



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 (IFMRI), 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 نهاوندی^{۱*}، 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

چکیده:

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۴ تیر ۱۴۰۴
بازنگری: ۴ شهریور ۱۴۰۴
پذیرش: ۱۹ شهریور ۱۴۰۴
ارائه آنلاین: ۹ مهر ۱۴۰۴

کلمات کلیدی:

آبزی‌پروری
مقاومت به بیماری
ویرایش ژن
تعدیل ایمنی
بیوتکنولوژی مولکولی

بیماری‌های ناشی از عوامل بیماری‌زای ویروسی و باکتریایی چالش‌های عمده‌ای را برای آبزی‌پروری جهانی ایجاد کرده‌اند و تهدیدی برای بهره‌وری و پایداری این صنعت به شمار می‌روند. استراتژی‌های مرسوم مدیریت بیماری مانند واکسن‌ها و آنتی‌بیوتیک‌ها دارای محدودیت‌هایی نظیر ویژگی اختصاصی و توسعه مقاومت هستند. بیوتکنولوژی مولکولی ابزارهای انقلابی را برای افزایش مقاومت به بیماری در جانوران آبزی از طریق انتخاب ژنومی، ویرایش ژن و تعدیل مولکولی سیستم ایمنی فراهم آورده است. این مرور جامع به بررسی کاربرد بیوتکنولوژی مولکولی در بهبود دفاع ایمنی در برابر عفونت‌های ویروسی و باکتریایی در گونه‌های آبزی‌پروری 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 آبزی‌پروری دقیق مرور شده‌اند. چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده به منظور ارائه نقشه راهی برای مدیریت پایدار بیماری‌های آبزی‌پروری با استفاده از بیوتکنولوژی مولکولی برجسته شده‌اند.



برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

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 (In Persian)

مقدمه

آبزی‌پروری به‌عنوان 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 به‌طور 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، آبزی‌پروری به‌عنوان راه‌حلی کلیدی برای تأمین نیاز جهانی به منابع پروتئینی پایدار مطرح شده است. با این حال، فشرده‌گی و شدت بالای فعالیت‌های آبزی‌پروری

منجر به ظهور و گسترش بیماری‌های عفونی و به‌طور عمده ویروسی و باکتریایی شده است که تهدیدات قابل توجهی برای سلامت و بهره‌وری گونه‌های آبزی پرورشی به شمار می‌روند. بیماری‌های ویروسی و باکتریایی به‌عنوان عوامل اصلی زیان‌های اقتصادی در آبزی‌پروری شناخته شده‌اند و گونه‌های متنوعی از جمله میگو، سالمون، تیلاپیا و نرم‌تنان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از جمله عوامل ویروسی می‌توان به ویروس سندرم 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

^۲. Infectious Salmon Anemia Virus=ISAV

^۱. White Spot Syndrome Virus =WSSV

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Rezanahavandi91@gmail.com



کیفیت محصول را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند که در نهایت پایداری و سودآوری فعالیت‌های آبی‌پروری را به مخاطره می‌اندازد. استراتژی‌های سنتی کنترل بیماری در آبی‌پروری عمدتاً بر اقدامات زیست‌امنیتی، واکسیناسیون و استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها متکی است. اگرچه واکسیناسیون در مقابله با برخی عوامل باکتریایی و ویروسی مؤثر بوده است، کاربرد آن محدود به گونه و عوامل بیماری‌زای خاص است و پیچیدگی محیط آبی و مشکلات در ارائه واکسن آن را محدود می‌کند (Tammam et al., 2024). آنتی‌بیوتیک‌ها با وجود استفاده گسترده، خطر توسعه مقاومت دارویی، آلودگی محیطی و باقی‌ماندن مواد دارویی در محصولات دریایی را به همراه دارند که نگرانی‌های بهداشتی و زیست‌محیطی ایجاد می‌کنند. این محدودیت‌ها ضرورت جستجو و به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته‌تر، پایدارتر و مؤثرتر در مدیریت بیماری‌ها را ایجاد می‌کند. بیوتکنولوژی مولکولی به‌عنوان مسیر تحول‌آفرینی مطرح شده است که ابزارها و روش‌های نوینی را برای افزایش مقاومت به بیماری در سطوح ژنتیکی و مولکولی ارائه می‌دهد. ظهور فناوری‌های توالی‌یابی پرسرعت و تکنولوژی‌های اومیکس، امکان شناسایی جامع ژنوم‌ها، ترنسکرپتوم‌ها و پروتئوم‌های گونه‌های مختلف آبی‌پروری را فراهم نموده است و بینش‌های بی‌سابقه‌ای در خصوص تعاملات میزبان-پاتوژن و پایه‌های مولکولی ایمنی ایجاد کرده است. این بینش‌ها امکان شناسایی نشانگرهای ژنتیکی مرتبط با مقاومت به بیماری را فراهم آورده است که به نوبه خود برنامه‌های اصلاح نژاد انتخابی برای تولید جمعیت‌های مقاوم‌تر را هدایت می‌کند. مقدمه آبی‌پروری 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 آبی‌پروری به عنوان راه‌حلی کلیدی برای تأمین نیازهای جهانی به منابع پروتئینی پایدار مطرح شده است. با این وجود، شدت یافتن فعالیت‌های آبی‌پروری موجب ظهور و گسترش بیماری‌های عفونی، به ویژه ویروسی و باکتریایی،

