International Journal of Biotechnology and Advanced Research

Int. J. Biotech. Adv. Res., 1(1) (2025) 1-17

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/

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

نشریه بین‌المللی بیوتکنولوژی و پژوهش‌های پیشرفته

نشریه بین‌المللی بیوتکنولوژی و پژوهش‌های پیشرفته، دوره ۱، شماره ۱، سال ۱۴۰۴، صفحات ۱-۱۷

INJBR
INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY AND ADVANCED RESEARCH

نقش زیســـت‌فناوری مولکولی در افزایش مقاومت ایمنی گونه‌های آبزی در برابر بیماری‌های ویرو سی 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:

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 .

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

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 بـه‌عنوان یکی از اجزای حیـاتی امنیـت غذایی جهانی و توسـعه اقتصـادی، در دهه‌های اخیر رشـد سـریعی داشـته و به یکی از سـریع‌ترین 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 وحشـی به دلیل صـید بی‌رویه و تخریب محیط زیسـت نشـأت می‌گیرد. در نتیجه، آبزی‌پروری به‌عنوان راه‌حلی کلیدی برای تأمین نیاز جهانی به منابع پروتئینی پایدار مطرح شـده اسـت. با این حال، فشردگی و شدت بالای فعالیت‌های آبزی‌پروری منجر به ظهور و گسـترش بیماری‌های عفونی و به طور عمده ویروسـی و باکتریایی شـده اسـت که تهدیدات قابل توجهی برای سلامت و بهره‌وری گونه‌های آبزی پرورشی به شـمار می‌روند. بیماری‌های ویروسـی و باکتریایی به‌عنوان عوامل اصـلی زیان‌های اقتصـادی در آبزی‌پروری شـناخته 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 سـالمون عفونی[۲] در سـالمون، و همچنین باکتری‌های جنس ویبریو اشـاره کرد که باعث شـیوع‌های ویرانگر شـده‌اند. این عوامل عفونی نه تنها نرخ‌های بقا را کاهش می‌دهند بلکه عملکرد رشد، موفقیت تولیدمثل و

[1] . White Spot Syndrome Virus =WSSV

[2] . Infectious Salmon Anemia Virus=ISAV

* نویسنده عهدار مکاتبات: Rezanahavandi91@gmail.com

حقوق مولفین به نویسـندگان و حقوق ناشـر به انتشـارات موج سـبز داده شـده اسـت. این مقاله تحت لیسـانس آفرینندگی مردمی(Dreative Commons License)در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ دیدن فرمائید.

