ای امیدوارکننده برای اجرای این فناوری‌ها، بهبود کیفیت تولید و حمایت از تنوع زیستی را می‌دهد. این مقاله مروری، اصول، کاربردها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده ژنومیک و متابولومیک در آبزی‌پروری تزئینی را بررسی می‌کند.

کلمات کلیدی: آبزی‌پروری زینتی، ژنومیک، متابولومیک، فناوری‌های اومیکس، تولید آبزیان، سلامت ماهیان، پایداری اکوسیستم

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

مقدمه

صنعت آبزی‌پروری زینتی به عنوان یکی از بخش‌های مهم و رو به رشد اقتصاد آبزیان، طی دهه‌های اخیر توجه فراوانی به‌خود جلب کرده است. این صنعت نه‌تنها با هدف زیبایی و شادابی محیط زندگی تحقق یافته بلکه نقش قابل‌توجهی در اشتغال‌زایی و تجارت بین‌المللی ایفاء کرده است. با توجه به تنوع زیستی آبزیان زینتی و حساسیت بالای این گونه‌ها نسبت به شرایط محیطی، بهبود عملکرد رشد و افزایش تولید در سیستم‌های آکواریومی حتی‌المقدور در عرصه حفظ سلامت و پایداری اکوسیستم‌های آبی از اهمیت بالایی برخوردار است (Tripathy *et al*., 2021).

در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین زیست‌فناوری مولکولی (ژنومیکس و متابولومیکس)، تحولات چشمگیری را در درک و بهبود فرآیندهای زیستی و متابولیک موجودات آبزی ایجاد کرده‌اند (Ladisa *et al*., 2022). ژنومیکس به مطالعه ساختار، عملکرد و تعاملات ژن‌های کل ژنوم آبزیان می‌پردازد و امکان شناسایی ژن‌های مرتبط با صفات مورد نظر (رشد سریع، مقاومت به بیماری‌ها و تحمل به شرایط محیطی مختلف) را فراهم می‌آورد.(Alfaro *and Young*, 2016) این فناوری، زمینه‌ای نوین برای توسعه برنامه‌های اصلاح نژادی دقیق و هدفمند در آبزیان زینتی ایجاد کرده است. در مقابل، متابولومیکس مطالعه جامع مجموعه متابولیت‌هاست (مواد کوچک و واسطه‌های بیوشیمیایی) که وضعیت فیزیولوژیک و پاسخ‌های بیوشیمیایی بدن آبزیان را در شرایط مختلف نشان می‌دهد (Gelderen *et al.,* 2023).

تحلیل ترکیب متابولیک آبزیان در سیستم‌های آکواریومی نه‌تنها به درک بهتری از فرآیندهای متابولیک کمک می‌کند بلکه به شناسایی نشانگرهای زیستی حساس و دقیق برای پایش سلامت و عملکرد رشد آبزیان می‌انجامد. متابولومیکس نقش مهمی در بهینه‌سازی رژیم غذایی، شرایط زیستی و مدیریت استرس‌های محیطی ایفاء می‌کند (Li *et al*., 2025). ترکیب رویکردهای ژنومیکس و متابولومیکس، دید جامعی از تأثیرات ژنتیکی و متابولیک بر رشد، تولید و سلامت آبزیان زینتی ارائه می‌دهد و به توسعه استراتژی‌های مدیریتی هوشمندانه و تخصصی می‌انجامد (Andersen *et al*., 2025).

این رویکرد سیستمی، با بهره‌گیری از داده‌های چند لایه‌ای و فناوری‌های زیستی پیشرفته نظیر نسل جدید توالی‌یابی و تحلیل داده‌های بزرگ، امکان مدیریت دقیق‌تر و بهینه‌تر سیستم‌های آکواریومی و افزایش بهره‌وری اقتصادی را فراهم می‌کند (Reid and Bergsveinson, 2021).

با وجود این، چالش‌های متعددی از جمله نیاز به تخصص‌های میان‌رشته‌ای، هزینه‌های بالای اجرای پروژه‌های مولکولی و محدودیت‌های زیستی در ترجمه یافته‌های آزمایشگاهی به شرایط واقعی سیستم‌های پرورشی وجود دارد که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و همکاری بین‌المللی است. به‌علاوه، پیشرفت‌های پیوسته در تکنولوژی و نصب زیرساخت‌های تحقیقاتی جدید، نویدبخش آینده‌ای روشن برای بهره‌برداری کاربردی از ژنومیکس و متابولومیکس در بخش آبزیان زینتی است (Yáñez *et al*., 2015). در این مقاله، ضمن بررسی مبانی و مفاهیم ژنومیکس و متابولومیکس، کاربردها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده این فناوری‌ها در بهبود عملکرد رشد و افزایش تولید آبزیان زینتی در سیستم‌های آکواریومی، مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین نمونه‌های کاربردی موفق از تحقیقات و پروژه‌های به‌کارگیری این فناوری‌ها در محیط‌های آکواریومی معرفی خواهد شد تا تصویر جامعی از تاثیر آن‌ها در توسعه صنعت آبزی‌پروری زینتی ارائه شود .

تعریف ژنومیکس و متابولومیکس

ژنومیکس و متابولومیکس دو شاخه کلیدی و مکمل علم زیست‌فناوری مولکولی هستند که در دهه‌های اخیر نقش بسیار برجسته‌ای در تحلیل و بهبود عملکرد موجودات زنده به‌ویژه در حوزه آبزیان زینتی و سیستم‌های آکواریومی ایفاء کرده‌اند. ژنومیکس شاخه‌ای از زیست‌شناسی مولکولی است که به مطالعه کل ژن‌ها و ساختار ژنتیکی یک موجود زنده می‌پردازد (Sun *et al*., 2025).

این رشته علمی، فراتر از تجزیه‌وتحلیل ژن‌های منفرد، به بررسی کل مجموعه DNA موجود در سلول‌های یک ارگانیسم اشاره دارد که در اصطلاح به آن «ژنوم» گفته می‌شود. ژنوم تمامی اطلاعات ژنتیکی لازم برای توسعه، عملکرد، رشد و واکنش‌های زیستی آن موجود را دربرمی‌گیرد (Yuan *et al*., 2024). پیشرفت‌های فناوری‌های توالی‌یابیDNA در سال‌های اخیر به‌ویژه ظهور توالی‌یابی نسل جدی (NGS)، امکان تعیین توالی دقیق ژنوم گونه‌های مختلف از جمله آبزیان زینتی را فراهم کرده است (Yusuf *et al*., 2025). این داده‌های ژنومی، امکان کشف

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

ژن‌های کنترل‌کننده صفات مهم (سرعت رشد، مقاومت به بیماری‌ها، تنظیم رفتارهای زیستی و سازگاری با شرایط محیطی) را فراهم می‌آورد. در حوزه آکواریوم و نگهداری آبزیان زینتی، شناخت عمیق ساختار ژنتیکی این گونه‌ها می‌تواند منجر به اصلاح نژادی هدفمند و بهبود مدیریت شرایط پرورشی شود (Yang *et al*., 2021). علاوه بر تعیین توالی، تحلیل داده‌های ژنومیک به شناسایی پلی‌مورفیسم‌ها (تغییرات ژنتیکی کوچک در DNA) که منجر به تفاوت‌های فنوتیپی بین افراد یا جمعیت‌ها می‌شود، می‌پردازد. این اطلاعات نقش مهمی در جهت افزایش بهره‌وری و پایداری جمعیت‌ها ایفاء می‌کنند (Piferrer, 2023).

همچنین ژنومیکس مسیرهای تعاملی ژن و محیط را بررسی نموده و با استفاده از روش‌هایی مانند مطالعه اپی‌ژنتیک، چگونگی تنظیم بیان ژن‌ها بدون تغییر توالی DNA را مطالعه می‌کند (Reid and Bergsveinson, 2021). در نهایت، چالش‌های ژنومیکس در آبزیان زینتی عبارتند از حجم بالای داده‌ها، نیاز به تحلیل‌های پیچیده و تخصصی و تطبیق یافته‌های ژنتیکی با کاربردهای عملی در محیط‌های آکواریومی که همه این موارد نیازمند همکاری‌های بین‌رشته‌ای و استفاده از ابزارهای پیشرفته محاسباتی و بیوانفورماتیک است (Mohanty *et al*., 2019).