شده است که تهدیدات قابل توجهی برای سلامت و تولید گونه‌های آبی‌پرورشی به شمار می‌آیند. بیماری‌های ویروسی و باکتریایی از جمله عوامل اصلی خسارت‌های اقتصادی در صنعت آبی‌پروری محسوب می‌شوند و گونه‌هایی مانند میگو، سالمون، تیلپیا و نرم‌تنان را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در میان این عوامل، بیماری‌های ویروسی مانند ویروس سندرم لکه سفید در میگو و ویروس آمیای عفونی در ماهی آزاد، به همراه باکتری‌هایی از جنس ویبریو، شیوع‌های مخریبه ایجاد کرده‌اند. این عوامل 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 آبی‌پروری را به چالش می‌کشند. روش‌های سنتی کنترل بیماری در آبی‌پروری و به طور عمده مبتنی بر اقدامات زیست‌امنیتی، واکسیناسیون و استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها هستند. اگرچه واکسیناسیون 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 گسترده از آنتی‌بیوتیک‌ها نیز خطر ایجاد مقاومت میکروبی، آلودگی 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 به‌کارگیری 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 ژنتیکی و مولکولی فراهم می‌آورد. فناوری‌های توالی‌یابی پیشرفته و تکنولوژی‌های اومیکس امکان شناسایی جامع ژنوم‌ها، ترنسکرپتوم‌ها و پروتئوم‌های گونه‌های آبی‌پروری را فراهم کرده است و بینش‌های عمیقی درباره تعاملات میزبان-پاتوژن و مبانی مولکولی سیستم ایمنی ارائه می‌دهند. این اطلاعات می‌توانند نشانگرهای ژنتیکی مرتبط با مقاومت به بیماری را شناسایی کرده و زمینه را برای برنامه‌های اصلاح نژاد انتخابی به منظور تولید جمعیت‌های مقاوم‌تر فراهم کنند. علاوه بر این، فناوری‌های دقیق ویرایش ژنوم، به‌ویژه سیستم‌های CRISPR/Cas، انقلابی در امکان تغییرات ژنتیکی هدفمند ایجاد کرده‌اند که امکان توسعه گونه‌های مقاوم به بیماری

ساختار ژنتیکی، عملکردهای فیزیولوژیک و مکانیزم‌های ایمنی موجودات آبی 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 تحول‌آفرین بیوتکنولوژی مولکولی که در آبی‌پروری به کار می‌روند، می‌توان به ژنومیکس، ترنسکریپتومیکس، پروتئومیکس، ویرایش ژن و تشخیص‌های مولکولی اشاره کرد. ژنومیکس به توالی‌یابی، تحلیل و دستکاری کل محتوای ژنتیکی (ژنوم) گونه‌های آبی 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 آبی‌پروری 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 آبی‌پروری را بدون وارد کردن DNA خارجی فراهم می‌سازد. این رویکرد در کنار مداخلات مولکولی دیگر مانند مداخله^۳ RNA استراتژی‌های تعدیل ایمنی مولکولی همچون پپتیدهای ضد میکروبی^۴، جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای برای روش‌های سنتی کنترل بیماری ارائه می‌دهد. به‌عنوان مثال، پپتیدهای ضد میکروبی نقش حیاتی در ایمنی ذاتی ایفا می‌کنند و با نشان دادن فعالیت‌های ضد میکروبی گسترده، امکان افزایش یا مهندسی بیان آن‌ها در گونه‌های پرورشی به منظور ارتقاء مقاومت به بیماری وجود دارد. علاوه بر مداخلات ژنتیکی و مولکولی، بیوتکنولوژی مولکولی به توسعه ابزارهای تشخیصی پیشرفته و پی‌گیری ایمنی کمک می‌کند که امکان تشخیص زودهنگام عوامل بیماری‌زا و بهبود اثربخشی واکسن‌ها را فراهم می‌آورد. ادغام این فناوری‌ها با تکنولوژی‌های آبی‌پروری 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، به‌کارگیری بیوتکنولوژی مولکولی در آبی‌پروری با چالش‌هایی از جمله پیچیدگی تعاملات میزبان-پاتوژن، چارچوب‌های قانونی، مسائل اخلاقی و نیاز به فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه 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 روشن کردن وضعیت کنونی کاربرد بیوتکنولوژی مولکولی در تقویت مقاومت ایمنی جانوران آبی در برابر بیماری‌های ویروسی و باکتریایی، ابزارهای کلیدی مولکولی، مکانیزم‌های ایمنی، مطالعات موردی ویژه گونه‌ها و چشم‌اندازهای آینده را برجسته کرده است و نقش حیاتی بیوتکنولوژی مولکولی در تحول مدیریت بیماری‌های آبی‌پروری به سوی پایداری و امنیت غذایی را نشان می‌دهد. بیوتکنولوژی مولکولی بیوتکنولوژی مولکولی شامل مجموعه‌ای گسترده از تکنیک‌های پیشرفته است که با دستکاری مولکول‌های زیستی در سطوح ژنتیکی و سلولی به منظور بهبود بهره‌وری و پایداری آبی‌پروری به کار گرفته می‌شود. این روش‌ها امکان درک دقیق و اصلاح

