



The Role of Molecular Biotechnology in Enhancing Immune Resistance of Aquatic Species Against Viral and Bacterial Diseases

Nahavandi R.^{1*}; Pourmozaffar S.

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 (IFSRI), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Bandar-e-Lengeh, Iran

Abstract:

Diseases caused by viral and bacterial pathogens represent major challenges to global aquaculture, threatening productivity and sustainability. Conventional disease management strategies such as vaccines and antibiotics have limitations including specificity and resistance development. Molecular biotechnology offers revolutionary tools to enhance disease resistance in aquatic animals through genomic selection, gene editing, and molecular immunomodulation. This review comprehensively examines the application of molecular biotechnology in improving immune defenses against viral and bacterial infections in aquaculture species. Key technologies including omics, CRISPR/Cas systems, antimicrobial peptides, and RNA interference are discussed. Immunological mechanisms of aquatic species, advances in selective breeding, and emerging precision aquaculture approaches are reviewed. Challenges and future perspectives are highlighted to provide a roadmap for sustainable aquaculture disease management using molecular biotechnology.

Review History:

Received: 7/15/2025

Revised: 8/26/2025

Accepted: 9/10/ 2025

Available Online: 10/1/2025:

Keywords:

Aquaculture

Disease resistance

Gene editing

Immune modulation

Molecular biotechnology

How To Cite This Article:

Nahavandi, R., & Pourmozaffar, S. (2025). The Role of Molecular Biotechnology in Enhancing Immune Resistance of Aquatic Species Against Viral and Bacterial Diseases. *Int. J. Biotech. Adv. Res.*, 1(1) 1-17 :



*Corresponding author's email: Rezanahavandi91@gmail.com



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Green Wave Pub. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License. For more information, please visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



نقش زیست‌فناوری مولکولی در افزایش مقاومت ایمنی گونه‌های آبزی در برابر بیماری‌های ویروسی و باکتریایی

رضا نهادوندی^{*}، سجاد پورمظفر^۲

۱-موسسه تحقیقات علوم دامی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۲- ایستگاه تحقیقات نرم‌تنان خلیج فارس، پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرلنگه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴ تیر ۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴ شهریور ۴

پذیرش: ۱۴۰۴ شهریور ۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴ مهر ۹

کلمات کلیدی:

آبزی پروری
مقاومت به بیماری
ویرایش ژن
تعدیل ایمنی
بیوتکنولوژی مولکولی

فراهم آورده است. این مرور جامع به بررسی کاربرد بیوتکنولوژی مولکولی در بهبود دفاع ایمنی در برابر عفونت‌های ویروسی و باکتریایی در گونه‌های آبزی پروری می‌پردازد. فناوری‌های کلیدی از جمله اومیکس، سیستم‌های CRISPR/Cas، پپتیدهای ضد میکروبی و مداخله RNA مورد بحث قرار گرفته‌اند. مکانیزم‌های ایمنی گونه‌های آبزی، پیشرفت‌ها در اصلاح نژاد انتخابی و رویکردهای نوظهور در آبزی پروری دقیق مرور شده‌اند. چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده به منظور ارائه نقشه راهی برای مدیریت پایدار بیماری‌های آبزی پروری با استفاده از بیوتکنولوژی مولکولی بر جسته شده‌اند.



برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Nahavandi, R., & Pourmozaaffar, S. (2025). The Role of Molecular Biotechnology in Enhancing Immune Resistance of Aquatic Species Against Viral and Bacterial Diseases. *Int. J. Biotech. Adv. Res.*, 1(1) 1-17 (In Persian)

منجر به ظهور و گسترش بیماری‌های عفونی و به طور عمده ویروسی و باکتریایی شده است که تهدیدات قابل توجهی برای سلامت و بهره‌وری گونه‌های آبزی پرورشی به شمار می‌روند. بیماری‌های ویروسی و باکتریایی به عنوان عوامل اصلی زیان‌های اقتصادی در آبزی پروری شناخته شده‌اند و گونه‌های متنوعی از جمله میگو، سالمون، تیلاپیا و نرم‌تنان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از جمله عوامل ویروسی می‌توان به ویروس سندروم لکه سفید^۱ در میگو و ویروس آمیای سالمون عفونی^۲ در سالمون، و همچنین باکتری‌های جنس ویبریو اشاره کرد که باعث شیوع‌های ویرانگر شده‌اند. این عوامل عفونی نه تنها نرخ‌های بقا را کاهش می‌دهند بلکه عملکرد رشد، موفقیت تولیدمثل و

مقدمه

آبزی پروری به عنوان یکی از اجزای حیاتی امنیت غذایی جهانی و توسعه اقتصادی، در دهه‌های اخیر رشد سریعی داشته و به یکی از سریع‌ترین بخش‌های رو به گسترش در تولید مواد غذایی در سراسر جهان تبدیل شده است. این توسعه سریع به طور عمده ناشی از افزایش تقاضا برای محصولات دریایی است که از رشد جمعیت، تغییرات در عادات غذایی و کاهش ذخایر ماهیان وحشی به دلیل صید بی‌رویه و تخریب محیط زیست نشأت می‌گیرد. در نتیجه، آبزی پروری به عنوان راه حلی کلیدی برای تأمین نیاز جهانی به منابع پروتئینی پایدار مطرح شده است. با این حال، فشردگی و شدت بالای فعالیت‌های آبزی پروری

^۱. Infectious Salmon Anemia Virus=ISA Virus

^۲. White Spot Syndrome Virus =WSSV

*: نویسنده عهدار مکاتبات: Rezahnahavandi91@gmail.com



شده است که تهدیدات قابل توجهی برای سلامت و تولید گونه‌های آبزی پرورشی به شمار می‌آیند. بیماری‌های ویروسی و باکتریایی از جمله عوامل اصلی خسارت‌های اقتصادی در صنعت آبزی‌پروری محسوب می‌شوند و گونه‌هایی مانند میگو، سالمون، تیلاپیا و نرم‌تنان را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در میان این عوامل، بیماری‌های ویروسی مانند ویروس سنتدرم لکه سفید در میگو و ویروس آمیای عفونی در ماهی آزاد، به همراه باکتری‌هایی از جنس ویبریو، شیوع‌های مخربی ایجاد کرده‌اند. این عوا مل بیماری‌زا نه تنها نرخ بقای آبزیان را کاهش می‌دهند، بلکه عملکرد رشد، موفقیت تولیدمثلی و کیفیت محصولات را مختل می‌کنند و بدین ترتیب پایداری و سودآوری صنعت آبزی‌پروری را به چالش می‌کشند. روش‌های سنتی کنترل بیماری در آبزی‌پروری و به طور عمده مبتنی بر اقدامات زیست‌امنیتی، واکسینا سیون و استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها هستند. اگرچه واکسینا سیون در برابر برخی عوامل عفونی مؤثر بوده است، اما کاربرد آن به گونه و نوع عوامل بیماری‌زا محدود است و پیچیدگی محیط‌های آبی و مشکلات انتقال واکسن، کارایی آن را کاهش می‌دهد (Du *et al.*, 2022). استفاده گسترش‌دهنده از آنتی‌بیوتیک‌ها نیز خطر ایجاد مقاومت میکروبی، آلدگی محیطی و باقی ماندن مواد دارویی در محصولات دریایی را به همراه دارد که دغدغه‌های بهداشتی و زیست‌محیطی ایجاد می‌کند. این محدودیت‌ها نیازمند جستجو و به کارگیری فناوری‌های پیشرفته‌تر و پایدارتر برای مدیریت بیماری‌ها می‌باشد. بیوتکنولوژی مولکولی به عنوان راهکاری نوین مطرح شده است که ابزارها و روش‌های جدیدی را برای بهبود مقاومت به بیماری در سطوح زنگی و مولکولی فراهم می‌آورد. فناوری‌های توالی‌یابی پیشرفته و تکنولوژی‌های اومیکس، امکان شناسایی جامع ژنوم‌ها، ترنسکریپتوم‌ها و پروتئوم‌های گونه‌های آبزی را فراهم نموده است و بینش‌های بی‌سابقه‌ای در خصوص تعاملات میزان-پاتوزن و پایه‌های مولکولی اینمی ایجاد کرده است. این بینش‌ها امکان شناسایی نشانگرهای زنگی مرتبه با مقاومت به بیماری را فراهم آورده است که به نوبه خود برنامه‌های اصلاح نژاد انتخابی برای تولید جمعیت‌های مقاومتر را هدایت می‌کند. مقدمه آبزی‌پروری به عنوان بخشی حیاتی از امنیت غذایی جهانی و توسعه اقتصادی، در چند دهه اخیر رشد چشمگیری داشته و به یکی از سریع‌ترین بخش‌های در حال توسعه در عرصه تولید مواد غذایی جهان تبدیل شده است. این رشد سریع به طور عمده ناشی از افزایش تقاضا برای محصولات دریایی است که تحت تأثیر رشد جمعیت، تغییر الگوهای تغذیه‌ای و کاهش ذخایر ماهیان وحشی به دلیل صید بی‌رویه و تخریب محیط زیست قرار دارد. بنابراین آبزی‌پروری به عنوان راه حلی کلیدی برای تأمین نیازهای جهانی به منابع پروتئینی پایدار مطرح شده است. با این وجود، شدت یافتن فعالیت‌های آبزی‌پروری موجب ظهور و گسترش بیماری‌های عفونی، به ویژه ویروسی و باکتریایی،

کیفیت محصول را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند که در نهایت پایداری و سودآوری فعالیت‌های آبزی‌پروری را به مخاطره می‌اندازد. استراتژی‌های سنتی کنترل بیماری در آبزی‌پروری عمدتاً بر اقدامات زیست‌امنیتی، واکسیناسیون و استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها مبنی است. اگرچه واکسیناسیون در مقابله با برخی عوامل باکتریایی و ویروسی مؤثر بوده است، کاربرد آن محدود به گونه و عوامل بیماری‌زا خاص است و پیچیدگی محیط آبی و مشکلات در ارائه واکسن آن را محدود می‌کند (Tammas *et al.*, 2024). آنتی‌بیوتیک‌ها با وجود استفاده گسترده، خطر توسعه مقاومت دارویی، آلدگی محیطی و باقی ماندن مواد دارویی در محصولات دریایی را به همراه دارند که نگرانی‌های بهداشتی و زیست‌محیطی ایجاد می‌کنند. این محدودیت‌ها ضرورت جستجو و به کارگیری فناوری‌های پیشرفته‌تر، پایدارتر و مؤثرتر در مدیریت بیماری‌ها را ایجاب می‌کند. بیوتکنولوژی مولکولی به عنوان مسیر تحول آفرینی مطرح شده است که ابزارها و روش‌های نوین را برای افزایش مقاومت به بیماری در سطوح زنگی و مولکولی ارائه می‌دهد. ظهور فناوری‌های توالی‌یابی پرسرعت و تکنولوژی‌های اومیکس، امکان شناسایی جامع ژنوم‌ها، ترنسکریپتوم‌ها و پروتئوم‌های گونه‌های مختلف آبزی‌پروری را فراهم نموده است و بینش‌های بی‌سابقه‌ای در خصوص تعاملات میزان-پاتوزن و پایه‌های مولکولی اینمی ایجاد کرده است. این بینش‌ها امکان شناسایی نشانگرهای زنگی مرتبه با مقاومت به بیماری را فراهم آورده است که به نوبه خود برنامه‌های اصلاح نژاد انتخابی برای تولید جمعیت‌های مقاومتر را هدایت می‌کند. مقدمه آبزی‌پروری به عنوان بخشی حیاتی از امنیت غذایی جهانی و توسعه اقتصادی، در چند دهه اخیر رشد چشمگیری داشته و به یکی از سریع‌ترین بخش‌های در حال توسعه در عرصه تولید مواد غذایی جهان تبدیل شده است. این رشد سریع به طور عمده ناشی از افزایش تقاضا برای محصولات دریایی است که تحت تأثیر رشد جمعیت، تغییر الگوهای تغذیه‌ای و کاهش ذخایر ماهیان وحشی به دلیل صید بی‌رویه و تخریب محیط زیست قرار دارد. بنابراین آبزی‌پروری به عنوان راه حلی کلیدی برای تأمین نیازهای جهانی به منابع پروتئینی پایدار مطرح شده است. با این وجود، شدت یافتن فعالیت‌های آبزی‌پروری موجب ظهور و گسترش بیماری‌های عفونی، به ویژه ویروسی و باکتریایی،