متابولومیکس نیز یکی از شاخه‌های تخصصی علوم اومیکس است که به مطالعه جامع و سیستماتیک مجموعه متابولیت‌ها یا مولکول‌های کوچک زیستی درون یک سلول، بافت یا ارگانیسم زنده می‌پردازد (Zhang *et al*., 2025). متابولیت‌ها شامل مواد آلی کوچک مانند اسیدهای آمینه، قندها، لیپیدها، نوکلئوتیدها و سایر مولکول‌هایی هستند که به عنوان واسطه‌ها و محصولات واکنش‌های متابولیک عمل می‌کنند. اهداف متابولومیکس، شناسایی، اندازه‌گیری و تحلیل تغییرات کمّی و کیفی این متابولیت‌ها در پاسخ به عوامل ژنتیکی، محیطی، بیماری‌ها و تغییرات فیزیولوژیک است. این رشته، تصویری پویا و واقعی از وضعیت زیستی و عملکرد سلول ارائه می‌دهد که به عنوان فنوتایپ مولکولی شناخته می‌شود و کاملاً مکمل داده‌های ژنومیک است. از لحاظ تکنیکی، متابولومیکس با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند طیف‌سنجی جرمی (MS)، رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و کروماتوگرافی مایع-جرمی(LC-MS) قادر به شناسایی صدها تا هزاران متابولیت در نمونه‌های زیستی است (Dhillon *et al*., 2025). این داده‌ها به دانشمندان اجازه می‌دهد، مسیرهای متابولیک در موجودات زنده را در سطح بیوشیمیایی تحلیل نموده و ترکیب متابولیک را در شرایط مختلف بررسی نمایند. متابولومیکس در زمینه آبزیان زینتی، دستاوردهای قابل‌توجهی دارد که شامل بهبود درک پاسخ‌های زیستی به استرس‌های محیطی، تغذیه بهتر، شناسایی نشانگرهای زیستی بیماری‌ها و بهینه‌سازی شرایط نگهداری می‌شود (Lokman and Symonds, 2014).

همچنین این رشته می‌تواند نقش مهمی در شناسایی تغییرات متابولیک ناشی از تعاملات پیچیده بین آبزیان و محیط زیست پیرامون داشته باشد. محدودیت‌هایی همچون ناپایداری متابولیت‌ها، پیچیدگی در تحلیل داده‌های حجم بالا و نیاز به مدل‌سازی دقیق مسیرهای شبکه‌ای متابولیک از چالش‌های اساسی در متابولومیکس است. با این حال، پیشرفت سریع در فناوری‌های تحلیلی و توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین، روز به روز توانمندی‌های این رشته را در حل مسائل زیستی گسترش می‌دهد (Ovchinnikova and Shi., 2023).

کاربردهای ژنومیکس در سیستم‌های آکواریومی

کاربردهای ژنومیکس در سیستم‌های آکواریومی (آبزیان زینتی) موضوعی نوین و پیچیده است که هم‌اکنون در مرزهای تحقیقاتی علم زیست‌فناوری قرار دارد و می‌تواند به طرز قابل‌توجهی در بهبود کارایی و کیفیت تولید در این سیستم‌ها تاثیرگذار باشد.

۱- شناسایی ژن‌های مرتبط با رشد و توسعه ژنومیکس، امکان شناسایی دقیق ژن‌هایی را فراهم می‌کند که به طور مستقیم بر سرعت رشد و کیفیت آبزیان زینتی تأثیرگذارند. با تحلیل توالی‌های ژنی، پژوهشگران قادرند، ژن‌های کنترل‌کننده متابولیسم انرژی، سنتز پروتئین و فرآیندهای رشد سلولی را شناسایی و بررسی کنند. این دانش به توسعه برنامه‌های اصلاح نژادی هدفمند کمک می‌کند که در آنها انتخاب آبزیانی با ظرفیت رشد سریع و بهینه‌سازی نسبت روغن و پروتئین در بافت‌های بدن ممکن می‌شود (Hu *et al*., 2023). شناسایی ژن‌های موثر در رشد، با بهبود انتخاب و مدیریت ژنتیکی، منجر به کاهش زمان بلوغ، افزایش اندازه و بهبود تناسب اندام آبزیان در اقلیم‌های مختلف می‌شود. این امر ضمن افزایش بهره‌وری اقتصادی، کاهش هزینه‌های پرورش و تغذیه را نیز به‌دنبال دارد (Zafar *et al*., 2025).

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

۲- مدیریت مقاومت به بیماری‌ها و افزایش سلامت آبزیان، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های صنعت آبزی‌پروری، جلوگیری و کنترل بیماری‌های مزمن است که می‌تواند موجب خسارت‌های اقتصادی سنگین شود. ژنومیکس با شناسایی ژن‌های مرتبط با سیستم ایمنی و مقاومت طبیعی به بیماری‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود سلامت آبزیان ایفاء می‌کند. این اطلاعات اجازه می‌دهد تا گونه‌های مقاوم‌تر نسبت به عوامل بیماری‌زا شناسایی شده و در برنامه‌های اصلاح نژادی وارد شوند. به‌علاوه، شناسایی نشانگرهای ژنتیکی برای پاسخ ایمنی به واکسن‌ها و داروهای ضدباکتریایی، راهکارهای نوینی را برای بهینه‌سازی روش‌های درمان و پیشگیری فراهم می‌کند. با کمک ژنومیکس، می‌توان به درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های دفاعی آبزیان دست یافت و برنامه‌های مدیریت زیستی دقیق‌تری تدوین نمود (Zhu *et al*., 2024).

۳- بهبود تحمل به شرایط محیطی و استرس‌های زیستی سیستم‌های آکواریومی اغلب تحت تأثیر عوامل محیطی متغیر (دما، شوری، کیفیت آب) و تنش‌های اکسیداتیو قرار دارند که می‌توانند رشد و سلامت آبزیان را تحت تأثیر قرار دهند. ژنومیکس امکان شناسایی ژن‌های مسئول پاسخ به استرس‌های محیطی را فراهم می‌آورد. این یافته‌ها به تعیین گونه‌ها و نمونه‌هایی با توان تحمل بالاتر نسبت به شرایط محیطی نامساعد کمک می‌کند. مطالعات ژنومیک بر تنظیم بیان ژن‌ها در پاسخ به تغییرات شاخص‌هوای محیطی، امکان بهینه‌سازی شرایط پرورشی و انتخاب آبزیان مقاوم‌تر به استرس را فراهم می‌سازد. این استراتژی‌ها باعث افزایش پایداری سیستم‌های آکواریومی و کاهش تلفات ناشی از شرایط نامطلوب می‌شوند (Pereiro, 2022).

۴- مدیریت جمعیت و تنوع زیستی حفظ تنوع ژنتیکی جمعیت‌های آبزیان زینتی از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا این تنوع، منبع اصلی سازگاری و بقاء گونه‌ها در برابر تغییرات محیطی و بیماری‌هاست. ژنومیکس با توصیف دقیق ساختار و تنوع ژنتیکی جمعیت‌ها، به برنامه‌ریزی حفاظت و مدیریت بهتر منابع طبیعی و سیستم‌های پرورشی کمک می‌کند. با استفاده از داده‌های ژنومیک، امکان تشخیص خط‌های خونی، اجتناب از انجماد ژنتیکی و حفظ تنوع در جمعیت‌ها وجود دارد که این مسئله به لحاظ اقتصادی و پایداری زیستی، بسیار مهم است. این روش‌ها تضمین می‌کنند که نسل‌های آینده آبزیان زینتی از نظر ژنتیکی قوی و سالم باقی بمانند (Yang *et al*., 2024).