^۴. Antimicrobial peptides = AMPs

^۳. RNA interference = RNAi

ترنسکریپتومیکس و ایمنوژنومیکس

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 آبی‌پروری 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 آبی 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، شناسایی کنند. در گونه‌های آبی 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^۷ و زیرگروه آنها کموکین‌ها^۸، پپتیدهای ضد میکروبی و اجزای سیستم مکمل و انعقادی است. به عنوان مثال، ترنسکریپتوم میگوهای آلوده به ویروس سندرم 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 برنامه ریزی و کنترل شده سلول‌ها^۹ را برجسته می‌سازد که برای محدود کردن تکثیر ویروس حیاتی هستند. مطالعات مقایسه‌ای ترنسکریپتومی بین ژنوتیپ‌های مقاوم و حساس به شناسایی 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 آبی‌پروری 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، برنامه‌های اصلاح نژاد 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 اجزای سیستم ایمنی هستند که به افزایش نرخ بقا در زمان شیوع بیماری‌ها می‌انجامد. واکسن‌های مولکولی که با استفاده از اطلاعات ژنومی و فناوری‌های DNA نو ترکیب 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 زیست‌مهندسی شده غنی شده با مواد مغذی ضروری و بهینه‌شده برای گونه‌های خاص نقش دارد. چالش‌ها و فرصت‌ها با وجود پیشرفت سریع به‌کارگیری بیوتکنولوژی مولکولی در آبی‌پروری، این حوزه با چالش‌هایی نظیر پیچیدگی‌های ژنتیکی صفات، موانع قانونی، مسائل مربوط به ادراک عمومی و مباحث اخلاقی در خصوص اصلاحات ژنتیکی مواجه است. با این حال، پیشرفت‌های مداوم فناوری، کاهش هزینه‌های توالی‌یابی و ویرایش ژن و افزایش تقاضای جهانی برای غذای دریایی پایدار، توسعه و ادغام بیوتکنولوژی مولکولی در آبی‌پروری را تقویت می‌کنند. پژوهش‌های بین‌رشته‌ای مشارکتی که زیست‌شناسی مولکولی، علوم آبی‌پروری، 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 آبی‌پروری به سیستمی پیشرفته، 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)

^۸. Chemokines

^۹. Apoptosis

^۵. RNA-seq

^۶. Pattern Recognition Receptors =PRRs

^۷. Cytokines

شنا سایی کنند. در گونه‌های آبی 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، پپتیدهای ضد میکروبی و اجزای سیستم مکمل و انعقادی است. به عنوان مثال، ترنسکریپتوم میگوهای آلوده به ویروس سندرم 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. به‌طور مشابه، پروفایل‌های ترنسکریپتومی آزادماهیان پس از مواجهه با ویروس آمیای عفونی ماهی آزاد فعال‌سازی مسیرهای اینترفرونی و ژن‌های مرتبط با مرگ برنامه ریزی شده را برجسته می‌سازد که برای محدود کردن تکثیر ویروس حیاتی هستند. مطالعات مقایسه‌ای ترنسکریپتومی بین ژنوتیپ‌های 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 این‌چنینی برای برنامه‌های اصلاح نژاد مبتنی بر نشانگر و ژنومیک جهت پرورش افراد با مقاومت برتر به بیماری اهمیت حیاتی دارند. ایمونوژنومیکس، مطالعه پایه ژنتیکی و تنوع ژن‌های سیستم ایمنی، مکمل ترنسکریپتومیکس است که به شناسایی خانواده‌های ژنی دخیل در دفاع میزبان می‌پردازد (Nguyen, 2024). گونه‌های آبی دارای مجموعه‌ای از گیرنده‌های شناسایی الگو شامل گیرنده‌های شبیه Toll، گیرنده‌های شبیه ناحیه الیگومریزاسیون اتصال‌یافته به نوکلئوتید و گیرنده‌های شبیه ژن القاشونده توسط اسید رتینوئیک هستند که همگی برای شناسایی عوامل بیماری‌زا و فعال‌سازی ایمنی اهمیت دارند. تحلیل‌های ژنومی و ترنسکریپتومی نشان داده‌اند که