ساختار ژنتیکی، عملکردهای فیزیولوژیک و مکانیزم‌های ایمنی موجودات آبزی را فراهم ساخته است و مداخلات هدفمندی ارائه می‌دهند که از نظر کارایی و اثربخشی، فراتر از روش‌های سنتی کشاورزی عمل می‌کنند. اجزا و تکنیک‌های کلیدی از مؤلفه‌های تحول آفرین بیوتکنولوژی مولکولی که در آبزی‌پروری به کار می‌روند، می‌توان به ژنومیکس، ترنسکریپتومیکس، پروتئومیکس، ویرایش ژن و تشخیص‌های مولکولی اشاره کرد. ژنومیکس به توالی یابی، تحلیل و دستکاری کل محتوای ژنتیکی (ژنوم) گونه‌های آبزی می‌پردازد. این فرآیند یک نقشه جامع فراهم می‌آورد که ژن‌های مرتبط با مقاومت در برابر بیماری، رشد، تولیدمثل و تطبیق با تنش‌های محیطی را شناسایی می‌کند. استراتژی‌های انتخاب ژنومی با استفاده از نشانگرهای مولکولی پراکنده در سراسر ژنوم ارزش‌های اصلاح نژادی را پیش‌بینی می‌کنند و بدین‌وسیله امکان پرورش سریع‌تر جمعیت‌های مقاوم به بیماری و رشد سریع‌تر را فراهم می‌سازند. ترنسکریپتومیکس به مطالعه RNAهای تولیدشده تحت شرایط زیستی خاص می‌پردازد و تغییرات بیان ژن‌ها را در پاسخ‌های ایمنی به عوامل بیماریزا یا تغییرات محیطی نشان می‌دهد. این داده‌های پویا در شناسایی مسیرهای ایمنی بحرانی و ژن‌های کاندید بهبود ژنتیکی بسیار مفید است. پروتئومیکس و متابولومیکس با بررسی پروتئین‌ها و متابولیتها که عوامل مستقیم در دفاع ایمنی و متابولیسم هستند، نتایج عملکردی بیان ژن را روشن‌تر می‌کنند. فناوری‌های ویرایش ژن، بهویژه سیستم‌های CRISPR/Cas، امکان اصلاح یا تنظیم دقیق ژن‌های خاص را برای افزایش ویژگی‌های مطلوب مانند مقاومت ویروسی یا تاب‌آوری محیطی بدون وارد کردن DNA خارجی فراهم می‌آورند. این قابلیت امکان توسعه سریع گونه‌های بهینه‌شده آبزی‌پروری با کاهش حساسیت به بیماری و بهبود عملکرد را فراهم می‌سازد. تشخیص‌های مولکولی با بهره‌گیری از تکنیک‌های مبتنی بر DNA و RNA قادر به شناسایی عوامل بیماریزا با حساسیت و ویژگی بالا هستند و سیستم‌های هشدار زودهنگام ضروری برای کنترل بیماری‌ها و تضمین زیست‌امنیتی فراهم می‌کنند. کاربردها در مدیریت بیماری و بهره‌وری بیوتکنولوژی مولکولی نقشی اساسی در مدیریت

در آبزی‌پروری را بدون وارد کردن DNA خارجی فراهم می‌سازد. این رویکرد در کنار مداخلات مولکولی دیگر مانند مداخله^۲ RNA استراتژی‌های تعددیل ایمنی مولکولی همچون پیتیدهای ضد میکروبی^۳، جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای برای روش‌های سنتی کنترل بیماری ارائه می‌دهد. به عنوان مثال، پیتیدهای ضد میکروبی نقش حیاتی در ایمنی ذاتی ایغا می‌کنند و با نشان دادن فعالیت‌های ضد میکروبی گستردۀ امکان افزایش یا مهندسی بیان آن‌ها در گونه‌های پرور شی به منظور ارتقاء مقاومت به بیماری وجود دارد. علاوه بر مداخلات ژنتیکی و مولکولی، بیوتکنولوژی مولکولی به توسعه ابزارهای تشخیصی پیشرفت و پیشگیری ایمنی کمک می‌کند که امکان تشخیص زودهنگام عوامل بیماریزا و بهبود اثربخشی واکسن‌ها را فراهم می‌آورد. ادغام این فناوری‌ها با تکنولوژی‌های آبزی‌پروری دقیق، مانند پایش سلامت مبتنی بر حسگر و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر بیوانفورماتیک، نظارت و مدیریت بیماری را در زمان واقعی بهبود می‌بخشد. با وجود این پیشرفت‌های امیدبخش، به کارگیری بیوتکنولوژی مولکولی در آبزی‌پروری با چالش‌هایی از جمله پیچیدگی تعاملات میزان-پاتوژن، چارچوب‌های قانونی، مسائل اخلاقی و نیاز به فناوری‌های مقرر به صرفه و مقیاس‌پذیر مناسب برای گونه‌ها و سیستم‌های مختلف کشاورزی مواجه است (Mokrani and Liu, 2024). برای مقابله با این چالش‌ها، تلاش‌های پژوهشی چندرشته‌ای، پذیرش عمومی و همکاری‌های بین‌المللی ضروری است. این مرور جامع با هدف روشن‌کردن وضعیت کنونی کاربرد بیوتکنولوژی مولکولی در تقویت مقاومت ایمنی جانوران آبزی در برابر بیماری‌های ویروسی و باکتریایی، ابزارهای کلیدی مولکولی، مکانیزم‌های ایمنی، مطالعات موردی ویژه گونه‌ها و چشم‌اندازهای آینده را بر جسته کرده است و نقش حیاتی بیوتکنولوژی مولکولی در تحول مدیریت بیماری‌های آبزی‌پروری به سوی پایداری و امنیت غذایی را نشان می‌دهد. بیوتکنولوژی مولکولی بیوتکنولوژی مولکولی شامل مجموعه‌ای گستردۀ از تکنیک‌های پیشرفت‌های ایمنی از مولکول‌های زیستی در سطوح ژنتیکی و سلولی به منظور بهبود بهره‌وری و پایداری آبزی‌پروری به کار گرفته می‌شود. این روش‌ها امکان درک دقیق و اصلاح

^۴. Antimicrobial peptides =AMPs

^۳. RNA interference = RNAi

تونسکریپتومیکس و ایمنوزنومیکس

ترنسکریپتومیکس، مطالعه مجموعه کامل RNA های رونویسی شده توسط ژنوم تحت شرایط خاص یا در سلول، بافت یا ارگانیسم معین است که به ابزاری ضروری در پژوهش‌های آبزی پروری تبدیل شده است. این روش بیش‌های پویایی از پروفایل‌های بیان ژن در طول تعاملات میزبان-پاتوژن فراهم می‌کند و مکانیزم‌های مولکولی زیربنای پاسخ‌های ایمنی و مقاومت به بیماری در گونه‌های آبزی را روشن می‌سازد. از طریق توالی‌یابی RNA با توان بالا^۵ فناوری‌های میکروآرایه، محققان می‌توانند تصویر جامعی از تغییرات رونویسی ناشی از عفونت‌های ویروسی و باکتریایی به دست آورند و ژن‌ها و مسیرهای مهم مرتبط با ایمنی را که در مواجهه با بیماری فعال یا مهار می‌شوند، شنا سایی کنند. در گونه‌های آبزی مانند میگو، ماهی آزاد، کپور و نرم‌تنان، تحلیل‌های ترانسکریپتومی به طور مکرر نشان داده‌اند که عفونت‌ها تغییرات پیچیده‌ای در الگوهای بیان ژن‌های سیستم ایمنی ایجاد می‌کنند. این تغییرات عموماً شامل افزایش بیان ژن‌های رمزکننده گیرنده‌های شناسایی الگو^۶، سایتوکین‌ها^۷ و زیرگروه آنها کموکین‌ها^۸، پیتیدهای ضد میکروبی و اجزای سیستم مکمل و انعقادی است. به عنوان مثال، ترانسکریپتوم میگوهای آلوده به ویروس سندروم لکه سفید افزایش بیان ژن‌های مرتبط با شناسایی عوامل بیماریزا، سیگنال‌دهی التهابی و پاسخ‌های ضد ویروسی را نشان می‌دهد که نمایانگر تعدل فعل ایمنی ذاتی است. به طور مشابه، پروفایل‌های ترانسکریپتومی آزادماهیان پس از مواجهه با ویروس آمیاب عفونی ماهی آزاد فعل‌سازی مسیرهای اینترفرونی و ژن‌های مرتبط با مرگ برنامه ریزی و کنترل شده سلول ها^۹ را برجسته می‌سازد که برای محدود کردن تکثیر ویروس حیاتی هستند. مطالعات مقایسه‌ای ترانسکریپتومی بین ژنتیک‌های مقاوم و حساس به شنا سایی نشانگرهای ژنتیکی و ژن‌های کاندید مرتبط با تحمل بیماری کمک کرده‌اند(Natnan *et al.*, 2021). برای نمونه، تحقیقات انجام شده روی ماهی آزاد اتلانتیک و قزل‌آلای رنگین‌کمان، پروفایل‌های بیان را مقایسه کرده و تنظیمات متفاوت

بیماری‌های آبزی‌پروری که تامین جهانی محصولات دریایی را تهدید می‌کنند، ایفا کرده است (Jose Priya and Kappalli, 2022). با امکان انتخاب افراد ژنتیکی برتر که مقاومت ذاتی در برابر عفونت‌های ویروسی و باکتریایی دارند، بر نامه‌های اصلاح نزد مولکولی وابستگی به آنتی‌بیوتیک‌ها و درمان‌های شیمیایی را کاهش داده است و به کاهش اثرات زیست‌محیطی و نگرانی‌های بهداشتی منجر می‌شوند. افزون بر این، روش‌های ویرایش ژن قادر به اختلال در گیرنده‌های ورود عوامل بیماریزا یا تقویت اجزاء سیستم ایمنی هستند که به افزایش نرخ بقا در زمان شیوع بیماری‌ها می‌انجامد. واکسن‌های مولکولی که با استفاده از اطلاعات ژنومی و فناوری‌های DNA نوترکیب توسعه یافته‌اند، استراتژی‌های واکسیناسیون هدفمند و مؤثری ارائه می‌دهند. علاوه بر مقاومت به بیماری، بیوتکنولوژی مولکولی به بهبود نسبت تبدیل خوراک نیز کمک می‌کند، از طریق انتخاب یا مهندسی گونه‌های ماهی که غذا را به صورت مؤثرتری مصرف می‌کنند و بدین ترتیب منجر به کاهش ضایعات و هزینه‌های تولید می‌شوند. همچنین، بر توسعه خوراک‌های زیست‌مهند سی شده غنی شده با مواد مغذی ضروری و بهینه‌شده برای گونه‌های خاص نقش دارد. چالش‌ها و فرصت‌ها با وجود پیشرفت سریع به کارگیری بیوتکنولوژی مولکولی در آبزی‌پروری، این حوزه با چالش‌هایی نظیر پیچیدگی‌های ژنتیکی صفات، موانع قانونی، مسائل مربوط به ادرارک عمومی و مباحث اخلاقی در خصوص اصلاحات ژنتیکی مواجه است. با این حال، پیشرفت‌های مداوم فناوری، کاهش هزینه‌های توالی‌یابی، ویرایش ژن و افزایش تقاضای جهانی برای غذای دریایی پایدار، توسعه و ادغام بیوتکنولوژی مولکولی در آبزی‌پروری را تقویت می‌کنند. پژوهش‌های بین‌رشته‌ای مشارکتی که زیست شنا سایی مولکولی، علوم آبزی‌پروری، مدیریت محیط زیست و اقتصاد اجتماعی را به هم پیوند می‌دهند، برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل این ابزارها حیاتی است. پذیرش پایدار بیوتکنولوژی مولکولی وعده تحول آبزی‌پروری به سیستمی پیشرفت، مقاوم و متعهد به مسئولیت‌های زیست‌محیطی را می‌دهد که قادر به پاسخگویی به نیازهای جهانی آینده در حوزه تأمین مواد غذایی است (Wang *et al.*, 2023).