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

کیفیت محصـول را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند که در نهایت پایداری و ســـودآوری فعالیت‌های آبزی‌پروری را به مخاطره می‌اندازد. ا ستراتژی‌های سنتی کنترل بیماری در آبزی‌پروری عمدتاً بر اقدامات زیست‌امنیتی، واکسیناسیون و اســـتفـاده از آنتی‌بیوتیـک‌هـا متکی اســـت. اگرچـه واکســـیناســـیون در مقابله با برخی عوامل باکتریایی و ویروســـی مؤثر بوده اســـت ، کاربرد آن محدود به گونه و عوامل بیماریزای خاص اســـت و پیچیدگی محیط آبی و م شکلات در ارائه واک سن آن را محدود می‌کند (Tammas *et al.*, 2024). آنتی‌بیوتیک‌ها با وجود اســـتفاده گســـترده، خطر توسعه مقاومت دارویی، آلودگی محیطی و باقی‌ماندن مواد دارویی در محصـــولات دریایی را به همراه دارند که نگرانی‌های بهدا شتی و زی ست‌محیطی ایجاد می‌کنند. این محدودیت‌ها ضـــرورت جســـتجو و به‌کارگیری فناوری‌های پیشـــرفته‌تر، پایدارتر و مؤثرتر در مدیریت بیماری‌ها را ایجـاب می‌کنـد. بیوتکنولوژی مولکولی به‌عنوان مســـیر تحول‌آفرینی مطرح شده است که ابزارها و روش‌های نوینی را برای افزایش مقاومت به بیماری در ســـطوح ژنتیکی و مولکولی ارائـه می‌دهـد. ظهور فنـاوری‌هـای توالی‌یـابی پر سرعت و تکنولوژی‌های اومیکس، امکان شنا سایی جامع ژنوم‌ها، ترنســـکریپتوم‌ها و پروتئوم‌های گونه‌های مختلف آبزی‌پروری را فراهم نموده اســـت و بینش‌های بی‌ســـابقه‌ای در خصـــوص تعاملات میزبان-پاتوژن و پایه‌های مولکولی ایمنی ایجاد کرده اســـت. این بینش‌ها امکان شـــناســـایی نشـــانگرهای ژنتیکی مرتبط با مقاومت به بیماری را فراهم آورده ا ست که به نوبه خود برنامه‌های ا صلاح نژاد انتخابی برای تولید جمعیت‌های مقاوم‌تر را هدایت می‌کند. مقدمه آبزی‌پروری به عنوان بخشی حیاتی از امنیت غذایی جهانی و توســعه اقتصـادی، در چند دهه اخیر رشـد چشـمگیری 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 اســت که تحت تأثیر رشـد جمعیت، تغییر الگوهای تغذیه‌ای و کاهش ذخایر ماهیان وحشـــی به دلیل صـــید بی‌رویـه و تخریـب محیط زیســـت قرار دارد. بنـابراین آبزی‌پروری به عنوان راه‌حلی کلیدی برای تأمین نیازهای جهانی به منابع پروتئینی پایدار مطرح شـده اسـت. با این وجود، شدت یافتن فعالیت‌های آبزی‌پروری موجب ظهور و گسترش بیماری‌های عفونی، به ویژه ویرو سی و باکتریایی، شده ا ست که تهدیدات قابل توجهی برای سلامت و تولید گونه‌های آبزی پرورشـــی به شـــمار می‌آیند. بیماری‌های ویروســـی و باکتریایی از جمله عوامل اصـــلی خســـارت‌های اقتصـــادی در صـــنعت آبزی‌پروری محســـوب می‌شـــوند و گونه‌هایی مانند میگو، ســـالمون، تیلاپیا و نرم‌تنان را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در میان این عوامل، بیماری‌های ویروسی مانند ویروس ســندرم لکه ســفید در میگو و ویروس آمیای عفونی در مـاهی آزاد، بـه همراه بـاکتری‌هـایی از جنس ویبریو، شـــیوع های مخربی ای جاد کرده‌ا ند. این عوا مل بیماری‌زا نه تنها نرخ بقای آبزیان را کاهش می‌دهند، بلکه عملکرد رشـد، موفقیت تولیدمثلی و کیفیت محصـولات 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 زی ست‌امنیتی، واک سینا سیون و ا ستفاده 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 واکســـن، کارایی آن را کاهش می‌دهد(Du *et al.*, 2022). ا ستفاده گ سترده از آنتی‌بیوتیک‌ها نیز خطر ایجاد مقاومت میکروبی، آلودگی محیطی و باقی ما ندن مواد دارویی در محصولات دریایی را به همراه دارد که دغدغه‌های بهداشتی و زیســـت‌محیطی ایجاد می‌کند. این محدودیت‌ها نیازمند جســـتجو و به‌کارگیری فناوری‌های پیشـــرفته‌تر و پایدارتر برای مدیریت بیماری‌ها می‌با شد. بیوتکنولوژی مولکولی به عنوان راهکاری نوین مطرح شـــده اســـت که ابزار ها و روش های جد یدی را برای بهبود مقاومت به بیماری در ســـطوح ژنتیکی و مولکولی فراهم می‌آورد. ف ناوری های توالی یابی پیشـــرفتـه و تکنولوژی های اومیکس امکـان شـــناســـایی جامع ژنوم‌ها، ترنســـکریپتوم‌ها و پروتئوم‌های گونه‌های آبزی را فراهم کرده اســـت و بینش‌های عمیقی درباره تعاملات میزبان-پاتوژن و مبانی مولکولی ســـیســـتم ایمنی ارائه می‌دهند. این اطلاعات می‌توانند نشـــانگرهای ژنتیکی مرتبط با مقاومت به بیماری را شـــناســـایی کرده و زمینه را برای بر نامه های اصـــلاح نژاد انتخابی به منظور تول ید جمع یت های م قاوم‌تر فراهم کن ند. علاوه بر این، فناوری های دقیق ویرایش ژنوم، به‌ویژه ســـیســـتم های CRISPR/Cas، انقلابی در امکان تغییرات ژنتیکی هدفمند ایجاد کرده‌اند که امکان توســعه گونه‌های مقاوم به بیماری