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 این‌چنینی برای برنامه‌های انتخاب ژنتیکی مبتنی بر نشانگر و ژنومیک جهت پرورش افراد با مقاومت برتر به بیماری اهمیت حیاتی دارند. ایمونوژنومیکس، مطالعه پایه ژنتیکی و تنوع ژن‌های سیستم ایمنی، مکمل ترنسکریپتومیکس است که به شناسایی خانواده‌های ژنی دخیل در دفاع میزبان می‌پردازد. گونه‌های آبی دارای مجموعه‌ای از گیرنده‌های شناسایی الگو شامل گیرنده‌های مشابه Toll، گیرنده‌های مشابه ناحیه الیگومریزاسیون اتصال‌یافته 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 نژادی 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 آلی تفاوت دارند که نقش آن‌ها به عنوان تعدیل‌کننده‌های کلیدی ایمنی را برجسته می‌سازد. ترنسکریپتومیکس و ایمونوژنومیکس 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 آبی‌پروری 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 آبی 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 ادامه، ترنسکریپتومیکس و ایمونونومیکس بسترهای قدرتمند و مکملی برای رمزگشایی پایه مولکولی مقاومت ایمنی در گونه‌های آبی فراهم می‌آورند. این فناوری‌ها زیربنای استراتژی‌های اصلاح نژاد پیشرفته، مطالعات عملکردی و نوآوری‌های درمانی هستند و بیوتکنولوژی مولکولی را در صف مقدم مدیریت پایدار بیماری‌ها در آبی‌پروری 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 کریسپر (کلاس‌ترهای منظم تکراری کوتاه پالیندرومیک بین‌فاصله‌دار) و Cas (پروتئین‌های مرتبط با کریسپر) به دلیل سادگی، کارایی، تطبیق‌پذیری و مقرون‌به‌صرفه بودن، انقلابی در مهندسی ژنتیک ایجاد کرده است. از زمان اتخاذ این فناوری برای ویرایش ژنوم، CRISPR/Cas افق‌های تازه‌ای در آبی‌پروری گشوده است که امکان دستکاری دقیق ژن‌های مرتبط با مقاومت به بیماری، رشد، تولیدمثل و دیگر صفات اقتصادی مهم را فراهم می‌کند. سیستم‌های CRISPR/Cas با هدایت RNA تک‌راهنما^{۲۰} عمل می‌کنند که نوکلئاز Cas را به توالی خاصی از DNA که مکمل sgRNA است هدایت می‌کند، جایی که پروتئین Cas باعث ایجاد شکست دو رشته‌ای در DNA می‌شود (Tian et al., 2022). سپس این شکست توسط مکانیزم‌های طبیعی ترمیم سلول، عمدتاً 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 آبی‌پروری، شیوع بیماری‌های ناشی از عوامل ویروسی و باکتریایی تهدیدی مداوم برای 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 تنوع آلی تفاوت دارند که نقش آن‌ها به عنوان تعدیل‌کننده‌های کلیدی ایمنی را برجسته 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؛ به‌طوری که هم به عنوان گیرنده‌های تسهیل‌کننده اتصال عوامل بیماری‌زا عمل می‌کنند و هم در سیگنال‌دهی ایمنی مشارکت دارند. تلفیق داده‌های بیان ژن با تغییرات ژنوتیپی از طریق نقشه برداری محل‌های کمیت بیان صفی^{۱۸} و مطالعات ارتباط ژنومی گسترده^{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 کریسپر 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 پیشرفته توالی‌یابی 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 آبی‌پروری به شدت وابسته به انتقال مؤثر اجزای کریسپر به درون سلول‌ها یا جنین‌های هدف است. روش‌هایی مانند ریزتزریق^{۲۹}، الکتروپوراسیون^{۳۰}، استفاده از حامل‌های ویروسی و انتقال واسطه‌گری شده توسط نانوذرات در گونه‌های مختلف با موفقیت‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ریزتزریق به داخل زیگوت‌ها^{۳۱} همچنان روش یکی از تکنیک‌های متداول برای ایجاد ویرایش‌های ژنومی در خط تولید مثلی است، در حالی که سیستم‌های انتقال نوین برای ویرایش‌های سلول‌های غیرزایای سوماتیک^{۳۲} و کاربردهای درمانی احتمالی در حال توسعه هستند. ابزارهای بیوانفورماتیک نقش حیاتی در طراحی sgRNA های مؤثر با حداقل اثرات خارج از هدف ایفا می‌کنند. پیشرفت‌های صورت گرفته 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 تحول‌آفرین، به‌کارگیری CRISPR/Cas در آبی‌پروری تحت نظارت‌ها 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 آبی‌پروری

فرصت بی‌سابقه‌ای برای تقویت پاسخ‌های ایمنی ذاتی و اکتسابی با هدف‌گذاری ژن‌های حساسیت‌زا یا وارد کردن آلل‌های 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 سندرم لکه سفید در میگو، ویروس آمیای عفونی و عفونت‌های باکتریایی مانند یک باکتری گرم منفی به نام ادواردسیلا اکتالوری^{۲۳} در گربه ماهی ماهی کانال^{۲۴} می‌گردد. پژوهشگران از ویرایش ژنوم مبتنی بر CRISPR/Cas9 برای وارد کردن ژن‌های پپتید ضد میکروبی مانند ژن کاتلیپ‌سیدین^{۲۵} تمساح 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، هوازی و میله‌ای شکل به نام فلاوباکتریوم کولومنا^{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. ایمنی هدایت شده توسط RNA و استراتژی‌های ضدانگلی مطالعات اخیر کاربرد های 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 ایمنی 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 پروتوزوایی، فناوری کریسپر برای اختلال انتخابی در ژنوم انگل‌ها به کار رفته است (Abós et al., 2022). به طور خاص، sgRNA هایی که توالی‌های RNA ریبوزومی گونه‌های مژک‌دار تک سلولی شیلودونلا^{۲۸}، از انگل‌های بزرگ پوستی در