⁸. Chemokines

⁹. Apoptosis

⁵. RNA-seq

⁶. Pattern Recognition Receptors =PRRs

⁷. Cytokines

شنا سایی کنند. در گونه‌های آبزی مانند میگو، ماهی آزاد، کپور و نرم‌تنان، تحلیل‌های ترنسکریپتومی به طور مکرر نشان داده‌اند که عفونت‌ها تغییرات پیچیده‌ای در الگوهای بیان ژن‌های سیستم ایمنی ایجاد می‌کنند. این تغییرات معمولاً شامل افزایش بیان ژن‌های رمزکننده گیرنده‌های شناسایی الگو، سایتوکین‌ها، کموکین‌ها، پیتیدهای ضد میکروبی و اجزای سیستم مکمل و انعقادی است. به عنوان مثال، ترنسکریپتوم میگوهای آلوود به ویروس سندروم لکه سفید افزایش بیان ژن‌های مرتبط با شناسایی عوامل بیماریزا، سیگنال‌دهی التهابی و پاسخ‌های ضد ویروسی را نشان می‌دهد که نمایانگر تعدیل فعال ایمنی ذاتی است. به طور مشابه، پروفایل‌های ترنسکریپتومی آزادماهیان پس از مواجهه با ویروس آمیای عفونی ماهی آزاد فعال‌سازی مسیرهای اینترفرونی و ژن‌های مرتبط با مرگ برنامه‌ریزی شده را برجسته می‌سازد که برای محدود کردن تکثیر ویروس حیاتی هستند. مطالعات مقایسه‌ای ترنسکریپتومی بین ژنتیک‌های مقاوم و حساس به شناسایی نشانگرهای ژنتیکی و ژن‌های کاندید مرتبط با تحمل بیماری کمک کرده‌اند. برای نمونه، تحقیقات انجام شده روی ماهی آزاد اطلس و قزل‌آلای رنگین‌کمان، پروفایل‌های بیان را مقایسه کرده و تنظیمات متفاوت اثرگذاران ایمنی مانند پرفورین، گرانزیم و گیرنده‌های سلول‌های کشنده طبیعی را نشان داده‌اند که با پاکسازی بهتر ویروسی و افزایش نرخ بقا همبستگی دارند. یافته‌های این چنینی برای برنامه‌های اصلاح نرخ زیاد مبتنی بر نشانگر و ژنومیک جهت پرورش افراد با مقاومت برتر به بیماری اهمیت حیاتی دارند. اینمنوزنومیکس، مطالعه پایه ژنتیکی و تنوع ژن‌های سیستم ایمنی، مکمل ترنسکریپتومیکس است که به شناسایی خانواده‌های ژنی پردازد. گونه‌های آبزی دارای مجموعه‌ای از گیرنده‌های شناسایی الگو شامل گیرنده‌های مشابه Toll، گیرنده‌های مشابه ناحیه الیگومریزاسیون اتصال یافته به نوکلئوتید^{۱۲} و گیرنده‌های شبیه ژن القاشونده توسط اسید رتینوئیک^{۱۳} هستند که همگی برای شناسایی عوامل بیماریزا و فعال‌سازی ایمنی اهمیت دارند. تحلیل‌های ژنومی و ترنسکریپتومی نشان داده‌اند که گسترش یا پلی‌مورفیسم‌های این خانواده‌های ژنی می‌توانند حساسیت به این عوامل را تنظیم کنند و به همین دلیل اهداف ارزشمندی برای اصلاح نرخی به شمار می‌آیند(Akai et al., 2021). علاوه بر این، ژن‌های رمزکننده سایتوکین‌هایی مانند اینترلوکین‌ها^{۱۴}، فاکتور نکروز تومور^{۱۵} و اینترفرون‌ها در خطوط مقاوم و حساس از نظر بیان و تنوع آللی تفاوت دارند که نقش آن‌ها به عنوان تعدیل کننده‌های کلیدی ایمنی را برجسته می‌سازد. ترنسکریپتومیکس و اینمنوزنومیکس ترنسکریپتومیکس، مطالعه مجموعه کامل RNA های رونویسی شده توسط ژنوم تحت شرایط خاص یا در سلول، بافت یا ارگانیسم معین است که به ایزاری ضروری در پژوهش‌های آبزی‌پروری تبدیل شده است. این روش بینش‌های پویایی از پروفایل‌های بیان ژن در طول تعاملات میزبان-پاتوژن فراهم می‌کند و مکانیزم‌های مولکولی زیربنای پاسخ‌های ایمنی و مقاومت به بیماری در گونه‌های آبزی را روشن می‌سازد. از طریق توالی‌یابی RNA با توان بالا و فناوری‌های میکروآرایه، محققان می‌توانند تصویر جامعی از تغییرات رونویسی ناشی از عفونت‌های ویروسی و باکتریایی به دست آورند و ژن‌ها و مسیرهای مهم مرتبط با ایمنی را که در مواجهه با بیماری فعال یا مهار می‌شوند،

اثرگذاران ایمنی مانند مولکول‌های پرفورین^{۱۰} و گرانزیم^{۱۱} و گیرنده‌های سلول‌های کشنده طبیعی را نشان داده‌اند که با پاکسازی بهتر ویروسی و افزایش نرخ بقا همبستگی دارند. یافته‌های این چنینی برای برنامه‌های انتخاب ژنتیکی مبتنی بر نشانگر و ژنومیک جهت پرورش افراد با مقاومت برتر به بیماری اهمیت حیاتی دارد. اینمنوزنومیکس، مطالعه پایه ژنتیکی و تنوع ژن‌های سیستم ایمنی، مکمل ترنسکریپتومیکس است که به شناسایی خانواده‌های ژنی دخیل در دفاع میزبان می‌باشد. گونه‌های آبزی دارای مجموعه‌ای از گیرنده‌های شناسایی الگو شامل گیرنده‌های مشابه Toll، گیرنده‌های مشابه ناحیه الیگومریزاسیون اتصال یافته به نوکلئوتید^{۱۲} و گیرنده‌های شبیه ژن القاشونده توسط اسید رتینوئیک^{۱۳} هستند که همگی برای شناسایی عوامل بیماریزا و فعال‌سازی ایمنی اهمیت دارند. تحلیل‌های ژنومی و ترنسکریپتومیکس نشان داده‌اند که گسترش یا پلی‌مورفیسم‌های این خانواده‌های ژنی می‌توانند حساسیت به این عوامل را تنظیم کنند و به همین دلیل اهداف ارزشمندی برای اصلاح نرخی به شمار می‌آیند(Akai et al., 2021). علاوه بر این، ژن‌های رمزکننده سایتوکین‌هایی مانند اینترلوکین‌ها^{۱۴}، فاکتور نکروز تومور^{۱۵} و اینترفرون‌ها در خطوط مقاوم و حساس از نظر بیان و تنوع آللی تفاوت دارند که نقش آن‌ها به عنوان تعدیل کننده‌های کلیدی ایمنی را برجسته می‌سازد. ترنسکریپتومیکس و اینمنوزنومیکس ترنسکریپتومیکس، مطالعه مجموعه کامل RNA های رونویسی شده توسط ژنوم تحت شرایط خاص یا در سلول، بافت یا ارگانیسم معین است که به ایزاری ضروری در پژوهش‌های آبزی‌پروری تبدیل شده است. این روش بینش‌های پویایی از پروفایل‌های بیان ژن در طول تعاملات میزبان-پاتوژن فراهم می‌کند و مکانیزم‌های مولکولی زیربنای پاسخ‌های ایمنی و مقاومت به بیماری در گونه‌های آبزی را روشن می‌سازد. از طریق توالی‌یابی RNA با توان بالا و فناوری‌های میکروآرایه، محققان می‌توانند تصویر جامعی از تغییرات رونویسی ناشی از عفونت‌های ویروسی و باکتریایی به دست آورند و ژن‌ها و مسیرهای مهم مرتبط با ایمنی را که در مواجهه با بیماری فعال یا مهار می‌شوند،

¹³. Retinoic acid-inducible gene-I-like receptors =RLRs

¹⁴. Interleukins

¹⁵. Tumor Necrosis Factor =TNF

¹⁰. Perforin

¹¹. Granzymes

¹². Nucleotide-binding oligomerization domain-like receptors =NLRs

تکسلولی و ترنسکریپتومیکس فضایی اکنون امکان تفکیک ناهمگنی سلولی و پاسخ‌های ایمنی اختصاصی بافت را با وضوح بالاتر فراهم کرده‌اند. در خاتمه، ترنسکریپتومیکس و ایمنوژنومیکس بسترهاي قدرتمند و مکملی برای رمزگشایی پایه مولکولی مقاومت ایمنی در گونه‌های آبزی فراهم می‌آورند. این فناوری‌ها زیربنای استراتژی‌های اصلاح نژاد پیش‌شرفت، مطالعات عملکردی و نوآوری‌های درمانی هستند و بیوتکنولوژی مولکولی را در صفر مقدم مدیریت پایدار بیماری‌ها در آبزی‌پروری قرار می‌دهند(Ahmad *et al.*, 2023)

ویرایش ژن با استفاده از سیستم‌های CRISPR/Cas
ویرایش ژن یکی از پیشرفت‌های بنیادی در بیوتکنولوژی مولکولی است که امکان اصلاحات دقیق و هدفمند در ژنوم موجودات زنده را فراهم می‌آورد. در میان فناوری‌های موجود ویرایش ژن، سیستم کریپت (کلاسترهاي منظم تکراری کوتاه پالیندرومیک بین فاصله‌دار) و Cas (پروتئین‌های مرتبط با کریپت) به دلیل سادگی، کارایی، تطبیق‌پذیری و مقرن‌به‌صرفه بودن، انقلابی در مهندسی ژنتیک ایجاد کرده است. از زمان اتخاذ این فناوری برای ویرایش ژنوم، CRISPR/Cas افق‌های تازه‌ای در آبزی‌پروری گشوده است که امکان دستکاری دقیق ژن‌های مرتبط با مقاومت به بیماری، رشد، تولید مثل و دیگر صفات اقتصادی مهم را فراهم می‌کند. سیستم‌های CRISPR/Cas با هدايت RNA تک راهنما^{۲۰} عمل می‌کنند که نوکلئاز Cas را به توالی خاصی از DNA مکمل sgRNA است هدایت می‌کند، جایی که پروتئین Cas باعث ایجاد شکست دو رشته‌ای در DNA می‌شود(Tian *et al.*, 2022). سپس این شکست تو سط مکانیزم‌های طبیعی ترمیم سلول، عمدهاً اتصال انتهای غیرهمولوگ^{۲۱} یا ترمیم هدایت‌شده توسط همولوژی^{۲۲}، ترمیم می‌شود که امکان از کار انداختن، اصلاح یا درج ژن با دقت بالا را فراهم می‌آورد. کاربردها در مقاومت به بیماری در آبزی‌پروری، شیوع بیماری‌های ناشی از عوامل ویروسی و باکتریایی تهدیدی مدام براي تولید پایدار است. ویرایش ژن با استفاده از سیستم‌های CRISPR/Cas