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

در آبزی‌پروری را بدون وارد کردن DNA خارجی فراهم می‌سازد. این رویکرد در کنار مداخلات مولکولی دیگر مانند مداخله[3] RNA استراتژی های تعدیل ایمنی مولکولی همچون پپتیدهای ضد میکروبی[4]، 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 پیشگیری ایمنی کمک می‌کند که امکان تشخیص زودهنگام عوامل بیماریزا و بهبود اثربخشی واکسن‌ها را فراهم می‌آورد. ادغام این فناوری‌ها با تکنولوژی های 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، به‌کارگیری بیوتکنولوژی مولکولی در آبزی‌پروری با چالش هایی از جمله پیچیدگی تعاملات میزبان-پاتوژن، چارچوب‌های قانونی، مسائل اخلاقی و نیاز به فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه و مقیاس‌پذیر مناسب برای گونه ها و سیستم های 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 بیماری های ویروسی و باکتریایی، ابزار های کلیدی مولکولی، مکانیزم‌های ایمنی، مطالعات موردی ویژه گونه‌ها و چشم‌اندازهای آینده را برجسته 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 گسترده از تکنیک‌های پیشرفته است که با دستکاری مولکول‌های زیستی در سطوح ژنتیکی و سلولی به منظور بهبود بهره‌وری و پایداری آبزی‌پروری به کار گرفته می شود. این روش‌ها امکان درک دقیق و اصلاح 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 تحول‌آفرین بیوتکنولوژی مولکولی که در آبزی‌پروری 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 آبزی می‌پردازد. این فرآیند یک نقشه جامع فراهم می‌آورد که ژن های مرتبط با مقاومت در برابر بیماری، رشد، تولیدمثل و تطبیق با تنش‌های محیطی را شناسایی می‌کند. استراتژی های 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 می سازند. 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 ژن های کاندید بهبود ژنتیکی بسیار مفید است. پروتئومیکس و متابولومیکس با بررسی پروتئین ها 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 ژن های خاص را برای افزایش ویژگی های 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 تکنیک های مبتنی بر DNA و RNAقادر به شناسایی عوامل بیماریزا با حساسیت و ویژگی بالا هستند و سیستم‌های هشدار زودهنگام ضروری برای کنترل بیماری ها و تضمین زیست‌امنیتی فراهم می‌کنند. کاربردها در مدیریت بیماری و بهره‌وری بیوتکنولوژی مولکولی نقشی اساسی در مدیریت

[3]. RNA interference = RNAi

[4]. Antimicrobial peptides =AMPs

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

بیماری های 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 عفونت های ویروسی و باکتریایی دارند، برنامه های 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 فناوری های 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 بدین‌ترتیب 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 آبزی‌پروری، 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، 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 شناسی 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 پیشرفته، مقاوم و متعهد به مسئولیت های زیست‌محیطی را می‌دهد که قادر به پاسخگویی به نیازهای جهانی آینده در حوزه تأمین مواد غذایی است(Wang *et al*., 2023)

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 آبزی‌پروری تبدیل شده است. این روش بینش‌های پویایی از پروفایل‌های بیان ژن در طول تعاملات میزبان- پاتوژن فراهم می‌کند و مکانیزم های مولکولی زیربنای پاسخ‌های ایمنی و مقاومت به بیماری در گونه‌های آبزی را روشن می‌سازد. از طریق توالی‌یابی RNA با توان بالا[5] 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 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[6]، سایتوکین‌ها[7] و زیرگروه آنها کموکین‌ها[8]، 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 سلول ها[9] را برجسته می‌سازد که برای محدود کردن تکثیر ویروس حیاتی هستند. مطالعات مقایسه‌ای ترنسکریپتومی بین ژنوتیپ‌های مقاوم و حساس به شناسایی نشانگرهای ژنتیکی و ژن های کاندید مرتبط با تحمل بیماری کمک کرده‌اند(Natnan *et al*., 2021). برای نمونه، تحقیقات انجام شده روی ماهی آزاد اتلانتیک و قزل‌آلای رنگین‌کمان، پروفایل های بیان را مقایسه کرده و تنظیمات متفاوت

[5] . RNA-seq
[6]. Pattern Recognition Receptors =PRRs
[7] . Cytokines
[8]. Chemokines
[9]. Apoptosis