²⁹. Microinjection

³⁰. Electroporation

³¹. Zygotes

³². Somatic

³³. Genetically Modified Organism=GMO

²³. *Edwardsiella ictaluri*

²⁴. *Ictalurus punctatus*

²⁵. Cathelicidin

²⁶. *Flavobacterium columnare*

²⁷. Nervous Necrosis Virus =NNV

²⁸. *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 منفذ و در نهایت مرگ عوامل بیماری‌زا می‌شود. مهم‌تر آنکه، پپتیدهای ضد میکروبی به‌طور 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، پپتیدهایی مانند پسیدین‌ها^{۳۵}، هپسیدین‌ها^{۳۶}، دفن‌سین‌ها^{۳۷} و کاتلی‌سیدین‌ها^{۳۸} شناسایی و به‌طور گسترده مطالعه شده‌اند (Radhakrishnan et al., 2023). این پپتیدها در سلول‌های ایمنی مختلف و سطوح مخاطی از جمله موکوس پوست، آبشش‌ها و روده تولید می‌شوند که خط مقدم دفاع در برابر عوامل بیماری‌زا را تشکیل می‌دهند. پسیدین‌ها که منحصراً در ماهیان یافت می‌شوند، خواص قوی ضد ویروسی، ضد باکتریایی و ضد انگلی دارند و به دلیل پایداری حرارتی بالا، تحمل نمک و سمیت سلولی پایین، برای کاربردهای آبی‌پروری بسیار مناسب‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که پپتیدهای ضد میکروبی 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 فاگوسیتوز تعدیل می‌کنند. هپ‌سیدین‌ها علاوه بر نقش ضد میکروبی، تنظیم‌کننده فرآیند هومئوستازی 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 آبی‌پروری که ناشی از مصرف بیش از حد و غالباً بدون کنترل آنتی‌بیوتیک‌ها است، اهمیت حیاتی پپتیدهای ضد میکروبی را به عنوان جایگزین‌های آنتی‌بیوتیک برجسته می‌کند. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که افزایش بیان ژن این پپتیدها یا بیان تراریخته آن در ماهیان می‌تواند بار باکتریایی و مرگ و میر را به طور قابل توجهی کاهش دهد. علاوه بر این، به کارگیری پپتیدهای ضد میکروبی سنتزی یا نو ترکیب در خوراک یا به عنوان تقویت‌کننده واکسن، تحریک ایمنی و مقاومت به بیماری را تقویت می‌کند. با وجود این ویژگی‌های امیدبخش، این پپتیدهای طبیعی گاه محدودیت‌هایی مانند

امیدوارکننده است و پژوهش‌های جاری در راستای توسعه اهداف ژنی گسترده‌تر، بهبود روش‌های انتقال و ادغام داده‌های چند اومیکس برای شناسایی بهینه‌ترین ویرایش‌ها به منظور مقاومت در برابر بیماری‌ها صورت می‌گیرد. ترکیب کریسپر با اصلاح نژاد انتخابی و دیگر فناوری‌های مولکولی، توسعه گونه‌های مقاوم به آبی‌پروری را تسریع 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 جهش‌های 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 آبی‌پروری را داراست. پیشرفت مسئولانه همراه با مسیرهای قانونی شفاف و چارچوب‌های اخلاقی برای تبدیل این نوآوری‌های تکنولوژیک به شیوه‌های پایدار آبی‌پروری حیاتی خواهد بود (Depuydt et al., 2023).

پپتیدهای ضد میکروبی و مداخله RNA

چالش‌های رو به افزایش ناشی از شیوع بیماری‌ها در آبی‌پروری، همراه با نگرانی‌ها در مورد مقاومت به آنتی‌بیوتیک‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی، تحقیق درباره جایگزین‌های نوین و پایدار برای مدیریت بیماری‌ها را تسریع بخشیده است. از جمله رویکردهای بسیار امیدبخش، استفاده از پپتیدهای 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. پپتیدهای 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 آبی، ایفای نقش می‌کنند. این پپتیدها که با بار مثبت و ساختار آمفی‌پاتیک^{۴۰} خود شناخته می‌شوند، فعالیت ضد میکروبی گسترده‌ای علیه باکتری‌های