گسترش یا پلی‌مورفیسم‌های این خانواده‌های ژنی می‌توانند حساسیت به عوامل بیماری‌زا را تنظیم کنند و به همین دلیل اهداف ارزشمندی برای اصلاح نژادی به شمار می‌آیند. علاوه بر این، ژن‌های رمزکننده سایتوکین‌هایی مانند اینترلوکین‌ها، فاکتور نکروز تومور و اینترفرون‌ها در خطوط مقاوم و حساس از نظر بیان و نوع آلی تفاوت دارند که نقش آن‌ها به عنوان تعدل کننده‌های کلیدی ایمنی را بر جسته می‌سازد. ماتریس خارج‌سلولی^{۱۶} و مولکول‌های چسبندگی سلولی نیز به عنوان عوامل مهمی در تعاملات میزبان-پاتوژن از داده‌های ترنسکریپتومی مطرح شده‌اند. تغییرات در بیان ژن‌های مرتبط با ماتریس خارج‌سلولی بر یکپارچگی بافت و ترافیک سلول‌های ایمنی تأثیر می‌گذارد و حساسیت به عفونت‌های باکتریایی مانند ویبریوزیس^{۱۷} را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برخی از مولکول‌های چسبندگی نقش دوگانه‌ای دارند؛ به طوری که هم به عنوان گیرنده‌های تسهیل‌کننده اتصال عوامل بیماری‌زا عمل می‌کنند و هم در سیگ‌نال‌دهی ایمنی مشارکت دارند. تلفیق داده‌های بیان ژن با تغییرات ژنتیکی از طریق نقشه برداری محل‌های کمیت بیان صفتی^{۱۸} و مطالعات ارتباط ژنومی گستردگی^{۱۹} امکان تبیین شبکه‌های تنظیمی و شناسایی واریانت‌های عملکردی مؤثر بر مقاومت به بیماری را فراهم می‌آورد(Yáñez *et al.*, 2023). روش‌های یادگیری ماشین که بر مجموعه داده‌های ترنسکریپتومی اعمال می‌شوند، مدل‌های پیش‌بینی فنوتیپ‌های مقاومت را بهبود می‌بخشند. علاوه بر درک پاسخ‌های میزبان، ترنسکریپتومیکس در توسعه واکسن نیز یاری‌رسان است، زیرا آنتی‌ژن‌ها و مسیرهای ایمنی هدف‌گذاری شده برای محافظت بهینه را آشکار می‌سازد. اعتبارسنجی عملکردی ژن‌های کاندید با استفاده از مداخله RNA، حذف ژن‌های کریپت یا مطالعات افزایش بیان، ارتباط زیستی یافته‌های ترنسکریپتومی را تقویت می‌کند. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، ترنسکریپتومیکس با چالش‌هایی مانند اثرات دسته‌ای، اختصاصی بودن بیان به بافت و زمان و تعاملات پیچیده میزبان-پاتوژن-محیط مواجه است که تفسیر داده‌ها را دشوار می‌سازد. فناوری‌های پیشرفت‌هه توالي‌یابی RNA

²⁰. single guide RNA =sgRNA.

²¹. Non-homologous end joining =NHEJ

²². Homology-Directed Repair =HDR

¹⁶. Extracellular Matrix =ECM

¹⁷. Vibriosis

¹⁸. Expression Quantitative Trait Loci = eQTL

¹⁹. Genome-Wide Association Studies =GWAS

ماهیان آب شیرین، را هدف قرار می‌دهند، به طور قابل توجهی قابلیت بقا و زنده‌مانی انگل‌ها را کاهش داده‌اند و این امر راهی نوین برای کنترل انگل‌ها بدون استفاده از درمان‌های شیمیایی ارائه می‌دهد. پیشرفت‌های فنی و روش‌های انتقال کاربرد موفق CRISPR/Cas در آبزی‌پروری به شدت وابسته به انتقال مؤثر اجزای کریسپر به درون سلول‌ها یا جنین‌های هدف است. روش‌هایی مانند ریزتریق^{۲۹}، الکتروپوراسیون^{۳۰}، استفاده از حامل‌های ویروسی و انتقال واسطه‌گری شده توسط نانوذرات در گونه‌های مختلف با موفقیت‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ریزتریق به داخل زیگوت‌ها^{۳۱} همچنان روش یکی از تکنیک‌های متداول برای ایجاد ویرایش‌های ژنومی در خط تولیدمثلى است، در حالی که سیستم‌های انتقال نوین برای ویرایش‌های سلولهای غیرزاپایی سوماتیک^{۳۲} و کاربردهای درمانی احتمالی در حال توسعه هستند. ابزارهای بیوانفورماتیک نقش حیاتی در طراحی sgRNA می‌نمایند. های مؤثر با حداقل اثرات خارج از هدف ایفا می‌کنند. پیشرفت‌های صورت‌گرفته در پلتفرم‌های نرم‌افزاری به پیش‌بینی محل هدف و بهینه‌سازی کارایی ویرایش کمک کرده و دقت و ایمنی را تضمین می‌کنند. ملاحظات قانونی، اخلاقی و محیط‌زیستی علی‌رغم پتانسیل تحول آفرین، به کارگیری CRISPR/Cas در آبزی‌پروری تحت نظرات‌ها و بررسی‌های قانونی و اخلاقی قرار دارد. اصلاحات ژنی، موجب نگرانی‌هایی درباره ایجاد جهش‌های خارج از هدف، تأثیرات زیستمحیطی در صورت آزاد سازی به طبیعت و پذیرش مصرف‌کننده شده است. چارچوب‌های قانونی در سطح جهانی متفاوت بوده و برخی کشورها حیوانات اصلاح ژنتیکی شده را متفاوت از موجودات دستکاری ژنتیکی شده^{۳۳} می‌دانند که ممکن است روند تجاری‌سازی را تسریع کند. ملاحظات اخلاقی شامل رفاه حیوانات، حفظ تنوع زیستی و دسترسی عادلانه به فناوری می‌باشد(Robinson *et al.*, 2023). شفافیت، مشارکت عمومی و ارزیابی‌های دقیق ریسک برای مواجهه با این چالش‌ها و ترویج نوآوری مسئولانه ضروری است. چشم‌اندازهای آینده CRISPR/Cas در آبزی‌پروری

فرصت بی‌سابقه‌ای برای تقویت پاسخ‌های ایمنی ذاتی و اکتسابی با هدف گذاری ژن‌های حساست‌زا یا وارد کردن allerهای مقاوم فراهم می‌کند. به عنوان مثال، کریسپر با موفقیت برای اصلاح ژن‌های مرتبط با ایمنی به کار رفته است که منجر به افزایش مقاومت در برابر عوامل بیماری‌زای مهمی مانند ویروس سندروم لکه سفید در میگو، ویروس آمیای عفونی و عفونت‌های باکتریایی مانند یک باکتری گرم منفی به نام ادواردسیلا ایکتالوری^{۲۳} در گربه ماهی ماهی کanal^{۲۴} می‌گردد. پژوهشگران از ویرایش ژنوم مبتنی بر CRISPR/Cas9 برای وارد کردن ژن‌های پیتید ضد میکروبی مانند ژن کاتلیک سیدین^{۲۵} تم ساح که یکی از ژن‌های مهم سیستم ایمنی ذاتی است، استفاده کرده‌اند که منجر به افزایش مقاومت در برابر بیماری‌های باکتریایی شده است(Wang et al., 2023). این روش سیستم ایمنی طبیعی ماهی را تقویت کرده و شیوع و شدت عفونت‌های ناشی از عوامل بیماری‌زا مانند باکتری گرم منفی، هوایی و میله‌ای شکل به نام فلاوباکتریوم کولومنار^{۲۶} را کاهش می‌دهد. به همین ترتیب، کریسپر برای کاهش بار انگل‌ها و حساسیت ویروسی از طریق حذف ژن‌های بحرانی برای ورود یا تکثیر عوامل بیماری‌زا به کار گرفته شده است. اینمی هدایت شده توسط RNA و استراتژی‌های ضدانگلی مطالعات اخیر کاربردهای کریسپر را فراتر از ویرایش مستقیم ژنوم میزبان توسعه داده‌اند و سیستم‌های کریسپر هدف‌گیر RNA مانند Cas13 را برای کاربردهای ضد ویروسی مورد بررسی قرار داده‌اند. این اینمی هدایت شده توسط RNA نویدبخش مهار RNA ویروسی در داخل بدن و در نتیجه محدود کردن تکثیر و انتشار ویروس است. برای نمونه، عوامل زیستی CRISPR-Cas13 برای هدف‌گیری RNA ویروس نکروز عصبی^{۲۷} در ماهیان دریایی مهندسی شده‌اند که کاهش موفقیت‌آمیز بار ویروسی را نشان داده‌اند. در مبارزه با انگل‌های پروتوزوآئی، فناوری کریسپر برای اختلال انتخابی در ژنوم انگل‌ها به sgRNA کار رفته است(Abós *et al.*, 2022). به طور خاص، هایی که توالی‌های RNA ریبوزومی گونه‌های مژک دار تک سلولی شیلودونلا^{۲۸}، از انگل‌های بزرگ پوستی در

²⁹. Microinjection³⁰. Electroporation³¹. Zygotes³². Somatic³³. Genetically Modified Organism=GMO²³. *Edwardsiella ictaluri*²⁴. *Ictalurus punctatus*²⁵. Cathelicidin²⁶. *Flavobacterium columnare*²⁷. Nervous Necrosis Virus =NNV²⁸. *Chilodonella*

گرم مثبت و گرم منفی، ویروس‌ها، قارچ‌ها و انگل‌ها دارند. مکانیزم عملکرد آن‌ها به طور عمده بر تعامل با غشاهای میکروبی متمرکز است که منجر به تخریب غشا، ایجاد مذفذ و در نهایت مرگ عوامل بیماریزا می‌شود. مهم‌تر آنکه، پیتیدهای ضدمیکروبی به طور همزمان چندین محل مختلف میکروبی را هدف قرار می‌دهند و بنابراین احتمال توسعه مقاومت در برابر آن‌ها نسبت به آنتی‌بیوتیک‌های سنتی کاهش می‌یابد. در ماهیان و سخت‌پوستان، پیتیدهایی مانند پسیدین‌ها^{۳۵}، هپسیدین‌ها^{۳۶}، دفنسین‌ها^{۳۷} و کاتلی‌سیدین‌ها^{۳۸} شناسایی و به طور گستردۀ مطالعه شده‌اند (Radhakrishnan *et al.*, 2023). این پیتیدها در سلول‌های ایمنی مختلف و سطوح مخاطی از جمله موکوس پوست، آپشن‌ها و روده تولید می‌شوند که خط مقدم دفاع در برابر عوامل بیماریزا را تشکیل می‌دهند. پسیدین‌ها که منح صراً در ماهیان یافت می‌شوند، خواص قوی ضدویروسی، ضدبакتریایی و ضدانگلی دارند و به دلیل پایداری حرارتی بالا، تحمل نمک و سمیت سلولی پایین، برای کاربردهای آبزی‌پروری بسیار مناسب‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که پیتیدهای ضدمیکروبی نه تنها به طور مستقیم عوامل بیماریزا را از بین می‌برند، بلکه پاسخ‌های ایمنی را از طریق جذب شیمیایی سلول‌های ایمنی، تحریک تولید سایتوکین‌ها و افزایش فاگوسیتیوز تعديل می‌کنند. هپسیدین‌ها علاوه بر نقش ضد میکروبی، تنظیم‌کننده فرآیند هوئوستازی آهن^{۳۹} هستند که عاملی حیاتی در محدود کردن رشد عوامل بیماریزا از طریق کاهش دسترسی به آهن می‌باشد. افزایش این عوامل مقاوم به آنتی‌بیوتیک در آبزی‌پروری که ناشی از مصرف بیش از حد و غالباً بدون کنترل آنتی‌بیوتیک‌ها است، اهمیت حیاتی پیتیدهای ضدمیکروبی را به عنوان جایگزین‌های آنتی‌بیوتیک برجسته می‌کند. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که افزایش بیان ژن این پیتیدها یا بیان تاریخ‌خته آن در ماهیان می‌تواند بار باکتریایی و مرگ و میر را به طور قابل توجهی کاهش دهد. علاوه بر این، به کارگیری پیتیدهای ضدمیکروبی سنتزی یا نوترکیب در خوراک یا به عنوان تقویت‌کننده واکسن، تحریک ایمنی و مقاومت به بیماری را تقویت می‌کند. با وجود این ویژگی‌های امیدبخش، این پیتیدهای طبیعی گاه محدودیت‌هایی مانند