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

اثرگذاران ایمنی مانند مولکول های پرفورین[10] و گرانزیم[11] 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. ایمنوژنومیکس، مطالعه پایه ژنتیکی و تنوع ژن‌های سیستم ایمنی، مکمل ترنسکریپتومیکس است که به شناسایی خانواده‌های ژنی دخیل در دفاع میزبان می‌پردازد. گونه های آبزی دارای مجموعه‌ای از گیرنده‌های شناسایی الگو شامل گیرنده‌های مشابه Toll، گیرنده‌های مشابه ناحیه الیگومریزاسیون اتصال یافته به نوکلئوتید[12] و گیرنده های شبیه ژن القاشونده توسط اسید رتینوئیک[13] هستند که همگی برای شناسایی عوامل بیماریزا و فعال سازی ایمنی اهمیت دارند. تحلیل های 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[14]، فاکتور نکروز تومور [15] 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 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 آبزی‌پروری تبدیل شده است. این روش بینش‌های پویایی از پروفایل‌های بیان ژن در طول تعاملات میزبان- پاتوژن فراهم می‌کند و مکانیزم های مولکولی زیربنای پاسخ‌های ایمنی و مقاومت به بیماری در گونه‌های آبزی را روشن می سازد. 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 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، 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 ژن های 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. ایمنوژنومیکس، مطالعه پایه ژنتیکی و تنوع ژن‌های سیستم ایمنی، مکمل ترنسکریپتومیکس است که به شناسایی خانواده‌های ژنی دخیل در دفاع میزبان می‌پردازد (Nguyen, 2024). گونه‌های آبزی 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. تحلیل های ژنومی و ترنسکریپتومی نشان داده‌اند که

[10] . Perforin
[11] . Granzymes
[12]. Nucleotide-binding oligomerization domain-like receptors =NLRs
[13]. Retinoic acid-inducible gene-I-like receptors =RLRs
[14] . Interleukins
[15] . Tumor Necrosis Factor =TNF

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

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 آللی تفاوت دارند که نقش آن‌ها به عنوان تعدیل‌کننده‌های کلیدی ایمنی را برجسته می‌سازد. ماتریس خارج‌سلولی[16] 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[17] 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 محل های کمیت بیان صفتی[18] و مطالعات ارتباط ژنومی گسترده[19] امکان تبیین شبکه‌های تنظیمی و شناسایی واریانت‌های عملکردی مؤثر بر مقاومت به بیماری را فراهم می‌آورد (Yáñez *et al.*, 2023). روش های یادگیری ماشین که بر مجموعه داده های ترنسکریپتومی اعمال می‌شوند، مدل های 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 می سازد. اعتبارسنجی عملکردی ژن های کاندید با استفاده از مداخله RNA ، حذف ژن‌های کریسپر یا مطالعات افزایش بیان، ارتباط زیستی یافته‌های ترنسکریپتومی را تقویت می کند. 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 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 بسترهای قدرتمند و مکملی برای رمزگشایی پایه مولکولی مقاومت ایمنی در گونه های آبزی فراهم می‌آورند. این فناوری ها زیربنای استراتژی‌های اصلاح نژاد پیشرفته، مطالعات عملکردی و نوآوری‌های درمانی هستند و بیوتکنولوژی مولکولی را در صف 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 فناوری های 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 آبزی‌پروری 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 تک راهنما[20] 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 می شود(Tian *et al.*, 2022). سپس این شکست توسط مکانیزم‌های طبیعی ترمیم سلول، عمدتاً اتصال انتهای غیرهمولوگ[21] یا ترمیم هدایت‌شده توسط هموولوژی[22] ، ترمیم می شود 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 مداوم برای تولید پایدار است. ویرایش ژن با استفاده از سیستم‌های CRISPR/Cas

[16] . Extracellular Matrix =ECM
[17] . Vibriosis
[18] . Expression Quantitative Trait Loci = eQTL
[19] . Genome-Wide Association Studies =GWAS
[20]. .single guide RNA =sgRNA.
[21] . Non-homologous end joining =NHEJ
[22]. Homology-Directed Repair =HDR