³⁷ . Defensins

³⁸ . Cathelicidins

³⁹ . Iron Homeostasis

³⁴ . Amphipathic structure

³⁵ . Piperidines

³⁶ . Hepcidins

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 آبی‌پروری، 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. RNAهای مداخله‌گر کوچک^{۴۱} یا RNAهای کوتاه حلقه‌دار^{۴۲} 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 می‌بخشند. رویکردهای RNAهای مداخله‌گر کوچک همچنین به عوامل بیماری‌زای باکتریایی و آلودگی‌های انگل‌ها توسعه یافته‌اند، جایی که خاموش‌سازی ژن مکانیزم‌های کلیدی ویروانس یا بقای آن‌ها را مختل می‌کند. انتقال مولکول‌های RNAهای مداخله‌گر کوچک همچنان چالشی فنی است و استراتژی‌هایی مانند تزریق، مصرف خوراکی از طریق خوراک و کپسوله‌سازی با نانوذرات در تحقیقات فعال برای کاربرد عملی در آبی‌پروری بررسی می‌شوند. پیشرفت‌ها در طراحی حامل‌های ویروسی و زیست‌شناسی مصنوعی به منظور افزایش پایداری و کارایی هدف‌گیری آن در حال انجام است. علاوه بر مهار مستقیم عوامل بیماری‌زا، خاموش‌سازی ژن مبتنی بر RNAهای 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 هم‌افزا و کاربردهای آینده ترکیب پپتیدهای ضد میکروبی و RNAهای مداخله‌گر کوچک، رویکردی چندجانبه برای مدیریت بیماری‌های آبی‌پروری ارائه می‌دهد (Mondal and Thomas, 2022). پپتیدهای ضد میکروبی به طور فوری مهار گسترده‌ای بر عوامل بیماری‌زا و تحریک ایمنی

فراهم می‌کنند، در حالی که RNAهای 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 پپتیدهای ضد میکروبی یا مسیرهای RNAهای مداخله‌گر کوچک را برای افزایش اثربخشی و دوام بهینه‌سازی کند. مکانیزم‌های ایمنی در گونه‌های آبی و تعدیل مولکولی سیستم ایمنی گونه‌های آبی 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 آبی، 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 آبی‌پروری بهبود می‌بخشند، ضروری است. سیستم ایمنی ذاتی ایمنی ذاتی اولین و فوری‌ترین خط دفاعی در گونه‌های آبی 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 آبی به دلیل مواجهه مداوم با عوامل بیماری‌زای متنوع و فراوان در آب اهمیت ویژه‌ای دارد (Mokhtar et al., 2023). اجزای ایمنی ذاتی در ماهیان و سایر جانوران آبی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

موانع فیزیکی: سطوح مخاطی مانند پوست، آبشش‌ها 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 لیزوزیم‌ها و لکترین‌ها است (Muñoz-Atienza et al., 2021).

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

^{۴۱} . Short hairpin RNAs=shRNA

^{۴۲} . Small interfering RNAs=siRNA

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

راهبرد های بیوتکنولوژی یک برای ارتقای مهارت ایمنی شامل موارد زیر است:

- افزایش بیان گیرنده های شناسایی الگو و سایتوکین‌ها برای تقویت شناسایی عوامل بیماری‌زا و پاسخ‌های التهابی
 - مهندسی پپتیدهای ضد میکروبی با کارایی و پایداری برتر
 - اصلاح ژن‌های دخیل در پردازش و ارائه آنتی‌ژن برای بهبود فعال‌سازی ایمنی تطبیقی
 - استفاده از تقویت‌کننده‌های ایمنی و نگهدارنده‌های واکسن مبتنی بر مسیرهای مولکولی ایمنی
- علاوه بر این، تغییرات اپیژنتیک مانند متیلاسیون DNA و تغییرات هیستونی نیز در تنظیم بیان ژن‌های ایمنی و ایمنی آموزش‌دیده نقش دارند و اهداف جدیدی برای مداخلات فراهم می‌آورند. گریز ایمنی و تعاملات میزبان-پاتوژن عوامل بیماری‌زای موفق مکانیزم‌هایی برای فرار یا سرکوب پاسخ‌های ایمنی 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 RIG-I مانند می‌شوند و الگوهای مولکولی مرتبط با عوامل بیماری‌زا^{۴۴} همچون لیپوپلی‌ساکاریدهای باکتریایی و RNA ویروسی را شناسایی می‌کنند. پس از شناسایی، گیرنده‌های شناسایی الگو، مسیرهای سیگنال‌دهی داخل‌سلولی را فعال کرده که به پاسخ‌های التهابی و تولید مولکول‌های ضد میکروبی منجر می‌شود.

عوامل هومورال^{۴۵}: سیستم کمپلمان، لیزوزیم‌ها، پروتئین‌های فاز حاد و پپتیدهای ضد میکروبی بخش‌های محلول ایمنی ذاتی را تشکیل می‌دهند. این عوامل در مایعات بدن گردش کرده و در اوپسونیزاسیون، لیز مستقیم عوامل بیماری‌زا و تنظیم عملکرد سلول‌های ایمنی نقش دارند. مطالعات روی ماهیان استخوانی نشان داده‌اند که ماکروفاژها و سلول‌های دندریتیک به عنوان سلول‌های ارائه‌دهنده حرفه‌ای آنتی‌ژن^{۴۶} عمل می‌کنند و ایمنی ذاتی و تطبیقی را به هم پیوند می‌دهند. سلول‌های B در ماهیان نیز علاوه بر نقش خود در ایمنی تطبیقی، ویژگی‌های شبیه ایمنی ذاتی دارند و در فاگوسیتوز و ترشح سایتوکین‌ها مشارکت می‌کنند. گونه‌های بی‌مهره آبی مانند نرم‌تنان و سخت‌پوستان که فاقد سیستم ایمنی تطبیقی کلاسیک هستند، پاسخ‌های ایمنی ذاتی تقویت‌شده‌ای را نشان می‌دهند که به آن ایمنی آموزش‌دیده گفته می‌شود. این پدیده مشابه حافظه ایمنی است که به کمک تغییرات اپیژنتیک و بازبرنامهریزی متابولیک سلول‌های ایمنی ذاتی، باعث پاسخ شدیدتری در مواجهات بعدی با عوامل بیماری‌زا می‌شود. سیستم ایمنی تطبیقی سیستم ایمنی تطبیقی که در مهره‌داران فکی از جمله ماهیان استخوانی وجود دارد، حفاظت اختصاصی و طولانی‌مدتی را نسبت به آنتی‌ژن‌ها فراهم می‌آورد. این سیستم عمده‌تاً شامل لنفوسیت‌ها، 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 ایمنی 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 تک‌نوکلئوتید پلی‌مورفیسم^{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 تحریک‌کننده سیستم ایمنی بدن^{۵۳} همراه با دانش ژنومی در باره مسیرهای ایمنی، به برنامه‌های مؤثر کنترل بیماری کمک شایان توجهی کرده‌اند. داده‌های ترنسکریپتومیک، راهنمای توسعه واکسن با شناسایی پروتئین‌ها و مسیرهای ایمنی‌زای فعال شده در طول عفونت‌های طبیعی هستند. (Li et al., 2023)