امیدوارکننده است و پژوهش‌های جاری در راستای توسعه اهداف ژنی گستردۀ تر، بهبود روش‌های انتقال و ادغام داده‌های چند اومیکس برای شناسایی بهینه‌ترین ویرایش‌ها به منظور مقاومت در برابر بیماری صورت می‌گیرد. ترکیب کریسپر با اصلاح نژاد انتخابی و دیگر فناوری‌های مولکولی، توسعه گونه‌های مقاوم به آبزی‌پروری را تسريع کرده و وابستگی به آنتی‌بیوتیک‌ها و مواد شیمیایی را کاهش می‌دهد. واریانت‌های نوظهور کریسپر با دقت بالاتر و امکانات جدید، مانند ویرایشگرهای پایه و ویرایشگرهای اصلی، نوید ویرایش‌های دقیق‌تر ژنتیکی با ریسک‌های کمتر را می‌دهند. این ابزارها قابلیت اصلاح ژهش‌های زیان‌آور، افزایش دقیق بیان ژن‌های ایمنی و تعدیل علائم اپی‌ژنتیکی مرتبط با سلامت و رشد را دارند. در نهایت، ویرایش ژنوم با CRISPR/Cas ابزاری قدرتمند در بیوتکنولوژی مولکولی است که توانایی تحول در مقاومت به بیماری و بهره‌وری کلی در آبزی‌پروری را دارد. پیشرفت مسئولانه همراه با مسیرهای قانونی شفاف و چارچوب‌های اخلاقی برای تبدیل این نوآوری‌های تکنولوژیک به شیوه‌های پایدار آبزی‌پروری حیاتی خواهد بود (Depuydt *et al.*, 2023).

پیتیدهای ضد میکروبی و مداخله RNA

چالش‌های رو به افزایش ناشی از شیوع بیماری‌ها در آبزی‌پروری، همراه با نگرانی‌ها در مورد مقاومت به آنتی‌بیوتیک‌ها و آلودگی‌های زیستمحیطی، تحقیق درباره جایگزین‌های نوین و پایدار برای مدیریت بیماری‌ها را تسريع بخشیده است. از جمله رویکردهای بسیار امیدبخش، استفاده از پیتیدهای ضد میکروبی و مداخله RNA است که هر دو نمایانگر استراتژی‌های نوآورانه در بیوتکنولوژی مولکولی برای تقویت دفاع‌های ایمنی و کنترل مؤثر عوامل بیماریزا به شمار می‌آیند. پیتیدهای ضد میکروبی، مولکول‌های کوچکی هستند که معمولاً شامل ۱۰ تا ۵۰ آمینواسید می‌باشند و به عنوان اجزای کلیدی سیستم ایمنی ذاتی در انواع متنوعی از موجودات از جمله گونه‌های آبزی، ایفای نقش می‌کنند. این پیتیدها که با بار مثبت و ساختار آمفی‌پاتیک^{۴۰} خود شناخته می‌شوند، فعالیت ضد میکروبی گستره‌ای علیه باکتری‌های

³⁷. Defensins

³⁸. Cathelicidins

³⁹. Iron Homeostasis

³⁴. Amphipathic structure

³⁵. Piperidines

³⁶. Hepcidins

فراهم می‌کنند، در حالی که RNA های مداخله‌گر کوچک خاموش‌سازی هدفمند و توالی خاص عوامل بیماریزا یا ژن‌های حساسیت‌زا را امکان‌پذیر می‌سازد. علاوه بر این، ویرایش ژن مبتنی بر کریسپر می‌تواند ژن‌های پیتیدهای ضدمیکروبی یا مسیرهای RNA های مداخله‌گر کوچک را برای افزایش اثربخشی و دوام بهینه‌سازی کند. مکانیزم‌های ایمنی در گونه‌های آبزی و تعدیل مولکولی سیستم ایمنی گونه‌های آبزی شامل شبکه‌ای پیچیده از مکانیزم‌های دفاعی است که برای محافظت در برابر طیف گسترده‌ای از پاتوژن‌های میکروبی موجود در محیط‌های آبی طراحی شده‌اند. برخلاف پستانداران زمینی، بسیاری از موجودات آبزی، بهویژه ماهیان و بی‌مهرگان، بیشتر به ایمنی ذاتی به عنوان خط دفاعی اولیه متکی هستند، زیرا سیستم ایمنی تطبیقی در برخی از آن‌ها نسبتاً ابتدایی یا حتی غایب است. درک این مکانیزم‌های ایمنی در سطح مولکولی، برای توسعه مداخلات بیوتکنولوژیک که مقاومت به بیماری را در آبزی‌پروری بهبود می‌بخشند، ضروری است. سیستم ایمنی ذاتی ایمنی ذاتی اولین و فوری‌ترین خط دفاعی در گونه‌های آبزی را تشکیل می‌دهد. این پاسخ ایمنی غیر اختصاصی است که با شناسایی و پاسخ به عوامل بیماریزا از طریق الگوهای مولکولی محافظت‌شده و نه بر اساس مواجهه قبلی، عمل می‌کند. کارایی ایمنی ذاتی در موجودات آبزی به دلیل مواجهه مداوم با عوامل بیماریزا (Mokhtar *et al.*, 2023) و فراوان در آب اهمیت ویژه‌ای دارد (al., 2023). اجزای ایمنی ذاتی در ماهیان و سایر جانوران آبزی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

موانع فیزیکی: سطوح مخاطی مانند پوست، آيشش‌ها و دستگاه گوارش به عنوان موانع فیزیکی و شیمیایی از ورود عوامل بیماریزا جلوگیری می‌کنند. موکوسی که توسط سلول‌های پوششی ترشح می‌شود، شامل مجموعه‌ای از مولکول‌های ضد میکروبی مانند لیزووزیم‌ها و لکتین‌ها است (Muñoz-Atienza *et al.*, 2021).

اجزای سلولی: سلول‌های فاگوسیت‌کننده مانند ماکروفازها، نوتروفیل‌ها و سلول‌های دندریتیک، پاتوژن‌های مهاجم را بلعیده و نابود می‌کنند. این سلول‌ها دارای گیرنده‌های شنا سایی الگو هستند که شامل گیرنده‌های

حساسیت به تخریب آنزیمی و فعالیت همولیتیک احتمالی در غلظت‌های بالا دارند (Bohara *et al.*, 2023).

فناوری مداخله RNA

این فناوری، یک استراتژی خاموش‌سازی ژن است که از مسیرهای تخریب RNA در سلول‌ها بهره می‌گیرد تا به طور خاص بیان ژن‌های عوامل بیماریزا یا عوامل حساسیت میزبان را کاهش دهد. در آبزی‌پروری، RNAi به عنوان ابزاری مؤثر ضد ویروسی و ضد باکتریایی نشان داده شده است که از طریق تخریب ژنوم RNA ویروس‌ها یا رونویسی‌های mRNA باکتریایی که برای عفونت و تکثیر ضروری هستند، عمل می‌کند. RNA های مداخله‌گر کوچک^{۴۰} یا RNA های کوتاه حلقه‌دار^{۴۱} طراحی شده علیه ژن‌های ویروسی مانند ویروس سندرم لکه سفید در میگو یا ویروس نکروز عصبی در ماهیان، در محیط‌های آزمایشگاهی اثربخشی خود را نشان داده‌اند و به طور قابل توجهی بار ویروسی را کاهش داده و نرخ بقای میزبان را بهبود می‌بخشدند. رویکردهای RNA های مداخله‌گر کوچک همچنین به عوامل بیماریزا باکتریایی و آلدگی‌های انگل‌ها توسعه یافته‌اند، جایی که خاموش‌سازی ژن مکانیزم‌های کلیدی ویروننس یا بقای آن‌ها را مختلف می‌کند. انتقال مولکول‌های RNA های مداخله‌گر کوچک همچنان چالشی فنی است و استراتژی‌هایی مانند تزریق، مصرف خوراکی از طریق خوراک و کپسوله‌سازی با نانوذرات در تحقیقات فعلی برای کاربرد عملی در آبزی‌پروری بررسی می‌شوند. پیشرفت‌ها در طراحی حامل‌های ویروسی و زیست شنا سی مصنوعی به منظور افزایش پایداری و کارایی هدف‌گیری آن در حال انجام است. علاوه بر مهار مستقیم عوامل بیماریزا، خاموش‌سازی ژن مبتنی بر RNA های مداخله‌گر کوچک برای تنظیم بیان ژن‌های ایمنی میزبان مثلاً با کاهش تنظیم‌کننده‌های منفی مسیرهای ایمنی به منظور تقویت پاسخ‌های ضد ویروسی یا ضد باکتریایی نیز استفاده می‌شود. پتانسیل هم‌افرا و کاربردهای آینده ترکیب پیتیدهای ضد میکروبی و RNA های مداخله‌گر کوچک، رویکردی چندجانبه برای مدیریت بیماری‌های آبزی‌پروری ارائه می‌دهد (Mondal and Thomas, 2022).

^{۴۰}. Small interfering RNAs=siRNA

^{۴۱}. Short hairpin RNAs=shRNA

می‌دهند و سلول‌های T سیتوکسیک که سلول‌های آلوده را از بین می‌برند، را واسطه‌گری می‌کنند. مولکول‌های کمپلکس اصلی سازگاری بافتی^{۴۷} پیتیدهای آنتیژن پردازش شده را به سلول‌های T ارائه کرده و اینمی تطبیقی را آغاز می‌کنند. با وجود حفظ تکاملی، سیستم ایمنی تطبیقی ماهیان معمولاً کندر و ضعیفتر از پستانداران است، که این موضوع اهمیت سیستم ایمنی ذاتی را در دفاع اولیه در برابر عوامل بیماریزا افزایش می‌دهد. تعدیل مولکولی اینمی بیوتکنولوژی مولکولی، امکان تعديل پاسخ‌های اینمی ذاتی و تطبیقی در گونه‌های آبزی را برای افزایش مقاومت به بیماری فراهم می‌آورد. تحلیل‌های ترنسکریپتومیک و پروتئومیک تغییرات پویای بیان ژن‌های اینمی در طول تهاجم عوامل بیماریزا را نشان می‌دهند و مولکول‌های کلیدی مانند سایتوکین‌ها (اینترلوکین‌ها، اینترفرون‌ها، فاکتورهای نکروز تومور)، کموکین‌ها و مولکول‌های سیگنال‌دهی که همانگ‌کننده پاسخ‌های اینمی هستند را شناسایی می‌کنند(Lu et al., 2025).