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

فرصت بی‌سابقه‌ای برای تقویت پاسخ‌های ایمنی ذاتی و اکتسابی با هدف‌گذاری ژن‌های حساسیت‌زا یا وارد کردن الل‌های 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 ایکتالوری [۲۳]در گربه ماهی ماهی کانال [۲۴] می گردد. پژوهشگران از ویرایش ژنوم مبتنی بر CRISPR/Cas9 برای وارد کردن ژن های پپتید ضد میکروبی مانند ژن کاتلیسیدین[۲۵] تمساح که یکی از ژن های 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 میله ای 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. 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 پروتوزوآیی، 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 گونه های مژک دار تک سلولی شیلودونلا [۲۸]، از انگل‌های بزرگ پوستی در ماهیان آب شیرین، را هدف قرار می‌دهند، به طور قابل‌توجهی 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 سلول ها یا جنین های هدف است. روش هایی 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 زیگوت ها[۳۱] همچنان روش یکی از تکنیک های متداول برای ایجاد ویرایش‌های ژنومی در خط تولیدمثلی 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 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 تحول‌آفرین، به‌کارگیری CRISPR/Cas در آبزی‌پروری 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 آبزی‌پروری

[23] . *Edwardsiella ictaluri*
[24] . *Ictalurus punctatus*
[25]. Cathelicidin
[26] . *Flavobacterium columnare*
[27] . Nervous Necrosis Virus =NNV
[28]. *Chilodonella*

[29]. Microinjection
[30] . Electroporation
[31]. Zygotes
[32]. Somatic
[33] . Genetically Modified Organism=GMO

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

امیدوارکننده است و پژوهش‌های جاری در راستای توسعه اهداف ژنی گسترده‌تر، بهبود روش های انتقال و ادغام داده های چند اومیکس برای شناسایی بهینه‌ترین ویرایش ها به منظور مقاومت در برابر بیماری صورت می‌گیرد. ترکیب کریسپر با اصلاح نژاد انتخابی و دیگر فناوری‌های مولکولی، توسعه گونه‌های مقاوم به آبزی‌پروری را تسریع کرده و وابستگی به آنتی‌بیوتیک ها 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 جهش های زیان‌آور، افزایش دقیق بیان ژن های 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 داراست. 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).

پپتیدهای 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 جایگزین های نوین و پایدار برای مدیریت بیماری ها 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 آبزی، ایفای نقش می‌کنند. این پپتیدها که با بار مثبت و ساختار آمفی‌پاتیک[34] خود شناخته می‌شوند، فعالیت ضد میکروبی گسترده‌ای علیه باکتری‌های 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 ضدمیکروبی 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[35]، هپسیدین‌ها[36]، دفنسین‌ها[37] و کاتلی‌سیدین‌ها[38] شناسایی و به‌طور گسترده مطالعه شده‌ان(Radhakrishnan *et al*., 2023). این پپتیدها در سلول های 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 می شوند، خواص قوی ضدویروسی، ضدباکتریایی و ضدانگلی دارند و به دلیل پایداری حرارتی بالا، تحمل نمک و سمیت سلولی پایین، برای کاربردهای آبزی‌پروری بسیار مناسب‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که پپتیدهای ضدمیکروبی نه تنها به طور مستقیم عوامل بیماریزا را از بین می‌برند، بلکه پاسخ‌های ایمنی را از طریق جذب شیمیایی سلول های ایمنی، تحریک تولید سایتوکین‌ها و افزایش فاگوسیتوز تعدیل می‌کنند. هپسیدین ها علاوه بر نقش ضد میکروبی، تنظیم‌کننده فرآیند هومئوستازی آهن[39] 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 پپتیدهای ضدمیکروبی 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، به‌کارگیری پپتیدهای 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 پپتیدهای طبیعی گاه محدودیت‌هایی مانند

[34] . Amphipathic structure
[35]. Piperidines
[36] . Hepcidins
[37] . Defensins
[38]. Cathelicidins
[39]. Iron Homeostasis