۵- انتقال و ویرایش ژن برای ارتقاء شاخص‌های تولیدی پیشرفت‌های فناوری‌هایی مانند CRISPR-Cas9 در حوزه ویرایش ژن، امکان اصلاح مستقیم ژنوم آبزیان را به منظور افزایش کارایی رشد، مقاومت به بیماری و بهبود صفات ظاهری فراهم کرده است (Jin *et al*., 2023). این فناوری‌ها می‌توانند صفاتی خاص که در ژنتیک طبیعی یا از طریق اصلاح نژادی سنتی به‌سختی قابل دستیابی هستند، به سرعت و با دقت بالا در آبزیان زینتی جایگزین کنند. با اعمال تغییرات هدفمند در ژنوم، می‌توان ویژگی‌های اقتصادی و زیستی مطلوب را در آبزیان ایجاد کرد که این امکان، چشم‌انداز جدیدی را در توسعه صنعت آکواریوم فراهم می‌آورد (Yusuf *et al*., 2025).

۶- تحلیل تعاملات ژنتیکی پیچیده و زیست‌محیطی ژنومیکس با استفاده از ابزارهای بیوانفورماتیک پیشرفته ترکیب داده‌های ژنتیکی با داده‌های زیست‌محیطی، به تحلیل تعاملات پیچیده بین ژن‌ها و محیط می‌پردازد. این رویکرد چندلایه، امکان پیش‌بینی پاسخ آبزیان به تغییرات محیطی و بهبود مدیریت زیست‌فناوری را میسر می‌سازد. تحلیل‌های سیستماتیک داده‌های ژنومی در کنار داده‌های زیست‌محیطی باعث ایجاد مدل‌های پیشرفته مدیریتی می‌شود که براساس آنها می‌توان شرایط بهینه را برای نگهداری و پرورش آبزیان زینتی تعیین کرد. این مدل‌ها نقش مهمی در توسعه پایدار و حفظ کیفیت محصولات آکواریومی دارند (Nguyen *et al*., 2022).

کاربردهای متابولومیکس در آبزیان زینتی

کاربردهای متابولومیکس در آبزیان زینتی، زمینه پیشرفته و نوآورانه از زیست‌فناوری آبی است که می‌تواند به صورت مؤثر در بهبود فرآیندهای رشد، سلامت، و افزایش تولید این گونه‌ها نقش ایفاء کند.

۱- شناخت دقیق وضعیت فیزیولوژیک و سلامت آبزیان متابولومیکس با تحلیل گسترده و سیستماتیک مجموعه کوچک مولکول‌های زیستی (متابولیت‌ها) در بدن آبزیان، تصویری جامع و واقعی از وضعیت فیزیولوژیک و عملکرد زیستی آنها ارائه می‌دهد. این تکنیک امکان شناسایی دقیق تغییرات متابولیک ناشی از استرس‌های محیطی، بیماری‌ها

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

یا تغییرات تغذیه‌ای را فراهم می‌کند. برای مثال، تغییرات سطوح متابولیت‌های انرژی‌زا، آنتی‌اکسیدان‌ها یا مولکول‌های دخیل در مسیرهای دفاعی در پاسخ به شرایط نامطلوب آکواریوم قابل بررسی است که به مدیریت بهتر و پیشگیری از آسیب‌های جدی کمک می‌کند (Li *et al*., 2025).

۲- بهینه‌سازی رژیم غذایی و تغذیه هدفمند بررسی ترکیب های متابولومیک آبزیان زینتی به شناسایی نیازهای تغذیه‌ای خاص آنها کمک می‌کند. این روش امکان تعیین نوع و مقدار دقیق مواد غذایی لازم را برای رشد بهینه و سلامت فیزیولوژیک فراهم می‌سازد. به کمک متابولومیکس، می‌توان اثرات ترکیبات مختلف غذایی را بر مسیرهای متابولیک بررسی و رژیم‌های غذایی بهینه و تخصصی طراحی کرد که منجر به افزایش کیفیت تولید و کاهش ضایعات تغذیه‌ای می‌شود (Young *et al*., 2023).

۳- تشخیص و پایش بیماری‌ها و استرس‌های اکسیداتیو متابولومیکس ابزاری قدرتمند در تشخیص زودهنگام بیماری‌ها و استرس سلولی است. تغییرات خاص در ترکیب متابولیت‌ها می‌تواند نشان‌دهنده بروز اختلالات متابولیک ناشی از عوامل بیماریزا یا استرس‌های محیطی باشد. این تشخیص‌های سریع و غیر تهاجمی به پرورش‌دهندگان اجازه می‌دهد که پیش از بروز علائم بالینی، اقدام‌های پیشگیرانه را انجام دهند که این موضوع تا حد زیادی از تلفات آبزیان جلوگیری کرده و سلامت کل سیستم آکواریومی را حفظ می‌کند (Rasal *et al*., 2024).

۴- مطالعه تعاملات پیچیده زیست‌محیطی و اکولوژیک با استفاده از متابولومیکس، می‌توان تعاملات شیمیایی میان آبزیان، میکروارگانیسم‌ها و محیط زندگی آنها را درک کرد. این تعاملات شامل انتقال و تبادل متابولیت‌ها، تنظیم همزیستی و پاسخ به تغییرات محیطی هستند که نقش کلیدی در حفظ تعادل و پایداری اکوسیستم آکواریومی دارند. مطالعه این پیچیدگی‌ها به طراحی سیستم‌های پرورشی پایدارتر و هماهنگ‌تر با نیازهای زیستی آبزیان کمک می‌کند (Yue and Wang., 2017).

۵- توسعه نشانگرهای زیستی[1] برای بهبود کیفیت پرورش از طریق تحلیل متابولومیک، می‌توان نشانگرهای زیستی خاصی را شناسایی کرد که شاخص‌های قابل اطمینان سلامتی، استرس یا کیفیت رشد آبزیان زینتی هستند. این نشانگرها به عنوان ابزاری تشخیصی و کنترلی برای ارزیابی سلامت جمعیت‌ها و بازخورد بهینه‌سازی شرایط پرورشی به‌کار می‌روند و می‌توانند مبنایی برای توسعه سیستم‌های اتوماسیون و هوش مصنوعی در مدیریت سیستم‌های آکواریومی فراهم کنند (Jitjumnong *et al*., 2025).

۶- کمک به فرایند اصلاح نژادی و ارتقاء صفات تولیدی رتبه‌بندی و انتخاب بر اساس ترکیب های متابولیتیک مکمل داده‌های ژنومی می‌تواند فرایند اصلاح نژادی را دقیق‌تر و هدفمندتر سازد. ترکیب داده‌های متابولومیکس با ژنومیکس به عنوان یک رویکرد چندلایه، امکان شناسایی مسیرهای بیوشیمیایی مرتبط با صفات اقتصادی را فراهم کرده و به رشد سریع‌تر، سلامت بهتر و قابلیت تحمل بیشتر به استرس کمک می‌کند (Nogueira and Botelho, 2021).

تلفیق روش‌های ژنومیکس و متابولومیکس

تلفیق روش‌های ژنومیکس و متابولومیکس، نقطه عطفی در پیشبرد علم زیست‌فناوری مولکولی به‌شمار می‌آید که امکان درک عمیق‌تر و جامع‌تری از مکانیسم‌های زیستی را در سطح مولکولی فراهم می‌سازد. این رویکرد ترکیبی نه‌تنها بر جمع‌آوری داده‌های ژنتیکی و متابولیک تاکید می‌کند بلکه به تحلیل و تفسیر پیچیدگی‌های عملکرد زیستی موجودات زنده به‌ویژه آبزیان زینتی در سیستم‌های آکواریومی می‌پردازد (Clark *et al*., 2023).

روش‌های ژنومیکس با فراهم آوردن نمای کلان و دقیقی از ساختار و عملکرد ژن‌ها، چارچوبی برای شناسایی ژن‌های کلیدی مرتبط با صفات مختلف فراهم می‌آورند. در مقابل، متابولومیکس با تحلیل طیف گسترده‌ای از متابولیت‌ها به عنوان واسطه‌ها و محصولات واکنش‌های زیستی، تصویری عملیاتی از فعالیت‌های متابولیک و واکنش‌های سلولی ارائه می‌دهد. ترکیب این دو حوزه، امکان ایجاد یک نقشه جامع و پویا از آنچه در سطح مولکولی اتفاق می‌افتد، فراهم می‌کند (Yusuf *et al*., 2025). در سیستم‌های آکواریومی، این تلفیق علمی به شناسایی مسیرهای ژنتیکی که بر جنبه‌های مختلفی مانند رشد، پاسخ به

[1] Biomarker

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

استرس‌ها، مقاومت به بیماری‌ها و سازگاری محیطی تأثیرگذارند، کمک می‌کند (Yan *et al*., 2025).