راهبردهای بیوتکنولوژیک برای ارتقای مهارت اینمی شامل موارد زیر است:

- افزایش بیان گیرنده‌های شناسایی‌الگو و سایتوکین‌ها برای تقویت شناسایی عوامل بیماریزا و پاسخ‌های التهابی
- مهندسی پیتیدهای ضد میکروبی با کارایی و پایداری برتر
- اصلاح ژن‌های دخیل در پردازش و ارائه آنتیژن برای بهبود فعال‌سازی اینمی تطبیقی
- استفاده از تقویت‌کننده‌های اینمی و نگهدارنده‌های واکسن مبتنی بر مسیرهای مولکولی اینمی علاوه بر این، تغییرات اپی‌زنتیک مانند متیلاسیون و تغییرات هیستونی نیز در تنظیم بیان ژن‌های اینمی و اینمی آموزش‌دهنده نقش دارند و اهداف جدیدی برای مداخلات فراهم می‌آورند. گریز اینمی و تعاملات میزبان-پاتوژن عوامل بیماریزا موفق مکانیزم‌هایی برای فرار یا سرکوب پاسخ‌های اینمی میزبان را توسعه داده‌اند. مطالعات مولکولی نشان داده‌اند که ویروس‌ها با اختلال در سیگنال‌دهی اینترفرون، باکتری‌ها با ترشح عوامل

شبیه^{۴۲}، گیرنده‌های نود-مانند^{۴۳} و گیرنده‌های-I-RIG مانند می‌شوند و الگوهای مولکولی مرتبط با عوامل بیماریزا^{۴۴} همچون لیپوپلی‌ساقاریدهای باکتریایی و RNA ویروسی را شناسایی می‌کنند. پس از شناسایی، گیرنده‌های شناسایی‌الگو، مسیرهای سیگنال‌دهی داخل‌سلولی را فعال کرده که به پاسخ‌های التهابی و تولید مولکول‌های ضد میکروبی منجر می‌شود.

عوامل هومورال^{۴۵} : سیستم کمپلمان، لیزوژیم‌ها، پروتئین‌های فاز حاد و پیتیدهای ضد میکروبی بخش‌های محلول اینمی ذاتی را تشکیل می‌دهند. این عوامل در مایعات بدن گردش کرده و در اوپسونیزاسیون، لیز مستقیم عوامل بیماریزا و تنظیم عملکرد سلول‌های اینمی نقش دارند. مطالعات روی ماهیان استخوانی نشان داده‌اند که ماکروفازها و سلول‌های دندربیتیک به عنوان سلول‌های ارائه‌دهنده حرفة‌ای آنتیژن^{۴۶} عمل می‌کنند و اینمی ذاتی و تطبیقی را به هم پیوند می‌دهند. سلول‌های B در ماهیان نیز علاوه بر نقش خود در اینمی تطبیقی، ویژگی‌های شبیه اینمی ذاتی دارند و در فاگوسیتوز و ترشح سایتوکین‌ها مشارکت می‌کنند. گونه‌های بی‌مهره آبزی مانند نرم‌تنان و سخت پوستان که فاقد سیستم اینمی تطبیقی کلاسیک هستند، پاسخ‌های اینمی ذاتی تقویت‌شده‌ای را نشان می‌دهند که به آن اینمی آموزش‌دهنده گفته می‌شود. این پدیده مشابه حافظه اینمی است که به کمک تغییرات اپی‌زنتیک و بازبرنامه‌ریزی متابولیک سلول‌های اینمی ذاتی، باعث پاسخ شدیدتری در مواجهات بعدی با عوامل بیماریزا می‌شود. سیستم اینمی تطبیقی سیستم اینمی تطبیقی که در مهره‌داران فکی از جمله ماهیان استخوانی وجود دارد، حفاظت اختصاصی و طولانی‌مدتی را نسبت به آنتیژن‌ها فراهم می‌آورد. این سیستم عمدها شامل لنسفوسیت‌ها، سلول‌های B و T است که دارای گیرنده‌هایی هستند که از طریق سازوکار بازآرایی تولید شده‌اند و امکان شناسایی اختصاصی آنتیژن را می‌دهند(Wu et al., 2020). سلول‌های B آنتی‌بادی‌هایی تولید می‌کنند که عوامل بیماریزا را خنثی کرده یا برای نابودی علامت‌گذاری می‌کنند. سلول‌های T پاسخ‌های اینمی سلولی، از جمله سلول‌های T کمکی که عملکرد سلول‌های B را افزایش

⁴⁶. Antigen-presenting=APCs

⁴⁷. Major Histocompatibility Complex=MHC

⁴². Toll-like receptors=TLRs

⁴³. NOD-like receptors=NLRs

⁴⁴. Pathogen-associated molecular patterns=PAMPs

⁴⁵. Humoral Factors

انجام می‌شود. روش‌های تجربی مبتنی بر رقابت RNA که هدف آن‌ها ژن‌های ویروسی است، در کاهش بار ویروسی در جمعیت‌های میگو مؤثر بوده‌اند. (Fajardo *et al.*, 2022)

آزاد ماهیان

ماهی آزاد آتلانتیک و قزل‌آلای رنگین‌کمان، دو گونه شاخص ماهیان پرورشی در مناطق آب سرد، از زیست‌فناوری مولکولی بهره‌های قابل توجهی برده‌اند. انتخاب ژنومی که بر اساس هزاران تکنولوژی‌پذیر مورفیسم^{۵۰} انجام شده است، روند اصلاح نژاد آزاد ماهیان مقاوم به ویروس نکروز پانکراس عفونی^{۵۱}، ویروس آنمی عفونی آزاد ماهی و بیماری‌های باکتریایی مانند فورانکولوزیس^{۵۲} را تسریع کرده است. فناوری CRISPR/Cas9 در آزاد ماهیان برای حذف یا اصلاح ژن‌های مرتبط با ایمنی و حساسیت به بیماری‌ها به کار گرفته شده است. واکسیناسیون و مواد تحریک کننده سیستم ایمنی بدن^{۵۳} همراه با داشت ژنومی در باره مسیرهای ایمنی، به برنامه‌های مؤثر کنترل بیماری کمک شایان توجهی کرده‌اند. داده‌های تنسکریپتومیک، راهنمای توسعه واکسن با شناسایی پروتئین‌ها و مسیرهای ایمنی‌زای فعال شده در طول عفونت‌های طبیعی هستند. (Li *et al.*, 2023)

تیلاپیا و کپور

تیلاپیا و کپور ماهیان گونه‌های غالب در سیستم‌های آبزی پروری آبهای گرم به ویژه در آسیا و آفریقا هستند. کاربردهای زیست‌فناوری مولکولی در این گونه‌ها شامل انتخاب کمکی نشانگر و انتخاب ژنومی برای مقاومت در برابر بیماری‌های باکتریایی مانند استرپتوکوکوس^{۵۴} و عفونت‌های ویروسی از جمله ویروس دریاچه تیلاپیا^{۵۵} می‌باشد (Islam *et al.*, 2022). فناوری CRISPR/Cas9 با موفقیت در تیلاپیا به منظور اصلاح ژن‌های مرتبط با رشد، باروری و رنگدانه‌ها به کار رفته است. اخیراً، ویرایش ژن هدفمند بر روی ژن تنظیم کننده رشد عضلانی میوستاتین^{۵۶} در کپور عادی منجر به افزایش قابل توجهی در توده عضلانی و نرخ رشد شده است. بهبود ژنتیکی

سرکوب‌کننده ایمنی و همچنین تنظیم مسیرهای آپوپتوزی میزبان، قابلیت فرار از سیستم ایمنی را دارد. درک این تاکتیک‌های فرار در سطح مولکولی برای توسعه مقابله‌های مؤثر بیوتکنولوژیک مانند ویرایش ژن و مداخله RNA ضروری است (Makesh and Rajendran, 2022).

کاربردها و مطالعات موردی در گونه‌های عدمده آبزی‌پروری

کاربرد زیست‌فناوری مولکولی در آبزی‌پروری پیشرفت‌های امیدوارکننده‌ای را به ویژه در گونه‌های اصلی که سهم قابل توجهی در تولید جهانی غذاهای دریایی دارند، به همراه داشته است. ابزارهای زیست‌فناوری، به ویژه ویرایش ژن، انتخاب ژنومی، تنسکریپتومیکس و ایمونو‌مدولاتورهای مولکولی^{۴۸}، برای افزایش مقاومت در برابر بیماری‌ها، بهبود نرخ رشد، کنترل تولید مثل و بهینه سازی سایر صفات دارای ارزش تجاری به کار گرفته شده‌اند. در این بخش، مطالعات موردی نشان‌دهنده ادغام این فناوری‌ها در گونه‌های کلیدی آبزی‌پروری مرور می‌شود:

میگو

میگو با چالش‌های جدی از جمله بیماری‌های ویروسی، به ویژه ویروس سندروم لکه سفید و عوامل بیماری‌زای باکتریایی مانند گونه‌های ویبریو مواجه است. برنامه‌های انتخاب ژنومی که بر مقاومت در برابر بیماری تأکید دارند، موفقیت‌هایی در بهبود نرخ بقا در میگو سفید^{۴۹} یکی از مهم‌ترین گونه‌های میگوی پرورشی در جهان، نشان داده‌اند. مطالعات تنسکریپتومیک شبکه‌های ژنی ایمنی فعال شده در پاسخ به ویروس سندرملکه سفید را شناسایی کرده‌اند، از جمله پیتیدهای ضد میکروبی و مولکول‌های سیگنال‌دهنده که راهنمایی برای استراتژی‌های انتخاب گرینشی فراهم می‌کنند. کاربردهای ویرایش ژن علیرغم دشواری‌های مرتبط با لقاداخی و دستکاری رویان در سخت‌پوستان در حال گسترش است. پژوهش‌های فعال بر روی حذف ژن‌های مستعد و تعديل عوامل مؤثر در ایمنی مانند پیتیدهای ضد میکروبی با فناوری CRISPR-Cas9

^{۵۳}. Immunostimulants

^{۵۴}. *Streptococcus*

^{۵۵}. Tilapia Lake Virus=TiLV

^{۵۶}. Myostatin

⁴⁸. Molecular Immunomodulators

⁴⁹. *Litopenaeus vannamei*

⁵⁰. Single Nucleotide Polymorphisms=SNP

⁵¹. Infection Pancreatic Necrosis Virus=IPNV

⁵². Furunculosis

به صورت مداوم رصد می‌کند. هنگامی که این روش با داده‌ها و تحلیل‌های مولکولی و ابزارهای زیست‌اطلاعاتی ترکیب می‌شود، فرستهای بی سابقه‌ای برای بهینه سازی روش‌های پرورش، ارتقای نظارت بر بیماری‌ها و امکان مداخله زودهنگام فراهم می‌آورد که در ذهایت منجر به سیستم‌های آبزی‌پروری پایدارتر خواهد شد.

رویکردهای آبزی‌پروری دقیق

آبزی‌پروری دقیق از مجموعه‌ای از فناوری‌ها شامل دوربین‌های زیرآبی، بیوسنسورها، حسگرهای کیفیت آب و سیستم‌های تغذیه خودکار استفاده می‌کند که به طور جمعی داده‌های حجمی را از وضعیت فیزیولوژیک حیوانات آبزی و شرایط محیطی محیط کشت تولید می‌کنند. پارامترهایی مانند دما، اکسیژن محلول، میزان آمونیاک، الگوهای حرکتی ماهیان و رفتار تغذیه به صورت مستمر ثبت می‌شوند. ترکیب این شاخص‌ها با نشانگرهای زیستی سلامت به دست آمده از تشخیص‌های مولکولی، امکان شناسایی زودهنگام شیوع بیماری‌ها پیش از بروز علائم کلینیکی را فراهم می‌کند که این امر به طور قابل توجهی مرگ و میر را کاهش می‌دهد. استفاده از نمونه‌برداری DNA محیطی^{۶۰} همراه با توالی‌یابی با توان بالا، پایش غیرتھاجمی حضور عوامل بیماری‌زا و پویایی جوامع میکروبی در سیستم‌های کشت را امکان‌پذیر می‌سازد. این نظارت مولکولی که در چارچوب پلتفرم‌های دقیق ادغام شده است، مدیریت پیشگیرانه بیماری و امنیت زیستی را تسهیل می‌کند (Stentiford *et al.*, 2020).