تیلپیا و کپور

تیلپیا و کپور ماهیان گونه‌های غالب در سیستم‌های آبی‌پروری 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 تیلپیا^{۵۵} می‌باشد (Islam et al., 2022). فناوری CRISPR/Cas9 با موفقیت در تیلپیا به منظور اصلاح ژن‌های مرتبط با رشد، باروری و رنگدانه‌ها به کار رفته است. اخیراً، ویرایش ژن هدفمند بر روی ژن تنظیم‌کننده رشد عضلانی میوستانین^{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 دارند. 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 عمده آبی‌پروری

کاربرد زیست‌فناوری مولکولی در آبی‌پروری 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، ترنسکریپتومیکس و ایمونومدولاتورهای مولکولی^{۴۸}، برای افزایش مقاومت در برابر بیماری‌ها، بهبود نرخ رشد، کنترل تولیدمثل و بهینه‌سازی سایر صفات دارای ارزش تجاری به کار گرفته شده‌اند. در این بخش، مطالعات موردی نشان‌دهنده ادغام این فناوری‌ها در گونه‌های کلیدی آبی‌پروری مرور می‌شود:

میگو

میگو با چالش‌های جدی از جمله بیماری‌های ویروسی، به ویژه ویروس سندرم 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 ترنسکریپتومیک شبکه‌های ژنی ایمنی فعال شده در پاسخ به ویروس سندرم لکه سفید را شناسایی کرده‌اند، از جمله پپتیدهای ضد میکروبی و مولکول‌های سیگنال‌دهنده که راهنمایی برای استراتژی‌های انتخاب گزینه‌های فراهم می‌کنند. کاربردهای ویرایش ژن علیرغم دشواری‌های مرتبط با لقاح داخلی و دستکاری رویان در سخت‌پوستان در حال گسترش است. پژوهش‌های فعال بر روی حذف ژن‌های مستعد و تعدیل عوامل مؤثر در ایمنی مانند پپتیدهای ضد میکروبی با فناوری CRISPR-Cas9

⁵³ . Immunostimulants

⁵⁴ . Streptococcus

⁵⁵ . Tilapia Lake Virus=TiLV

⁵⁶ . 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، فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای بهینه‌سازی روش‌های پرورش، ارتقای نظارت بر بیماری‌ها و امکان مداخله زودهنگام فراهم می‌آورد که در نهایت منجر به سیستم‌های آبی‌پروری پایدارتر خواهد شد.

رویکردهای آبی‌پروری دقیق

آبی‌پروری دقیق از مجموعه‌ای از فناوری‌ها شامل دوربین‌های زیرآبی، بیوسنسورها، حسگرهای کیفیت آب و سیستم‌های تغذیه خودکار استفاده می‌کند که به طور جمعی داده‌های حجیمی را از وضعیت فیزیولوژیک حیوانات آبی 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 غیرتهاجمی 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 آبی‌پروری دقیق و مطالعات زیست‌فناوری مولکولی ایفا می‌کند. داده‌های اُمیکس (ژنومیکس، ترنسکریپتومیکس، پروتئومیکس، متابولومیکس) ذاتاً پیچیده و چندبعدی هستند و نیازمند ابزارهای محاسباتی پیشرفته برای پردازش، تحلیل و تجسم می‌باشند (Rather et al., 2023).

کاربردهای بیوانفورماتیک عبارتند از:

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

صدف‌ها

صدف‌هایی مانند صدف خوراکی و نرم تنان، بخش قابل توجهی از آبی‌پروری جهانی را تشکیل می‌دهند، اما به طور عمده به دلیل فقدان سیستم ایمنی تطبیقی کلاسیک، مبتنی بر ایمنی ذاتی هستند. تکنیک‌های ژنومی و ترنسکریپتومیک، امکان اصلاح انتخابی گونه‌های صدف مقاوم به عوامل بیماری‌زای ویروسی مانند هرپس ویروس 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.