به‌علاوه، متابولومیکس تصاویر دقیقی از وضعیت سلامت و عملکرد متابولیک آبزیان ارائه می‌دهد که می‌تواند تغییرات ناشی از عوامل محیطی یا دارویی را به صورت زودهنگام تشخیص دهد. این داده‌ها در کنار هم، ابزاری دقیق برای توسعه استراتژی‌های مدیریت و بهبود شرایط پرورشی فراهم می‌سازند (Reverter *et al*., 2020). با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته (توالی‌یابی نسل جدید ژنوم و تکنیک‌های طیف‌سنجی جرمی و رزونانس مغناطیسی هسته‌ای در متابولومیکس) ، داده‌های پرحجمی از ژن‌ها و متابولیت‌ها تولید می‌شود که تحلیل آنها به کمک بیوانفورماتیک و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان استخراج الگوهای معنادار را فراهم می‌آورد. این فرآیند مدل‌سازی چندلایه، امکان پیش‌بینی نتایج زیستی و پاسخ‌های سلولی به شرایط مختلف را بهبود می‌بخشد. علاوه بر کاربردهای پژوهشی، این رویکرد تلفیقی در حوزه‌های عملیاتی (بهینه‌سازی تغذیه، انتخاب نژادهای مقاوم و طراحی محیط زیست آکواریوم)، نقش کلیدی دارد (Li *et al*., 2025).

علاوه‌برآن، مفاهیم زیست‌فناوری دقیق و شخصی‌سازی شده که از این تلفیق حاصل می‌شود، توان توسعه فناوری‌های نوین (نشانگرهای زیستی دقیق و فناوری‌های ویرایش ژن) را نیز در اختیار قرار می‌دهد. در نهایت، تلفیق ژنومیکس و متابولومیکس فرصتی برای حرکت به سوی مدیریت سیستم‌های پرورشی هوشمند و پایدار است که از توانمندی پاسخ سریع و موثر به تغییرات محیطی و زیستی برخوردار است و موجب افزایش بهره‌وری اقتصادی و حفظ سلامت زیستی آبزیان زینتی در سیستم‌های آکواریومی می‌شود. این چشم‌انداز، نقطه آغاز مسیر نوینی در زیست‌فناوری آبی است که با ترکیب داده‌های مولکولی و تحلیل‌های جامع می‌تواند صنایع پرورش آبزیان را متحول سازد (Ovchinnikova and Shi, 2023).

نقش فناوری‌های نوین و پرتوهای پیشرفته

نقش فناوری‌های نوین و پرتوهای پیشرفته در سیستم‌های آکواریومی بخصوص در پرورش آبزیان زینتی، به عنوان موتور محرکه تحول و توسعه پایدار در صنعت آبزی‌پروری شناخته می‌شود. این فناوری‌ها با هدف ارتقاء بهره‌وری تولید، بهبود کیفیت محیط زیست آکواریومی، افزایش سلامت و مقاومت آبزیان و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی به‌کار گرفته می‌شوند:

۱- اینترنت اشیا (IoT) و سامانه‌های هوشمند پایش

یکی از پیشروترین فناوری‌ها در سیستم‌های آکواریومی، اینترنت اشیاست که با نصب حسگرهای متعدد در محیط آکواریوم، امکان پایش لحظه‌ای شاخص‌های حیاتی (دما، اسیدیته، اکسیژن محلول، کیفیت آب) و حتی حرکات و رفتار آبزیان را فراهم می‌آورد. داده‌های جمع‌آوری شده به‌وسیله این سیستم‌ها به صورت بی‌وقفه به پردازنده‌های مرکزی منتقل شده و با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی تحلیل می‌شوند. این تحلیل‌ها به مدیریت هوشمند سیستم کمک می‌کند تا به سرعت نسبت به تغییرات محیطی واکنش نشان دهد، مثال بارز آن تنظیم خودکار میزان اکسیژن آب یا زمان و مقدار خوراک‌دهی بر اساس رفتار و شرایط زیستی آبزیان است (Kanwal *et al*., 2024).

۲- فناوری‌های تصویربرداری پیشرفته و بررسی بدون تهاجم

فناوری‌های تصویربرداری مانند دوربین‌های زیرآبی با وضوح بالا، سیستم‌های سونار و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی امکان نظارت بی‌درنگ بر سلامت و رشد آبزیان را بدون نیاز به دستکاری فیزیکی فراهم آورده‌اند. این فناوری‌ها با تجزیه و تحلیل تصاویر و فیلم‌ها قادر به تشخیص بیماری‌های اولیه، شناسایی گونه‌ها، ارزیابی تراکم جمعیت و حتی تحلیل رفتار اجتماعی آبزیان هستند. این روش‌ها ضمن حفظ محیط زیست آرام و طبیعی، به کاهش اضطراب و تلفات ناشی از دستکاری فیزیکی کمک می‌کنند (Zhang *et al*., 2025).

۳- هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در بهینه‌سازی پرورش

مصرف بهینه منابع مانند غذا و انرژی، پیش‌بینی بیماری‌ها و یافتن الگوهای رفتاری آبزیان از جمله چالش‌های عمده در سیستم‌های آکواریومی است. بهره‌گیری از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین این امکان را می‌دهد که با تحلیل حجم انبوه داده‌های محیطی و زیستی، پیش‌بینی‌های دقیق و تصمیم‌گیری‌های بهینه در مدیریت سیستم انجام شود. برای نمونه، نرم‌افزارهای هوشمند

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

می‌توانند زمان دقیق بیماری‌زایی را پیش‌بینی کرده و به پرورش‌دهنده هشدار دهند یا با تشخیص نیازهای تغذیه‌ای، به کاهش هزینه‌های خوراک کمک کنند (Lokman and Symonds, 2014).

۴- فناوری‌های نانو و کاربرد آنها در بهبود کیفیت آب و تغذیه

نانو فناوری در سیستم‌های آکواریومی به عنوان ابزاری برای تصفیه مؤثرتر آب و افزایش جذب مواد مغذی توسط آبزیان شناخته می‌شود. نانوذرات دارای قابلیت حذف آلاینده‌ها، سموم و عوامل بیماریزای آب را با کارایی بالا هستند و به کمک آنها می‌توان کیفیت زیستی محیط را حفظ کرد (Li *et al*., 2025). همچنین استفاده از نانو حامل‌ها در تغذیه به بهبود انتقال مواد مغذی و داروها به بدن آبزیان کمک می‌کند که در نهایت منجر به افزایش مقاومت و رشد سریع‌تر آنها می‌شود (Khan *et al*., 2024).

۵- بیوانفورماتیک و تحلیل داده‌های چندلایه

با توجه به حجم بالای داده‌های حاصله از ژنومیکس، متابولومیکس و فناوری‌های سنجش محیطی، تحلیل این داده‌ها نیازمند رویکردهای بیوانفورماتیک پیشرفته است. مدل‌سازی‌های رایانه‌ای و شبکه‌های تحلیلی اطلاعات، امکان درک بهتر روابط پیچیده بین ژن‌ها، متابولیت‌ها و عوامل محیطی را در سیستم‌های آکواریومی فراهم می‌آورد. این تحلیل‌ها ابزار برنامه‌ریزی دقیق برای اصلاح نژاد، بهینه‌سازی پروتکل‌های تغذیه‌ای و پیشگیری از بیماری‌ها هستند .(Dihllon *et al*., 2025).