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

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 ویروس ها یا رونویسی‌های mRNA باکتریایی که برای عفونت و تکثیر ضروری هستند، عمل می‌کند. RNA های مداخله‌گر کوچک[40] یا RNA های کوتاه حلقه‌دار[41] 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 قابل‌توجهی بار ویروسی را کاهش داده و نرخ بقای میزبان را بهبود می‌بخشند. رویکردهای RNA های مداخله‌گر کوچک همچنین به عوامل بیماریزای باکتریایی و آلودگی‌های انگل‌ها توسعه یافته‌اند، جایی که خاموش‌سازی ژن مکانیزم‌های کلیدی ویرولانس یا بقای آن‌ها را مختل 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 فعال برای کاربرد عملی در آبزی‌پروری بررسی می‌شوند. پیشرفت‌ها در طراحی حامل‌های ویروسی و زیست شناسی مصنوعی به منظور افزایش پایداری و کارایی هدف‌گیری آن در حال انجام است. علاوه بر مهار مستقیم عوامل بیماریزا، خاموش‌سازی ژن مبتنی برRNA 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 می شود. پتانسیل هم‌افزا و کاربردهای آینده ترکیب پپتیدهای ضد میکروبی و RNA های مداخله‌گر کوچک، رویکردی چندجانبه برای مدیریت بیماری‌های آبزی‌پروری 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 RNA های مداخله‌گر کوچک خاموش‌سازی هدفمند و توالی‌خاص عوامل بیماریزا یا ژن‌های حساسیت‌زا را امکان‌پذیر می‌سازد. علاوه بر این، ویرایش ژن مبتنی بر کریسپر می‌تواند ژن‌های پپتیدهای 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 پاتوژن های میکروبی موجود در محیط های 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 آن ها 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 بیماریزای متنوع و فراوان در آب اهمیت ویژه‌ای دارد (Mokhtar *et al*., 2023). اجزای ایمنی ذاتی در ماهیان و سایر جانوران آبزی 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 می شود، شامل مجموعه‌ای از مولکول های ضد میکروبی مانند لیزوزیم ها و لکتین ها است(Muñoz-Atienza *et al*., 2021).

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

[40] . Small interfering RNAs=siRNA

[41] . Short hairpin RNAs=shRNA

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

شبیه[42]، گیرنده‌های نود-مانند[43] و گیرنده‌های RIG-I-مانند می‌شوند و الگوهای مولکولی مرتبط با عوامل بیماریزا[44] 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[45]: 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[46] 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 آبزی 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 می شود. 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 عمدتاً 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 می‌دهند و سلول‌های T سیتوتوکسیک که سلول‌های آلوده را از بین می‌برند، را واسطه‌گری می‌کنند. مولکول‌های کمپلکس اصلی سازگاری بافتی[47] 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 آبزی 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).

راهبردهای بیوتکنولوژیک برای ارتقای مهارت ایمنی شامل موارد زیر است:

- افزایش بیان گیرنده‌های 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 DNAو 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

[42]. Toll-like receptors=TLRs
[43]. NOD-like receptors=NLRs
[44]. Pathogen-ass0ciated molecular parrerns=PAMPs
[45]. Humoral Factors
[46]. Antigen-presenting=APCs
[47]. Major Histocompatibility Complex=MHC

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

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 RNAضروری است (Makesh and Rajendran, 2022) .

کاربرد ها و مطالعات موردی در گونه های عمده 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، ترنسکریپتومیکس و ایمونو مدولاتور های مولکولی[۴۸]، برای افزایش مقاومت در برابر بیماری ها، بهبود نرخ رشد، کنترل تولیدمثل 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 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[49]یکی از مهم‌ترین گونه های میگوی پرورشی در جهان، نشان داده‌اند. مطالعات ترنسکریپتومیک شبکه‌های ژنی ایمنی فعال‌شده در پاسخ به ویروس سندرملکه سفید را شناسایی کرده‌اند، از جمله پپتیدهای ضد میکروبی و مولکول‌های سیگنال‌دهنده که راهنمایی برای استراتژی‌های انتخاب گزینشی 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 انجام می شود. روش‌های تجربی مبتنی بر رقابت RNA که هدف آن‌ها ژن‌های ویرو سی ا ست، در کاهش بار ویرو سی 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 بهره های 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 بیماری های باکتریایی مانند فورانکولوزیس[۵۲] را تسریع کرده است. فناوری CRISPR/Cas9در 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 دانش ژنومی در باره مسیرهای ایمنی، به برنامه‌های مؤثر کنترل بیماری کمک شایان توجهی کرده‌اند. داده های ترنسکریپتومیک، 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 کپورماهیان گونه‌های غالب در سیستم‌های آبزی‌پروری 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 بیماری های باکتریایی مانند استرپتوکوکوس[۵۴] و عفونت های 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