گره ماهیان و سایر گونه‌ها

گره ماهی کانالی، گونه‌ای پاره‌ای در آبی‌پروری آمریکای شمالی، توسط فناوری کریسپر، اصلاح ژنتیکی شده است تا ژن‌های مستعد را حذف و پپتیدهای 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 مذاکای 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 آبی‌پروری دقیق و بیوانفورماتیک

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

⁶⁰. Olive flounder=*Paralichthys olivaceus*

⁶¹. Environmental DNA =eDNA

⁵⁷. Ostreid HerpesVirus 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 ردیابی و صدور گواهی: اثرانگشت مولکولی و ثبت دیجیتال سوابع، ردیابی قوی محصولات آبی‌پروری را فراهم آورده و فرآیندهای صدور گواهی و اعتماد مصرف‌کننده را تسهیل می‌کنند (Volpe et al., 2023).

چالش‌ها و مسیرهای آینده

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

ملاحظات زیست‌محیطی و بوم‌شناختی

ارگانسیم‌های ویرایش‌شده ژنتیکی که به طور عمدی یا تصادفی به اکوسیستم‌های طبیعی رها شوند، ممکن است پیامدهای بوم‌شناختی 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 پیش‌بینی‌کننده برای ارزیابی جریان ژن، اثرات بر تناسب زیستی و تأثیرات اکوسیستمی پیش از تصویب گونه‌های آبی‌پروری ویرایش‌شده ژنتیکی است. استراتژی‌های مهار و تضمین‌های ژنتیکی مانند سیستم‌های انتقال ژن با مکانیسم بازگشت داخلی در حال

انتخاب ژنومی و اصلاح نژاد: مدل‌سازی‌های 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 تسریع 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 مسیرها: نقشه برداری از شبکه‌های تعامل ژنی و مسیرهای ایمنی، گره‌های کلیدی تنظیمی را آشکار می‌کند که می‌توان آن‌ها را برای بهبود ژنتیکی یا مداخلات درمانی هدف قرار داد.

مدلسازی تعامل میزبان-پاتوژن-محیط: بیوانفورماتیک با ادغام داده‌های چند-امیکس 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، آبی‌پروری دقیق و زیست‌اطلاعات مزایای عملی متعددی را ارائه می‌دهد:

پیش‌بینی و پیشگیری بهبود یافته بیماری: نظارت در زمان واقعی سلامت همراه با نشانگرهای مولکولی، امکان پیش‌بینی زودهنگام و دقیق‌تر 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 ذخیره، از تغذیه هدفمند، استراتژی‌های واکسیناسیون و اصلاح نژاد گزینشی متناسب با شرایط خاص مزرعه و فشارهای عوامل بیماری‌زا 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

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

نتیجه‌گیری

زیست‌فناوری مولکولی به عنوان نیروی تحول‌آفرین در آبی‌پروری ظاهر شده است که نحوه مقابله با مقاومت در برابر بیماری‌ها، عملکرد رشد و پایداری در گونه‌های آبی پرورشی را دگرگون ساخته است. رشد سریع صنعت جهانی آبی‌پروری 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 پیشرفته ژنتیکی و مولکولی، از جمله ژنومیکس، ترنسکریپتومیکس، فناوری‌های ویرایش ژن مانند CRISPR/Cas، پپتیدهای ضد میکروبی و مداخله RNA فرصت‌های بی‌سابقه‌ای را برای ارتقای توان ایمنی، بهینه‌سازی صفات تولیدی و کاهش وابستگی به آنتی‌بیوتیک‌ها و مواد شیمیایی فراهم کرده است. انتخاب ژنومی و توالی‌یابی کامل ژنوم امکان شناسایی واریانت‌های ژنتیکی مرتبط با مقاومت به بیماری، رشد و سازگاری محیطی را فراهم آورده است و برنامه‌های اصلاح نژاد دقیق متناسب با فشارهای خاص عوامل بیماری‌زا و شرایط تولید را تسهیل می‌کند. ترنسکریپتومیکس و ایمنوژنتیک بینش‌های عمیقی در باره تعاملات میزبان-پاتوژن و دینامیک سیستم ایمنی ارائه داده است و توسعه واکسن‌ها، ایمونواسیتمولان‌ها 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 ویروسی و باکتریایی است که روش‌های انتخاب سنتی را تکمیل می‌کند. در کنار زیست‌فناوری مولکولی، ظهور آبی‌پروری 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 پیشرفته چالش‌های قابل توجهی از جمله موانع فنی در ویرایش

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 مداوم و نوآوری‌ها، روند تحول آبی‌پروری 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 آبی‌پروری تضمین گردد. در پایان، زیست‌فناوری مولکولی فصلی نو در آبی‌پروری را رقم می‌زند، آینده‌ای که در آن گونه‌های آبی 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

Singapore, pp. 217–230. ISBN 978-981-19126-8-9.

14. Mokhtar, D.M., Zacccone, 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., Rodolfo, 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. *Nature Food*, 1, 468–474. Doi: 10.1038/s43016-020-0127-5.

24. Tamas, 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-Deptuła, B., and Deptuła, 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. 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*