۶- پرتوهای پیشرفته و فناوری‌های درمانی نوین

استفاده از پرتوهای پیشرفته (پرتوهای لیزری) برای درمان بیماری‌های پوستی و بافتی آبزیان یا بهبود شرایط محیطی از دیگر فناوری‌های نوین است که به کاهش مصرف داروهای شیمیایی و آنتی‌بیوتیک‌ها کمک می‌کند. همچنین فناوری‌هایی مانند ازون‌تراپی و استفاده از میدان‌های مغناطیسی در کنترل میکروارگانیسم‌های مضر و بهبود کیفیت آب نقش موثری ایفاء می‌کنند (Yáñez *et al*., 2022).

چشم‌انداز و تأثیرات زیست‌محیطی

فناوری‌های نوین در سیستم‌های آکواریومی نه‌تنها بهره‌وری اقتصادی را افزایش می‌دهند بلکه با کاهش استفاده از منابع طبیعی و مواد شیمیایی مضر، به حفظ محیط زیست کمک می‌کنند. به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از طریق سیستم‌های خودکار، امکان مدیریت پایدار منابع آبی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی را فراهم می‌آورد. توسعه این فناوری‌ها در مسیر هماهنگی با سیاست‌های زیست محیطی جهانی، ضامن حفظ تنوع زیستی و سلامت اکوسیستم‌های آبی است (Rasel *et al*., 2024).

چالش‌ها و محدودیت‌ها

چالش‌ها و محدودیت‌ها در بهره‌گیری از متابولومیکس، ژنومیکس و فناوری‌های نوین در سیستم‌های آکواریومی، به ویژه پرورش آبزیان زینتی، یک بخش حیاتی و تعیین‌کننده برای موفقیت و توسعه پایدار این حوزه است. آشنایی جامع و دقیق با این چالش‌ها، زمینه‌ساز ارائه راه‌حل‌های کاربردی و بومی‌سازی فناوری‌ها بر اساس شرایط محیطی و اقتصادی است.

۱- حجم بالای داده‌ها و نیاز به تحلیل‌های پیشرفته یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در استفاده از متابولومیکس و ژنومیکس، مدیریت و تحلیل حجم گسترده داده‌های مولکولی است. فناوری‌های پیشرفته توالی‌یابی و طیف‌سنجی، داده‌هایی در مقیاس ترابایت تولید می‌کنند که نیازمند زیرساخت‌های محاسباتی قوی، الگوریتم‌های بیوانفورماتیک پیشرفته و نیروی متخصص آموزش‌دیده برای تفسیر صحیح داده‌ها است. کمبود این منابع در بسیاری از کشورها و موسسات تحقیقاتی به‌ویژه در زمینه آبزیان زینتی که کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، از محدودیت‌های اساسی به‌شمار می‌رود. تحلیل داده‌های چندلایه به‌ویژه تلفیق داده‌های ژنومی و متابولومیک، پیچیدگی‌های محاسباتی و تفسیر زیستی بیشتری را می‌طلبد که بدون همکاری میان‌رشته‌ای و به‌کارگیری فناوری‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی نمی‌توان به نتایج رضایت‌بخش دست یافت (Zhang *et al*., 2025).

۲- هزینه‌های بالا و تجهیزات تخصصی اجرای پروژه‌های ژنومیکس و متابولومیکس در سیستم‌های آکواریومی نیازمند سرمایه‌گذاری‌های هنگفت برای خرید تجهیزات پیشرفته مانند دستگاه‌های توالی‌یابی نسل جدید، طیف‌سنجی جرمی، رزونانس مغناطیسی هسته‌ای و سامانه‌های جمع‌آوری و ذخیره‌سازی داده‌هاست. علاوه بر

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

تجهیزات، هزینه‌های بالای نیروی کار متخصص برای اجرای آزمایش‌ها، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج از دیگر محدودیت‌هاست. در حوزه آبزیان زینتی که به طور عمده صنایع کوچکتر و کمتر برخوردارند، این هزینه‌ها می‌توانند مانع جدی برای ورود فناوری‌های نوین شوند و باعث عقب‌ماندگی در مقایسه با صنایع پرورش آبزیان خوراکی گردند.(Ovchinnikova and Shi, 2023).

۳- پیچیدگی زیستی و تنوع ژنتیکی: آبزیان زینتی تنوع ژنتیکی و زیستی بالایی دارند که این خود موجب چالش‌های فراوانی در تحلیل داده‌های ژنومی و متابولومیک می‌شود. تفاوت‌های گونه‌ای، نژادی، زیستی و تنوع در شرایط پرورش، سبب پیچیدگی زیاد در استخراج الگوها و مدل‌های کاربردی می‌گردد. علاوه‌برآن، انتقال نتایج آزمایشگاهی به شرایط واقعی سیستم‌های آکواریومی نیازمند مطالعات طولانی‌مدت و مدیریت کنترل‌شده است که زمان‌بر و پرهزینه است و مانع تسریع کاربرد فناوری‌ها می‌شود (Andersen *et al*., 2025).

۴- مسائل مربوط به استانداردسازی و کیفیت داده‌ها یکی دیگر از چالش‌ها، عدم وجود پروتکل‌ها و معیارهای استاندارد جهانی برای نمونه‌برداری، استخراج و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در متابولومیکس و ژنومیکس آبزیان است. تفاوت در روش‌های آزمایشگاهی و شرایط عملیاتی موجب نوسانات بسیار در نتایج می‌شود که اعتبار و قابلیت بازتولید یافته‌ها را تضعیف می‌کند. استانداردسازی پروتکل‌ها به منظور تسهیل مقایسه و تلفیق داده‌ها بین آزمایشگاه‌ها و پروژه‌های تحقیقاتی مختلف ضروری است و تاکنون در حوزه آبزیان زینتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Yusuf *et al*., 2025).

۵- فقدان زیرساخت‌های پژوهشی و نیروی انسانی متخصص عدم دسترسی به آزمایشگاه‌های مجهز، فقدان دانش فنی کافی در علوم بیوانفورماتیک و کمبود پژوهشگران متخصص در زمینه‌های بین‌رشته‌ای، بزرگ‌ترین مانع توسعه و اجرای موفق این فناوری‌ها در بسیاری از مناطق به‌ویژه کشورهای در حال توسعه است. این مسأله به‌ویژه در حوزه خاص آبزیان زینتی که کمتر مورد توجه بین‌المللی قرار گرفته است، محسوس‌تر است. گرایش به آموزش و ایجاد زیرساخت‌های محلی، همکاری‌های بین‌المللی و تبادل دانش، می‌تواند به رفع این موانع کمک کند (Nguyen, 2024).

۶-مشکلات اجرایی و مدیریت داده‌ها جمع‌آوری داده‌ها در سیستم‌های آکواریومی نیازمند نظارت مداوم و کنترل دقیق شرایط پرورشی است. انسجام داده‌ها، مقابله با داده‌های ناقص یا ناصحیح و حفاظت از داده‌های حساس از چالش‌های عملیاتی جدی هستند. علاوه بر این، مدیریت داده‌های مرتبط با سلامت، رشد و شرایط محیطی مستلزم سامانه‌های نرم‌افزاری پیشرفته و مقررات امنیتی قوی است (Young *et al*., 2023).

۷- مسائل اخلاقی و پذیرش اجتماعی کاربرد فناوری‌های جدید مانند ویرایش ژن (CRISPR) با چالش‌های اخلاقی و قانونی روبروست. نگرانی‌های مرتبط با تغییرات ژنتیکی، نگرانی از تأثیرات زیست‌محیطی و بهداشتی و دغدغه‌های اجتماعی در رابطه با امنیت غذایی و تنوع زیستی، موانعی برای پذیرش سریع این فناوری‌ها به‌شمار می‌روند (Iqbal *et al*., 2025).

۸- محدودیت‌های زیست‌محیطی و تغییرات شرایط پرورشی شرایط متغیر محیطی (دما، کیفیت آب و عوامل استرس‌زا)، می‌توانند عملکرد سیستم‌های هوشمند را مختل کنند. انعطاف‌پذیری پایین این سامانه‌ها در برابر شرایط غیرمنتظره (بحران‌های محیطی)، مشکلات جدی برای کاربرد عملی فناوری‌ها ایجاد می‌کند (Kang *et al*., 2025).