نقش بیوانفورماتیک

زیست‌اطلاعات نقش محوری در مدیریت و تفسیر حجم عظیم داده‌های تولید شده از سامانه‌های آبزی‌پروری دقیق و مطالعات زیست‌فناوری مولکولی ایفا می‌کند. داده‌های امیکس (زنومیکس، ترنسکریپتو میکس، پروتئومیکس، متابولومیکس) ذا تأ پیچیده و چند بعدی هستند و نیازمند ابزارهای محاسباتی پیشرفته برای پردازش، تحلیل و تجسم می‌باشند (Rather *et al.*, 2023).

کاربردهای بیوانفورماتیک عبارتند از:

صفات تولیدمثلى از طریق ویرایش ژن به کنترل چرخه‌های تولیدمثلي و پیشگیری از تکثیر ناخواسته کمک می‌کند که این امر ریسک‌های زیست‌محیطی مرتبط با فرار ماهیان پرورشی را کاهش می‌دهد (Wangkahart *et al.*, 2023).

صفدها

صفدهایی مانند صدف خوارکی و نرم تنان، بخش قابل توجهی از آبزی‌پروری جهانی را تشکیل می‌دهند، اما به طور عمده به دلیل فقدان سیستم ایمنی تطبیقی کلاسیک، مبتنی بر ایمنی ذاتی هستند. تکنیک‌های ژنومی و ترنسکریپتو میک، امکان اصلاح انتخابی گونه‌های صدف مقاوم به عوامل بیماری‌زا و ویروسی مانند هرپس‌ویروس اوسترید نوع یک^{۵۷} و بیماری‌های باکتریایی را فراهم کرده‌اند. اگرچه ویرایش ژن در صدف‌ها به دلیل چالش‌های فنی مرتبط با دستکاری رویان در مراحل اولیه است، اما پیشرفتهایی با کاربرد CRISPR/Cas9 در صدف اقیانوس آرام گزارش شده است که هدف آن ژن‌های دخیل در تشکیل پوسته و رشد می‌باشد.

گربه ماهیان و سایر گونه‌ها

گربه ماهی کانالی، گونه‌ای پایه‌ای در آبزی‌پروری آمریکای شمالی، تو سط فناوری کری‌سپر، اصلاح ژنتیکی شده است تا ژن‌های مستعد را حذف و پیتیدهای ضد میکروبی را وارد کند که به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت در برابر بیماری‌های باکتریایی را بهبود داده است. مطالعات مشابهی نیز در گونه‌هایی مانند یک ماهی کوچک آب شیرین به نام مداداکای ژاپن^{۵۸}، ماهی تیغه‌ای^{۵۹} و فلاندر زیتونی^{۶۰} به منظور بهبود رشد، رنگدانه‌ها و عملکرد سیستم ایمنی انجام شده است (Van Sang *et al.*, 2023).

ادغام با آبزی‌پروری دقیق و بیوانفورماتیک

همگرایی زیست‌فناوری مولکولی با آبزی‌پروری دقیق و بیوانفورماتیک، گامی تحول‌آفرین در مدیریت بیماری‌های آبزی‌پروری و افزایش بهره‌وری کلی تولید به شمار می‌رود. آبزی‌پروری دقیق با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته حسگر، پلتفرم‌های دیجیتال و سیستم‌های خودکار، سلامت، رفتار و شرایط محیطی گونه‌های آبزی‌پرورشی را

⁶⁰. Olive flounder= *Paralichthys olivaceus*

⁶¹. Environmental DNA =eDNA

⁵⁷. Ostreid Herpes Virus 1=OsHV-1

⁵⁸. Japanese medaka= *Oryzias latipes*

⁵⁹. Blunt snout bream= *Megalobrama amblycephala*

استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها و مواد شیمیایی و بهبود رفاه حیوانات و کیفیت محصول می‌شوند.

بهبود ردبایی و صدور گواهی: اثرانگشت مولکولی و ثبت دیجیتالی سوابق، ردبایی قوی محصولات آبزیپروری را فراهم آورده و فرآیندهای صدور گواهی و اعتقاد مصرف‌کننده را تسهیل می‌کنند(Volpe *et al.*, 2023).

چالش‌ها و مسیرهای آینده

ادغام این فناوری‌ها با چالش‌هایی روبرو است که شامل استاندارد سازی داده‌ها، قابلیت همکاری^{۶۳} میان پلتفرم‌های حسگر و مولکولی، هزینه‌های اولیه بالا و نیاز به نیروی متخصص در زیست‌اطلاعات و فناوری آبزیپروری می‌شود. پیشرفت‌هایی در را یانش ابری، را یانش لبه و هوش مصنوعی (Artificial Intelligence=AI) پیش‌بینی می‌شود این موضع را با امکان پذیر ساختن پردازش داده‌های بلادرنگ مقیاس‌پذیر و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری در دسترس تولیدکنندگان در هر سطحی، از بین برداشت تحقیقات آینده بر توسعه رابطه‌ای کاربری آسان، حسگرهای مقررین به صرفه‌تر و کیت‌های تشخیصی مولکولی خودکار مناسب استفاده روزمره در مزارع تمرکز دارد.

ملاحظات زیست‌محیطی و بوم‌شناسختی

ارگانیسم‌های ویرایش‌شده ژنتیکی که به طور عمده یا تصادفی به اکوسیستم‌های طبیعی رها شوند، ممکن است پیامدهای بوم‌شناسختی غیرقابل پیش‌بینی داشته باشند. خطرات احتمالی شامل انتقال ژن‌های ویرایش‌شده به جمعیت‌های وحشی، از بین بردن سازگاری‌های محلی و کاهش تنوع زیستی است. صفاتی که مقاومت بیشتر در برابر بیماری‌ها یا رشد افزایش یافته فراهم می‌کنند، می‌توانند مزیت انتخابی ایجاد کرده و در نتیجه دینامیک اکوسیستم را تغییر دهند. ارزیابی‌های ریسک زیست‌محیطی نیازمند داده‌های تجربی قابل اعتماد و مدل‌سازی‌های پیش‌بینی کننده برای ارزیابی جریان ژن، اثرات بر تناسب زیستی و تأثیرات اکوسیستمی پیش از تصویب گونه‌های آبزیپروری ویرایش‌شده ژنتیکی است. استراتژی‌های مهار و تضمین‌های ژنتیکی مانند سیستم‌های انتقال ژن با مکانیسم بازگشت داخلی در حال

انتخاب ژنومی و اصلاح نژاد: مدل سازی‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های نشانگرهای سرتاسر ژنوم، افراد دارای صفات برتر در مقاومت به بیماری و رشد را شناسایی می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین دقت ارزش‌های تخمینی اصلاح نژادی ژنومی^{۶۲} را بهبود می‌بخشند و برنامه‌های اصلاح نژاد گزینشی را تسريع می‌کنند.

تشخیص بیماری: خطوط کاری بیوانفورماتیک تلفیقی، داده‌های مولکولی را تحلیل کرده و نشانه‌های ژنتیکی اختصاصی عوامل بیماریزا و نشانگرهای زیستی پاسخ ایمنی میزبان را شناسایی کنند که منجر به بهبود حساسیت و ویژگی تشخیص‌ها می‌شود.

تحلیل شبکه‌ها و مسیرهای نقشه برداری از شبکه‌های تعامل ژنی و مسیرهای ایمنی، گره‌های کلیدی تنظیمی را آشکار می‌کند که می‌توان ان‌ها را برای بهبود ژنتیکی یا مداخلات درمانی هدف قرار داد.

مدلسازی تعامل میزبان-پاتوژن-محیط: بیوانفورماتیک با ادغام داده‌های چند‌آمیکس و داده‌های محیطی، امکان مدل‌سازی تعاملات پیچیده اثرگذار بر حساسیت به بیماری و خطر شیوع بیماری‌ها را فراهم می‌سازد.

فواید هم‌افزایی و پیاده‌سازی:

هم‌افزایی میان زیست‌فناوری مولکولی، آبزیپروری دقیق و زیست‌اطلاعات مزایای عملی متعددی را ارائه می‌دهد:

پیش‌بینی و پیشگیری بهبود یافته بیماری: نظرارت در زمان داقعی سلامت همراه با نشانگرهای مولکولی، امکان پیش‌بینی زودهنگام و دقیق تر شیوع بیماری‌ها را فراهم می‌کند. هشدارهای زودهنگام اجازه می‌دهد تا درمان‌ها یا تغییرات مدیریتی به موقع اعمال شوند و از گسترش بیماری جلوگیری به عمل آید.

روش‌های مدیریت شخصی‌سازی شده: دیدگاه‌های مولکولی درباره وضعیت ایمنی و ساختار ژنتیکی ذخایر، از تغذیه هدفمند، استراتژی‌های واکسیناسیون و اصلاح نژاد گزینشی مناسب با شرایط خاص مزرعه و فشارهای عوامل پیمانیزا حمایت می‌کند.

پایداری و بهره‌وری منابع: رژیم‌های تغذیه‌ای بهینه و مدیریت محیطی باعث کاهش ضایعات، حداقل سازی

^{۶۳}. Interoperability

^{۶۲}. Genomic Estimated Breeding Values =GEBV

صفات پیچیده، اثرات خارج از هدف، عدم قطعیت‌های قانونی، نگرانی‌های پذیرش عمومی و معضلات اخلاقی مرتبط با تنوع زیستی، رفاه حیوانات و دسترسی عادلانه به همراه دارد. پرداختن به این مسائل نیازمند پژوهش‌های دقیق، سیاست‌گذاری فراگیر، ارتباط شفاف و ارزیابی‌های قوی ریسک است تا توسعه مسئولانه و اجرای پایدار این فناوری‌ها تضمین شود. نگاهی به آینده، همکاری‌های چندرشته‌ای مدام و نوآوری‌ها، روند تحول آبزی‌پروری را به سوی سیستم‌های هوشمندتر و مقاوم‌تر هدایت خواهد کرد. پیشرفت‌هایی در زیست‌شناسی مصنوعی، اپیژنتیک و زیست‌شناسی محاسباتی در راه است تا دستکاری صفات و استراتژی‌های مدیریت بیماری را بیش از پیش دقیق‌تر سازد. از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که زیست‌فناوری مولکولی همراه با ملاحظات اقتصادی-اجتماعی و اصول مدیریت مبتنی بر اکوسیستم یکپارچه شود تا بقای بلندمدت آبزی‌پروری تضمین گردد. در پایان، زیست‌فناوری مولکولی فصلی نو در آبزی‌پروری را رقم می‌زند، آینده‌ای که در آن گونه‌های آبزی مقاوم به بیماری، سریع‌الرشد و سازگار با محیط زیست به شکلی بهینه تولید می‌شوند تا پاسخگوی تقاضای جهانی غذاهای دریایی باشند. بهره‌گیری از این پتانسیل با نگاه اخلاقی و حکمرانی مطلوب، نه تنها عملکرد صنعت را بهبود می‌بخشد بلکه سهم مهمی در امنیت غذایی جهانی، توسعه اقتصادی و پایداری اکولوژیکی ایفا می‌کند.

منابع:

1. Abós, B., Bailey, C., and Tafalla, C., 2022. Adaptive Immunity. Principles of Fish Immunology: From Cells and Molecules to Host Protection. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 105–140. DOI: 10.1007/978-3-030-85420-1_3. ISBN 978-3-030-85420-1.
2. Ahmad, S.M., De Donato, M., Bhat, B.A., Diallo, A.B., and Peters, S.O., 2023. Editorial: Omics technologies in livestock improvement: From selection to breeding decisions. *Frontiers in Genetics*. 13, 1113417. DOI: 10.3389/fgene.2022.1113417.
3. Akai, M., Hikima, J., and Kono, T., 2021. Fish Cytokines: Current Research and Applications. *Fish. Science.* 87, 1–9. DOI:10.1007/s12562-020-01476-4.
4. Bohara, K., Joshi, P., Acharya, K.P., and Ramena, G., 2023. Emerging technologies

بررسی برای کاوش این خطرات بوم‌شناختی هستند (Tosik *et al.*, 2021).