[48]. Molecular Immunomodulators
[49]. *Litopenaeus vannamei*
[50]. Single Nucleotide Polymorphisms=SNP
[51]. Infection Pancreatic Necrosis Virus=IPNV
[52]. Furunculosis
[53]. Immunostimulants
[54]. *Streptococcus*
[55]. Tilapia Lake Virus=TiLV
[56]. Myostatin

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

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 آبزی‌پروری 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 هرپس‌ویروس اوستریدنوع یک[57] 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، 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 مداکای ژاپن[58]، ماهی تیغه‌ای[59] و فِلاندرِ زیتونی[60] 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 آبزی پرورشی را به صورت مداوم رصد می‌کند. هنگامی که این روش با داده‌ها و تحلیل‌های مولکولی و ابزارهای زیست‌اطلاعاتی ترکیب می شود، فرصت‌های بی سابقه‌ای برای بهینه سازی روش های پرورش، ارتقای نظارت بر بیماری ها و امکان مداخله زودهنگام فراهم می‌آورد که در نهایت 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 حجیمی 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[61] همراه با توالی یابی 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 آبزی‌پروری 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:

[57] . Ostreid HerpesVirus 1=OsHV-1
[58] . Japanese medaka=*Oryzias latipoes*
[59] . Blunt snout bream=*Megalobrama amblycephala*
[60]. Olive flounder=*Paralichthys olivaceus*
[61] . Environmental DNA =eDNA

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

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 تسریع می‌کنند.

تشخیص بیماری: خطوط کاری بیوانفورماتیک تلفیقی، داده‌های مولکولی را تحلیل کرده و نشانه های 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 ان ها را برای بهبود ژنتیکی یا مداخلات درمانی هدف قرار داد.

مدلسازی تعامل میزبان-پاتوژن-محیط: بیوانفورماتیک با ادغام داده‌های چند-اُمیکس و داده های 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: 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 ذخایر، 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 استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها و مواد شیمیایی و بهبود رفاه حیوانات و کیفیت محصول می‌شوند.

بهبود ردیابی و صدور گواهی: اثرانگشت مولکولی و ثبت دیجیتالی سوابق، ردیابی قوی محصولات آبزی‌پروری را فراهم آورده و فرآیند های 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 آبزی‌پروری می‌شود. پیشرفت هایی در را یانش ابری، را یانش لبه و هوش مصنوعی (Artificial Intelligence=AI) پیش‌بینی می‌شود این موانع را با امکان پذیر ساختن پردازش داده های بلادرنگ مقیاس‌پذیر و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری در دسترس تولیدکنندگان در هر سطحی، از بین ببرد. تحقیقات آینده بر توسعه رابط های کاربری آسان، حسگرهای مقرون به صرفه‌تر و کیت‌های تشخیصی مولکولی خودکار مناسب استفاده روزمره در مزارع تمرکز دارد.

ملاحظات زیست‌محیطی و بوم‌شناختی

ارگانیسم‌های 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 بیماری ها یا رشد افزایش یافته فراهم می‌کنند، می‌توانند مزیت انتخابی ایجاد کرده و در نتیجه دینامیک اکوسیستم را تغییر دهند. ارزیابی‌های ریسک زیست‌محیطی نیازمند داده های تجربی قابل اعتماد و مدل‌سازی‌های پیش‌بینی‌کننده 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

[62] . Genomic Estimated Breeding Values =GEBV

[63] . Interoperability

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

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

نتیجه‌گیری

زیست‌فناوری مولکولی به عنوان نیرویی تحول‌آفرین 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 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 بینش های عمیقی در باره تعاملات میزبان-پاتوژن و دینامیک سیستم ایمنی ارائه داده است و توسعه واکسن‌ها، ایمونواستیمولانت‌ها 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 بیماری های ویروسی و باکتریایی است که روش‌های انتخاب سنتی را تکمیل می‌کند. در کنار زیست‌فناوری مولکولی، ظهور آبزی‌پروری دقیق که ترکیبی از فناوری های 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 فناوری های پیشرفته چالش های قابل توجهی از جمله موانع فنی در ویرایش صفات پیچیده، اثرات خارج از هدف، عدم قطعیت‌های قانونی، نگرانی های 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 آبزی‌پروری را به سوی سیستم‌های هوشمندتر و مقاوم‌تر هدایت خواهد کرد. پیشرفت‌هایی در زیست شناسی 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 آبزی پروری 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

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

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:

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]

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-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. 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

[Downloaded from injbr.com on 2026-05-19]