چشم‌اندازهای آینده

چشم‌اندازهای آینده در به‌کارگیری متابولومیکس، ژنومیکس و فناوری‌های نوین در سیستم‌های آکواریومی به‌ویژه در حوزه آبزیان زینتی، نویدبخش تحولات بنیادین و پیشرفت‌های پایدار در صنعت آبزی‌پروری است. این چشم‌اندازها شامل توسعه فناوری‌های پیشرفته، بهبود روش‌های مدیریت، و ایجاد بسترهایی برای تولید بهینه و حفاظت زیست‌محیطی است (Wu *et al*., 2023). چشم‌اندازهای آینده در سیستم‌های آکواریومی (آبزیان زینتی) توسعه فناوری‌های نسل نوین در زیست‌فناوری پیشرفت‌های سریع در فناوری توالی‌یابی ژنوم و ارتقاء فناوری‌های متابولومیک، امکان دسترسی به داده‌های دقیق‌تر و سریع‌تر را فراهم می‌آورد. انتظار می‌رود، در آینده نزدیک با

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

کاهش هزینه‌ها، این فناوری‌ها در سطح وسیع‌تری در صنعت آبزی پروری زینتی به‌کار گرفته شده است و تحقیقات ژنومیک و متابولومیک به صورت روزمره و جامع انجام گیرد. همچنین ظهور فناوری‌های جدید مانند اپی‌ژنتیک، ترانسکریپتومیکس و پروتئومیکس به تکمیل و تعمیق دانش مولکولی کمک می‌کنند (Chandhini and Rejish Kumar, 2019).

این پیشرفت‌ها به ما اجازه می‌دهند تا با دقت بیشتری ژن‌های عامل رشد، مقاومت بیماری و سازگاری محیطی را شناسایی نموده و اصلاح‌های ژنتیکی هدفمند، پایدار و با کمترین تأثیرات جانبی را انجام داد. ادغام این فناوری‌ها با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، باعث بهبود کیفیت تشخیص‌ها و تصمیمات مدیریتی خواهد شد. حرکت به سوی سیستم‌های آکواریومی هوشمند و اتوماتیک استفاده گسترده از اینترنت اشیا، حسگرهای هوشمند و فناوری‌های ارتباطی پیشرفته، سیستم‌های آکواریومی را به محیط‌هایی تبدیل می‌کند که خودتنظیم، خودپایش و بهینه‌سازنده هستند (Yusuf *et al*., 2025). آینده سیستم‌های آکواریومی مبتنی بر طراحی‌های مدولار، قابلیت‌های اتوماسیون کامل و الگوریتم‌های یادگیری خودکار خواهد بود که شرایط بهینه را برای رشد و سلامت آبزیان به طور پیوسته تنظیم می‌کنند. این سیستم‌ها امکان پیش‌بینی و پیش‌گیری سریع از بیماری‌ها، تنظیم دقیق شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی آب و فراهم آوردن خوراک و مراقبت بهینه را بدون نیاز به دخالت مستقیم نیروی انسانی دارند (Nguyen, 2024).

این روند در نهایت باعث کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و ارتقاء کیفیت محصولات خواهد شد. توسعه بیوانفورماتیک و مدل‌سازی سیستم‌های زیستی پیشرفت در بیوانفورماتیک و علم داده، به تحلیل و تلفیق داده‌های متعدد ژنومیک، متابولومیک، محیطی و رفتاری کمک می‌کند. مدل‌سازی‌های پیچیده زیستی و الگوریتم‌های هوشمند پیش‌بینی‌کننده، فرآیندهای زیستی را در سطح سلولی و اکوسیستم آکواریومی بازسازی می‌کنند و به تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر در مدیریت سیستم می‌انجامند. این تکنولوژی‌ها به‌ویژه در مدیریت استرس‌های محیطی، واکنش به تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی پاسخ‌های زیستی آبزیان نقش کلیدی خواهند داشت. از طریق توسعه این مدل‌ها، می‌توان استراتژی‌های اصلاح نژادی و پرورش بهینه را به شکل پویا تنظیم نمود (Khan *et al*., 2024).

افزایش اهمیت ملاحظات زیست‌محیطی و پایداری با افزایش نگرانی جهانی درباره حفظ تنوع زیستی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی، فناوری‌های نوین در سیستم‌های آکواریومی به سمت توسعه رویکردهای پایدار و دوستدار محیط زیست سوق داده خواهند شد. فناوری‌های پاک (روش‌های تصفیه آب پیشرفته، استفاده بهینه از منابع انرژی و کاهش مصرف مواد شیمیایی)، جایگاه ویژه‌ای خواهند داشت. علاوه‌برآن، نظارت و مدیریت دقیق اکوسیستم‌های آکواریومی با استفاده از فناوری‌های تشخیص زودهنگام و نشانگرهای زیستی مولکولی، به حفظ سلامت زیستی و تنوع ژنتیکی آبزیان کمک می‌کند و امکان تطابق با استانداردهای سخت‌گیرانه محیط زیستی را فراهم می‌آورد. گسترش همکاری‌های بین‌رشته‌ای و بین‌المللی تحولات آینده در این حوزه، مستلزم همکاری نزدیک بین زیست شناسان، متخصصان فناوری اطلاعات، مهندسان و سیاستگذاران خواهد بود. ایجاد شبکه‌های علمی و صنعتی بین‌المللی برای تبادل داده‌ها، تجربیات و فناوری‌ها، به تسریع نوآوری و بهبود کیفیت نتایج کمک می‌کند. این همکاری‌ها علاوه بر تولید دانش جدید، امکان هم‌افزایی ظرفیت‌ها و کاهش هزینه‌ها را فراهم کرده و به تسهیل انتقال فناوری‌های نوین به سطح عملیاتی کمک می‌کند. آموزش و توسعه نیروی انسانی متخصص به منظور بهره‌برداری بهینه از فناوری‌های نوین، سرمایه‌گذاری در آموزش و توسعه مهارت‌های تخصصی در زمینه‌های مولکولی، بیوانفورماتیک و فناوری‌های هوشمند با اهمیت ویژه‌ای مواجه خواهد بود. ایجاد برنامه‌های آموزشی هدفمند، کارگاه‌ها و دوره‌های تخصصی، نیروی انسانی توانمند را برای آینده صنعت آماده خواهد کرد. فرصت‌های فناوری و اقتصادی جدید پیشرفت در فناوری‌های مولکولی و هوشمند، فرصت‌های نوینی برای توسعه محصولات جدید، بهبود کیفیت آبزیان زینتی و خدمات مرتبط فراهم می‌کند. افزایش تقاضا برای محصولات با کیفیت بالا و پایدار، انگیزه‌ای قوی برای نوآوری و سرمایه‌گذاری در این بخش ایجاد می‌کند که به رشد اقتصادی و ارتقاء جایگاه کشورها در بازارهای جهانی کمک خواهد کرد (Oliveira *et al*., 2024).

نتیجه‌گیری

ژنومیکس و متابولومیکس به عنوان ستون‌های اصلی زیست‌فناوری مدرن، با تحلیل‌های مولکولی دقیق، امکان شناخت عمیق‌تر مکانیسم‌های زیستی، بهبود عملکرد رشد، افزایش مقاومت به بیماری‌ها و بهینه‌سازی شرایط زیستی را فراهم کرده‌اند. تلفیق این دو روش با فناوری‌های نوین از جمله اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، نانو فناوری و فناوری‌های تصویربرداری

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

پیشرفته، باعث شکل‌گیری سیستم‌های آکواریومی هوشمند و خودتنظیم شده است. در عین حال، اجرای این تکنولوژی‌ها با چالش‌هایی مانند حجم بالای داده‌ها، هزینه‌های سنگین تجهیزاتی، محدودیت‌های زیستی، نیاز به تخصص بالا و مسائل اخلاقی همراه است که نیازمند تلاش متمرکز برای غلبه بر آنهاست. با وجود این، چشم‌اندازهای روشنی در پیش است که با پیشرفت در زمینه‌های بیوانفورماتیک، توسعه فناوری‌های اتوماتیک و هوشمند و افزایش همکاری‌های علمی بین‌رشته‌ای، توانمندی این روش‌ها و فناوری‌ها در صنعت آکواریومی به نحو چشمگیری افزایش خواهد یافت. بنابراین، بهره‌گیری هوشمندانه از ژنومیکس، متابولومیکس و فناوری‌های پیشرفته، نه‌تنها به افزایش کیفیت و کمیت تولید آبزیان زینتی کمک می‌کند بلکه می‌تواند به حفظ تنوع زیستی، بهبود شرایط زیستی و توسعه پایدار صنعت آکواریومی در سطح ملی و بین‌المللی منجر شود. تبادل دانش، آموزش نیروی انسانی متخصص، استانداردسازی روش‌ها و توجه ویژه به اثرات زیست‌محیطی، مؤلفه‌های کلیدی موفقیت در این مسیر خواهد بود. از این‌رو، سرمایه‌گذاری هدفمند و پیوسته در این حوزه، تضمین‌کننده آینده‌ای روشن و رقابتی در عرصه جهانی خواهد بود که می‌تواند به رشد اقتصادی و توسعه علمی کشور کمک شایانی نماید.