نتیجه‌گیری

زیست‌فناوری مولکولی به عنوان نیرویی تحول آفرین در آبزی‌پروری ظاهر شده است که نحوه مقابله با مقاومت در برابر بیماری‌ها، عملکرد رشد و پایداری در گونه‌های آبزی پرورشی را دگرگون ساخته است. رشد سریع صنعت جهانی آبزی‌پروری که ناشی از افزایش تقاضا برای غذاهای دریایی پایدار است، نیازمند راهکارهای نوآورانه‌ای است که محدودیت‌های اصلاح نژاد سنتی، مدیریت بیماری‌ها و کنترل محیطی را پشت سر بگذارد. ادغام ابزارهای پیشرفت‌های ژنتیکی و مولکولی، از جمله ژنومیکس، ترنسکریپتومیکس، فناوری‌های ویرایش ژن مانند CRISPR/Cas، پیتیدهای ضد میکروبی و مداخله RNA فرسته‌های بی‌سابقه‌ای را برای ارتقای توان ایمنی، بهینه‌سازی صفات تولیدی و کاوش و استگی به آنتی‌بیوتیک‌ها و مواد شیمیایی فراهم کرده است. انتخاب ژنومی و توالی‌بایی کامل ژنوم امکان شناسایی واریانت‌های ژنتیکی مرتبط با مقاومت به بیماری، رشد و سازگاری محیطی را فراهم آورده است و برنامه‌های اصلاح نژاد دقیق مناسب با فشارهای خاص عوامل بیماریزا و شرایط تولید را تسهیل می‌کند. ترنسکریپتومیکس و ایمنوزنثیک بینش‌های عمیقی در باره ژعاملات میزبان-پاتوژن و دینامیک سیستم ایمنی ارائه داده است و توسعه واکسن‌ها، ایمونواستیمولات‌ها و استراتژی‌های درمانی نوین را هدایت می‌کند. ویرایش ژن، به ویژه سیستم‌های CRISPR/Cas، ابزاری بسیار دقیق و کارآمد برای اصلاح صفات دلخواه و بهبود مقاومت در برابر بیماری‌های ویروزی و باکتریایی است که روش‌های انتخاب سنتی را تکمیل می‌کند. در کنار زیست‌فناوری مولکولی، ظهور آبزی‌پروری دقیق که ترکیبی از فناوری‌های حسگری، پایش سلامت در زمان واقعی، کنترل محیطی و تحلیل داده‌های بیوانفورماتیک است، سیستم‌های پرورشی پویایی را ایجاد کرده است که قادر به سازگاری با عوامل استرس‌زا و مداخله به موقع برای پیشگیری از شیوع بیماری‌ها هستند. این رویکرد جامع بهره‌وری را افزایش داده و هم‌زمان پایداری زیست‌محیطی و ایمنی غذایی را تضمین می‌کند. با این حال، کاربرد این فناوری‌های پیشرفت‌هه چالش‌های قابل توجهی از جمله موانع فنی در ویرایش

- Singapore, pp. 217–230. ISBN 978-981-19126-8-9.
14. Mokhtar, D.M., Zaccone, G., Alesci, A., Kuciel, M., Hussein, M.T., and Sayed, R.K.A., 2023. Main Components of Fish Immunity: An Overview of the Fish Immune System. *Fishes*, 8, 93.
 15. Mokrani, A., and Liu, S., 2024. Harnessing CRISPR/Cas9 system to improve economic traits in aquaculture species. *Aquaculture* 2024, 579, 740279. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2023.740279.
 16. Mondal, H., and Thomas, J., 2022. A Review on the Recent Advances and Application of Vaccines against Fish Pathogens in Aquaculture. *Aquacult. Int.* 30, 1971–2000. DOI: 10.1007/s10499-022-00884-w.
 17. Muñoz-Atienza, E., Díaz-Rosales, P., and Tafalla, C., 2021. Systemic and Mucosal B and T Cell Responses Upon Mucosal Vaccination of Teleost Fish. *Frontiers in Immunology*. 11, 622377. DOI: 10.3389/fimmu.2020.622377.
 18. Natnan, M.E., Low, C.-F., Chong, C.-M., Bunawan, H., and Baharum, S.N., 2021. Integration of Omics Tools for Understanding the Fish Immune Response Due to Microbial Challenge. *Front. Mar. Sci.* 8, 668771. DOI: 10.3389/fmars.2021.668771.
 19. Nguyen, N. H., 2024. Genetics and Genomics of Infectious Diseases in Key Aquaculture Species. *Biology*, 13(1), 29. <https://doi.org/10.3390/biology13010029>.
 20. Radhakrishnan, A., Vaseeharan, B., Ramasamy, P., and Jeyachandran, S., 2023. Oral Vaccination for Sustainable Disease Prevention in Aquaculture—An Encapsulation Approach. *Aquaculture International*. 31, 867–891. DOI: 10.1007/s10499-022-01004-4.
 21. Rather, M.A., Agarwal, D., Bhat, T.A., Khan, I.A., Zafar, I., Kumar, S., Amin, A., Sundaray, J.K. and Qadri, T., 2023. Bioinformatics approaches and big data analytics opportunities in improving fisheries and aquaculture. *International Journal Biological Macromolecules*. 233, 123549. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123549.
 22. Robinson, N.A., Robledo, D., Sveen, L., Daniels, R.R., Krasnov, A., Coates, A., Jin, Y.H., Barrett, L.T., Lillehammer, M., and Kettunen, A.H., 2023. Applying genetic technologies to combat infectious diseases in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. 15, 491–535. Doi: 10.1111/raq.12733.
 - revolutionizing disease diagnosis and monitoring in aquatic animal health. *Reviews in Aquaculture*. early view. DOI: 10.1111/raq.12870.
 5. Depuydt, T., De Rybel, B., and Vandepoele, K., 2023. Charting plant gene functions in the multi-omics and single-cell era. *Trends in Plant Science*. 28, 283–296. DOI: 10.1016/j.tplants.2022.09.006.
 6. Du, Y., Hu, X., Miao, L., and Chen, J., 2022. Current Status and Development Prospects of Aquatic Vaccines. *Frontiers Immunology*. 13, 1040336. DOI: 10.3389/fimmu.2022.1040336.
 7. Fajardo, C., Martinez-Rodriguez, G., Costas, B., Mancera, J.M., Fernandez-Boo, S., Rodulfo, H., and De Donato, M., 2022. Shrimp Immune Response: A Transcriptomic Perspective. *Reviews in Aquaculture*. 14, 1136–1149. DOI: 10.1111/raq.12675.
 8. Hu, W., Wei, Y., Li, Z., Lin, G., Han, F., Hao, L., Wu, J., and Liu, X., 2022. Zhang, Y. Research Progress on Bacterial Ghosts as Novel Fishery Vaccines. *Aquaculture*, 548, 737526. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.737526.
 9. Islam, S.I., Mahfuj, S., Alam, M.A., Ara, Y., Sanjida, S., Mou, M.J., 2022. Immunoinformatic Approaches to Identify Immune Epitopes and Design an Epitope-Based Subunit Vaccine against Emerging Tilapia Lake Virus (TiLV). *Aquaculture Journal*. 2, 186–202. <https://doi.org/10.3390/aquacj2020010>.
 10. Jose Priya, T.A., and Kappalli, S., 2022. Modern Biotechnological Strategies for Vaccine Development in Aquaculture—Prospects and Challenges. *Vaccine*, 40, 5873–5881. Doi: 10.1016/j.vaccine.2022.08.075.
 11. Li, S., Li, X., Yuan, R.; Chen, X., Chen, S., Qiu, Y., Yang, Q., Wang, M., Shi, J., and Zhang, S., 2023. Development of a Recombinant Adenovirus-Vectored Vaccine against Both Infectious Hematopoietic Necrosis Virus and Infectious Pancreatic Necrosis Virus in Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*). *Fish Shellfish Immunol.* 132, 108457. Doi: 10.1016/j.fsi.2022.108457.
 12. Lu, H., Liao, Z., Sun, J., Yang, L., and Deng, H., 2025. Editorial: Molecular innate immunity in aquatic animals and their response to epidemic diseases. *Frontiers in Immunology*. 16:1608192. Doi: 10.3389/fimmu.1608192.
 13. Makesh, M., Rajendran, K.V., 2022. Methods of Vaccine Delivery. *Fish Immune System and Vaccines*. Eds.; Springer:

- Immunology. 11, 824. DOI: 10.3389/fimmu.2020.00824.
32. Yáñez, J.M., Barría, A., López, M.E., Moen, T., Garcia, B.F., Yoshida, G.M., and Xu, P., 2023. Genome-wide association and genomic selection in aquaculture. Rev. Aquac. 15, 645–675. DOI: 10.1111/raq.12750.
23. Stentiford, G.D., Bateman, I.J., Hinchliffe, S.J., Bass, D., Hartnell, R., Santos, E.M., Devlin, M.J., Feist, S.W., Taylor, N.G.H., and Verner-Jeffreys, D.W., 2020. Sustainable Aquaculture through the One Health Lens. Nataure Food, 1, 468–474. Doi: 10.1038/s43016-020-0127-5.
24. Tammas, I., Bitchava, K., and Gelasakis, A.I., 2024. Transforming Aquaculture through Vaccination: A Review on Recent Developments and Milestones. Vaccines, 12(7), 732. <https://doi.org/10.3390/vaccines12070732>.
25. Tian, H., Xing, J., Tang, X., Chi, H., Sheng, X., and Zhan, W., 2022. Cluster of Differentiation Antigens: Essential Roles in the Identification of Teleost Fish T Lymphocytes. Marine Life Science and Technology. 4, 303–316. DOI: 10.1007/s42995-022-00136-z.
26. Tosik, M., Tokarz-Deptula, B., and Deptula, W., 2021. Immunological Memory in Teleost Fish. Fish Shellfish Immunol. 115, 95–103. DOI: 10.1016/j.fsi.2021.03.025.
27. Van Sang, N., Dung, T.T.P., Phuong, V.H., Nguyen, N.H., and Thinh, N.H., 2023. Immune response of selective breeding striped catfish families (*Pangasiandon hypophthalmus*) to *Edwardsiella ictaluri* after challenge. Aquaculture, 572, 739515. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2023.739515.
28. Volpe, E., Errani, F., Mandrioli, L., and Ciulli, S., 2023. Advances in Viral Aquatic Animal Disease Knowledge: The Molecular Methods' Contribution. Biology (Basel). 12 (3): 466. Doi: 10.3390/biology12030466. PMID: 36979158; PMCID: PMC10045235.
29. Wang, J., Su, B., Bruce, T.J., Wise, A.L.; Zeng, P., Cao, G., Simora, R.M.C., Bern, L., Shang, M., Li, S., 2023. CRISPR/Cas9 microinjection of transgenic embryos enhances the dual-gene integration efficiency of antimicrobial peptide genes for bacterial resistance in channel catfish, *Ictalurus punctatus*. Aquaculture, 575, 739725. DOI:10.1016/j.aquaculture.2023.739725.
30. Wangkahart, E., Lee, P.-T., Chong, C.-M., and Yamamoto, F., 2023. 10 Safety and Efficacy of Vaccines in Aquaculture. In Fish Vaccines: Health Management for Sustainable Aquaculture; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, p. 155.
31. Wu, L., Qin, Z., Liu, H., Lin, L., Ye, J., and Li, J., 2020. Recent Advances on Phagocytic B Cells in Teleost Fish. Frontiers in