منابع

Alfaro, A.C. and Young, T., 2016. Showcasing metabolomics applications in aquaculture: a review. *Reviews in Aquaculture,* 10, 1, pp. 135-152. https://doi.org/10.1111/raq.12152.

Andersen, L.K., Thompson, N.F., Abernathy, J.W., O.Ahmad, R., Ali,A., Al-Tobasei, R., H. Beck, B., Calla, B., A. Delomas, T., A. Dunham, R., G. Elsik, C., Fuller, S.A., C. Garcia, J., R. Gavery, M., M. Hollenbeck, C.,, M. Johnson, K., Kunselmen, E., L. Legacki, E., Liu, S., Liu, Z., Martin, b., L. Matt, J., A. May, S. and E. Older, C., 2025. Advancing genetic improvement in the omics era: status and priorities for United States aquaculture. *BMC Genomic,* 26, 155. https://doi.org/10.1186/s12864-025-11247-z.

Chandhini, S. and Rejish Kumar, V.J., 2019. Transcriptomics in aquaculture: Current *status and applications. Reviews in Aquaculture*, 11, 4, pp. 1379–1397. DOI:10.1111/raq.12298.

Clark, B., Kuwalekar, M., Fischer, B., Woltering, J., Biran, J., Juntti, S., Kratochwil, C.F., Santos, M.E. and Vasconcelos Almeida, M., 2023. Genome editing in East African cichlids and tilapias: state-of-the-art and future directions. *Open Biology*, 13 (11):230257. https://doi.org/10.1098/rsob.230257.

Dhillon, O., Ashraf Rather, M., Ahmad, I., Ahmad Bhat, I. and Irfan Ahmad Khan, I., 2025. Advances in Aquaculture Genomics, Genetics, and Breeding: Enhancing Sustainability and Efficiency Through Cutting-Edge Technologies. *Journal of applied Ichthyology*. https://doi.org/10.1155/jai/8884803.

Gelderen, T.A.V., Ladisa, C., Salazar-Moscoso, M., Folgado, C., Habibi, H.R. and Ribas, L., 2023. Metabolomic and transcriptomic profiles after immune stimulation in the zebrafish testes. *Genomics*, 115(2):110581. DOI:10.1016/j.ygeno.2023.110581.

Hu, W., Liu, L., Forn-Cuní, G., Ding, Y., Alia, A. and Spaink, H. P., 2023. Transcriptomic and metabolomic studies reveal that toll-like receptor 2 has a role in glucose-Related metabolism in unchallenged zebrafish larvae (*Danio rerio*). *Biology*, 12(2), 323. https://doi.org/10.3390/biology12020323.

Iqbal, G., Wani, M.N., Piyushbhai, M.K., Ahmat Dar, S. and Sharma, A., 2025. Fish nutrigenomics: unravelling the genetic code for sustainable aquaculture and improved nutritional benefits. *Blue Biotechnology*, 2, 19. https://doi.org/10.1186/s44315-025-00043-9.

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

Jin, C., Dong, L., Wei, C., Wani, M.A., Yang, C., Li, S. and Li, F., 2023. Creating novel ornamentals via new strategies in the era of genome editing. *Frontier in Plant Science*, 14, pp. 1-13. DOI:10.3389/fpls.2023.1142866.

Jitjumnong, J., Taweechaipaisankul, A., Lin, J.-C., Wongchanla, S., Chuwatthanakhajorn, S., Lin, C.-J., Khang, L.T.P., Linh, N.V., Vu Linh, N., Sangsawad, P., Dinh-Hung, N. and Moonmanee, T., 2025. An overview of advancements in proteomic approaches to enhance livestock production and aquaculture. *Animals*, 15(13), 1946. https://doi.org/10.3390/ani15131946.

Kang, Z., Kong, J., Li, Q., Sui, J., Dai, P., Luo, K., Meng, X., Chen, B., Cao, J., Tan, J., Fu, Q., Xing, Q. and Luan, S., 2025. Genomic selection strategies to overcome genotype by environment interactions in biosecurity-based aquaculture breeding programs. *Genetics Selection Evolution*, 22, 57(1):2. DOI:10.1186/s12711-025-00949-3. PMID:39844028; PMCID: PMC11752716.

Kanwal, S., Abdullah, M., Kumar, S., Arshad, S., Shahroz, M., Zhang, D. and Kumar, D., 2024. An Optimal Internet of Things-Driven Intelligent Decision-Making System for Real-Time Fishpond Water Quality Monitoring and Species Survival. *Sensors*, 24(23), 7842. https://doi.org/10.3390/s24237842.

Khan, S.K., Dutta, J., Ahmad, I. and Rather, M.A., 2024. Nanotechnology in aquaculture: Transforming the future of food security. *Food Chemistry*: X, 7, 24:101974. DOI:10.1016/j.fochx.2024.101974. PMID:39582638; PMCID: PMC11585796.

Ladisa, C., Ma, Y. and Habibi, H.R., 2022. Metabolic changes during growth and reproductive phases in the liver of female goldfish (*Carassius auratus*). *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 10:834688. DOI:10.3389/fcell.2022.834688.

Li, B., Zhang, Y., Du, J., Liu, C., Zhou, G., Li, M. and Yan, Z., 2025. Application of Multi-Omics Techniques in Aquatic Ecotoxicology: A Review. *Toxics*, 13(8), 653. https://doi.org/10.3390/ toxics13080653.

Lokman, P.M. and Symonds, J.E., 2014. Molecular and biochemical tricks of the research trade:-omics approaches in finfish aquaculture. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 48, 3: pp. 492-505. https://doi.org/10.1080/00288330.2014.928333.

Mohanty, B.P., Mohanty, S., Mitra, T., Arabinda Mahanty, A., Satabdi Ganguly, S. and Sivadhar Singh, S., 2019. Omics technology in aquaculture. *Advances in Fish Research*, VII, pp. 1–30. Narendra Publishing House, New Delhi, India. ISBN:9387590489-978.

Nguyen, N.H., Sonesson, A.K., Houston, R.D. and Moghadam, H., 2022. Editorial: Applications of modern genetics and genomic technologies to enhance aquaculture breeding. *Frontiers in Genetics*, 5, 13:898857. DOI:10.3389/fgene.2022.898857. PMID:35450219; PMCID: PMC9016189.

Nguyen, N.H., 2024. Genetics and genomics of infectious diseases in key aquaculture species. *Biology*, 13, 1. https://doi.org/10.3390/biology13010029.

Nogueira, T. and Botelho, A., 2021. Metagenomics and other omics approach to bacterial communities and antimicrobial resistance assessment in aquacultures. *Antibiotics*, 10, 7. https://doi.org/10.3390/antibiotics10070787.

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

Oliveira, J., Oliva-Teles, A. and Couto, A., 2024. Tracking biomarkers for the health and welfare of aquaculture fish. *Fishes*, 9(7), 289. https://doi.org/10.3390/fishes9070289.

Ovchinnikova, T. and Shi, Q., 2023. Editorial: Aquatic genomics and transcriptomics for evolutionary biology. *Frontiers in Genetics*, 14:1183637. DOI:10.3389/fgene.2023.1183637.

Pereiro, P., 2022. Transcriptome and genome analyses applied to aquaculture research. *Biology (Basel)*, 4, 11(9):1312. DOI:10.3390/biology11091312.

Piferrer, F., 2023. Epigenetics in aquaculture: Knowledge gaps, challenges, and future prospects. *Epigenetics in Aquaculture*. John Wiley and Sons/Wiley-Blackwell, pp. 451–463.

Rasal, K.D., Kumar, P.V., Risha, S., Asgolkar, P., Harshavarthini, M., Acharya, A., Shinde, S., Dhere, S., Rasal, A., Sonwane, A., Brahmane, M., Sundaray, J.K. and Nagpure, N., 2024. Genetic improvement and genomic resources of important cyprinid species: status and future perspectives for sustainable production. *Frontiers in Genetics*, 15:1398084. DOI:10.3389/fgene.2024.1398084.

Reid, T. and Bergsveinson, J., 2021. How Do the Players Play? A post-genomic analysis paradigm to understand aquatic ecosystem processes. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7, 8:662888. DOI:10.3389/fmolb.2021.662888. PMID:34026835; PMCID: PMC8138469.

Reverter, M., Rohde, S. and Parchemin, C., Tapissier-Bontemps, N. and Schupp, P.J., 2020. Metabolomics and marine biotechnology: coupling metabolite profiling and organism biology for the discovery of new compounds. *Frontiers in Marine Science*, 7:613471. DOI:10.3389/fmars.2020.613471.

Sun, D., Tao, Z., Wen, H., Qi, X., Li, C., Wang, L., Zhang, X. and Li, Y., 2025. Comparative analysis of muscle quality, transcriptomic, and metabolomic profiles in yellow-mutant and wild-type northern snakehead (*Channa argus*): Implications for food quality and aquaculture breeding. potential. *Food Bioscience*, 68, 68(2). https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106496.

Tripathy, P.S., Khatei, A. and Parhi, J., 2021. Omics in aquaculture. advances in fisheries biotechnology. Springer Nature Singapore Pte Ltd. (Springer, Singapore). 1st ed.2021, pp. 83-94. ebook ISNB:978-981-16-3217-4. Paperback/Softcover ISNB: 978-981-16-3217-4.

Wu, X., Lai, J., Chen, Y., Liu, Y., Song, M., Li, F., Li, P., Li, Q. and Gong, Q., 2023. Combination of metabolome and proteome analyses provides insights into the mechanism underlying growth differences in *Acipenser dabryanus*. *iScience*, 18, 26(8):107413. DOI:10.1016/j.isci.2023.107413. PMID:37559901; PMCID: PMC10407750.

Yan, Y., Zhang, Y., Dong, J., Wang, F., Zhang, H., Gao, F., Ye, X., Wu, C., and Sun, C., 2025. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis reveals the molecular mechanisms involved in the adaptations of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) to compound feed. *Fishes*, 10(8), 379. https://doi.org/10.3390/fishes10080379.

Yáñez, J.M., Newman, S. and Houston, R.D., 2015. Genomics in aquaculture to better understand species biology and accelerate genetic progress. *Frontiers in Genetics*, 6:128. DOI:10.3389/fgene.2015.00128.

Yáñez, J.M., Xu, P., Carvalheiro, R. and Hayes, B., 2022. Genomics applied to livestock and

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

aquaculture breeding. *Evolutionary Applications*, 18, 15(4):517-522. DOI:10.1111/eva.13378.

Yang, B.T., Wen, B., Ji, Y., Wang, Q., Zhang, H.R., Zhang, Y., Gao, J.Z. and Chen, Z.Z., 2021. Comparative metabolomics analysis of pigmentary and structural coloration in discus fish (*Symphysodon haraldi*). *Journal of Proteomics*, 233. ISSN: 1874-3919. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2020.104085.

Yang, Z., Fu, G., Lee, M., Yeo, S. and Yue, G. H., 2024. Genes for editing to improve economic traits in aquaculture fish species. *Aquaculture and Fisheries,* 10, 1, pp. 1-18. DOI:10.1016/j.aaf.2024.05.005.

Young, T., Laroche, O., Walker, S.P., Miller, M.R., Casanovas, P.,Steiner, K., Esmaeili, N., Zhao, R., Bowman, J.P. and Wilson, R., 2023. Prediction of feed efficiency and performance-based traits in fish via integration of multiple omics and clinical covariates. *Biology*, 12, 1135. https://doi.org/10.3390/ biology12081135.

Yuan, D., Li, J., Wang,S., Fu, S., Gao, H., Duan, Y., Zhou, Y., Li, H. and Zhou, C., 2024. Whole genome resequencing reveals the genetic basis of albino phenotype in an ornamental fish, *Channa asiatica*, *Aquaculture Reports*, 36, 102193, ISSN: 2352-5134, https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102193.

Yue, G. and Wang, L., 2017. Current status of genome sequencing and its applications in aquaculture. *Aquaculture*, 468, pp. 337–347. DOI:10.1016/j.aquaculture.2016.09.038.

Yusuf, J., Ahmad, P.Z., Rather, M.A. and Ahmad, I., 2025. An overview of functional genomics in aquaculture. *Aquaculture: Enhancing Food Security and Nutrition*. Springer, Cham, pp. 273-286. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92858-1_13.

Zafar, N., Naz, S. and Khan, M.A., 2025. Genomic innovations in aquafeed: Unraveling the nutrigenomics of sustainable aquaculture. *Aquaculture: Enhancing Food Security and Nutrition*. Springer, Cham, pp. 483-492. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92858-1_23.

Zhang, J., Li, M., Meng, D., Xu, S., Teame, T., Yao, Y., Yang, Y., Zhang, Z., Ran, C., Jijakli, M.H., Ding, Q. and Zhou, Z., 2025. Review on omics approaches in aquatic animal nutrition: Current status, limitations, and perspectives. *The Journal of Nutrition*, 155, 10, pp. 3191-3210, https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2025.08.019.

Zhu, M., Sumana, S. L., Abdullateef, M. M., Falayi, O. C., Shui, Y., Zhang, C., Zhu, J. and Su, S., 2024. CRISPR/Cas9 technology for enhancing desirable traits of fish species in aquaculture. *International Journal of Molecular Sciences,* 25, 17. DOI:10.3390/ijms25179299.

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]

Review Article:

Applications of Genomics and Metabolomics in Enhancing Growth and Production in Ornamental Aquaculture

Nahavandi R.[1*]; Pourmozaffar S.[2]; Abbaspour Anbi A.[3]

[*]Rezanahavandi91@gmail.com

1-Animal Science Research Institute of Iran (ASRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2-Persian Gulf Mollusks Research Station, Persian Gulf and Oman Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bandar Lengeh, Iran

3-National Artemia Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran

Abstract

The ornamental aquaculture industry has experienced rapid expansion, contributing substantially to employment and international trade. However, high species diversity and biological sensitivity demand advanced approaches for improving growth performance, health management, and production efficiency. Genomics tools—including next-generation sequencing, SNP markers, quantitative trait loci (QTL) mapping, and transcriptomics—enable identification of genes and regulatory networks associated with growth, coloration, disease resistance, and stress tolerance. Metabolomics, through techniques such as LC–MS and NMR spectroscopy, provides comprehensive metabolic profiling for monitoring physiological status and optimizing nutrition and environmental conditions. The integration of genomic and metabolomic datasets facilitates precision breeding, early disease detection, and data-driven management strategies. Despite technical and financial constraints, interdisciplinary integration and expanding bioinformatics infrastructure are accelerating practical implementation. This review critically evaluates current applications, methodological advances, existing limitations, and future prospects of genomics and metabolomics in ornamental aquaculture, emphasizing their role in sustainable production and biodiversity conservation.

Keywords: Ornamental aquaculture; Genomics; Metabolomics; Precision breeding; Fish health; Sustainable production

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-07-04]

[DOI: 10.22034/JOA.12.4.39]