

SU ÜRÜNLERİ ALANINDA AKADEMİK TARTIŞMALAR

Editör: Prof.Dr.Altuğ KÜÇÜKGÜL

yaz
yayınları

Su Ürünleri Alanında Akademik Tartışmalar

Editör

Prof.Dr. Altuğ KÜÇÜKGÜL

yaz
yayınları

2026

Su Ürünleri Alanında Akademik Tartışmalar

Editör: Prof.Dr. Altuğ KÜÇÜKGÜL

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8926-35-4

Haziran 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

The Impacts of Natural Disasters on the Aquaculture Sector	1
<i>Şehriban ÇEK, Yasemin Bircan YILDIRIM</i>	
Su Ürünleri Yetiştiriciliğinde Mikrorna'ların Rolü: Balıklarda Moleküler Etki Mekanizmalarının İncelenmesi	30
<i>Altuğ KÜÇÜKGÜL, Azime KÜÇÜKGÜL, Zuhâl KARAMAN</i>	
Balık Parazitolojisinde Temel Terminoloji.....	57
<i>Mustafa DÖRÜCÜ, Mücahit YÜNGÜL</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

THE IMPACTS OF NATURAL DISASTERS ON THE AQUACULTURE SECTOR

Şehriban ÇEK¹

Yasemin Bircan YILDIRIM²

1. INTRODUCTION

Aquaculture has become one of the fastest-growing food production systems worldwide, contributing substantially to global food security and economic development (Ma et al. 2025). The farming of fish, crustaceans, molluscs, and aquatic plants has rapidly grown to become one of the most important food production sectors globally. In recent decades, it has surpassed capture fisheries to account for the majority of seafood consumed worldwide. In 2022, global aquaculture production reached a record 130.9 million tonnes, exceeding wild catch for the first time and representing over 50 % of total aquatic animal production. This shift highlights aquaculture's growing role in global food systems as demand for seafood increases with population growth and changing dietary preferences (FAO 2024). The expansion of aquaculture is concentrated in Asia, which dominates global production, with over 70 % of total aquatic animal output coming from countries such as China, India, Indonesia, and Viet Nam. China alone produces more than one-third of the world's farmed aquatic animals, reflecting the region's long-standing

¹ Prof.Dr., Iskenderun Technical University, Faculty of Marine Sciences and Technology, ORCID: 0000-0003-1676-5035.

² Prof.Dr., Iskenderun Technical University, Faculty of Marine Sciences and Technology, ORCID: 0000-0001-7776-4701.

investment in and reliance on aquaculture. China is the largest aquaculture producer in the world, and in a study conducted on 2.85 million officially registered aquaculture enterprises, the importance of standardization was emphasized, and it was suggested that insurance should be considered indispensable for enterprises (Ma et al. 2025).

Over the past two decades, Turkey's aquaculture sector has experienced remarkable growth. While national production stood at 50,000 tons in 2002, it reached 850,000 tons by 2024. The number of aquaculture facilities increased from 1,245 in 2002 to 2,382 in 2022 (Sarıcan & Aktar, 2025), corresponding to a capacity expansion of 1,466%. The sector is dominated by three species sea bream, sea bass, and rainbow trout which together account for 97% of total output. However, "Turkish salmon," produced by fattening rainbow trout in cages in the Black Sea and Southeastern Anatolia, has emerged as a major success story: its production has grown 17-fold in the past decade, with exports reaching USD 498 million. Export revenues are projected to rise to USD 1 billion by 2028. Turkey currently exports aquaculture products to more than 100 countries, including Russia, Italy, the Netherlands, Greece, and the United Kingdom (Yanık, 2022; Aydın et al. 2025). Given that fishmeal and fish oil remain among the most critical inputs, research on insect- and plant-based protein alternatives is increasingly supported by government initiatives to ensure the long-term sustainability of the sector (Aydın & Çek-Yalınz, 2019; Dede & Çek, 2025; Mazlum et al., 2025). In terms of sectoral sustainability, Aydın and Çek (2026) highlighted several key recommendations in their comprehensive review: To better understand mineral microbiota interactions, future studies should adopt long-term and multigenerational designs, employ metagenomic and metabolomic analyses, conduct multi-mineral trials, and

develop microbiome-based diagnostic approaches. Furthermore, validating results under commercial aquaculture conditions and assessing the ecotoxicological impacts of nanoparticles are considered indispensable for ensuring sustainable aquaculture. However, the sector is highly vulnerable to natural disasters, including floods, droughts, cyclones, earthquakes, and tsunamis. These events can cause massive losses in stock, destruction of infrastructure, and long-term ecological damage, undermining both livelihoods and national economies. Partelow et al. (2025) examined aquaculture in 150 countries and developed four different models. These researchers excluded China, which accounts for 57.5% of global production at the maximum level, from their analysis. At the conclusion of their study, they emphasized the importance of socio-economic research, including the impacts of natural disasters. Natural disasters affect the aquaculture sector in many different ways. One of the few studies investigating the negative impacts of the February 6, 2023 earthquakes in Turkey was conducted by Aydın et al. (2024). Their research examined the effects of the Kahramanmaraş-centered earthquakes on agricultural and food sector enterprises in Malatya province. Based on face-to-face surveys with 44 firms registered in the Malatya Organized Industrial Zone, the study revealed that 79.5% of these firms were engaged in export activities, thereby contributing significantly to Turkey's agri-food trade. The findings indicated that firms were severely affected both economically and physically, with the dried fruit-vegetable and cereal sectors suffering the most damage. The authors emphasized the importance of establishing resilient infrastructure, enhancing earthquake awareness within society, and creating safe production environments to ensure sustainability in the agricultural and food sectors in the aftermath of disasters. Notably, however, the aquaculture sector was not addressed in this study. In

contrast, Demirci et al. (2024) investigated the early impacts of the Kahramanmaraş-centered earthquakes and subsequent aftershocks on the fisheries sector in Hatay province. Their study demonstrated that the earthquakes caused extensive destruction in Hatay and that the fisheries sector was directly and indirectly affected by these shocks. Many fishers, like other residents of the region, were compelled to suspend fishing activities due to safety concerns. The research identified the impacts of the earthquakes on fishing harbors, vessels, retail and wholesale fish trade enterprises, as well as aquaculture import–export companies. The authors noted that, compared to other sectors, fisheries entered a normalization process much more rapidly approximately one month after the disaster. The article also provided recommendations for fostering sustainable regional fisheries ecosystems and maximizing the benefits derived from marine resources. During this process, the authors highlighted that supporting fish trade enterprises (retail, wholesale, and export) would be a more realistic approach to revitalizing the sector, as their operations directly influence stakeholders engaged in fishing activities, particularly small-scale fishers. Furthermore, they stressed the necessity of more effective monitoring under martial law measures to prevent opportunistic practices in the aftermath of the disaster (Demirci et al. 2024). In a recent study by Ulusoy, Çek and Bircan-Yıldırım (2026), the effects of the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes on aquarium fish farming and aquarium enterprises were investigated. The study found that aquarium fish farming and enterprises are highly vulnerable to disasters due to their dependence on water quality, oxygenation, and fragile infrastructure. Ornamental fish enterprises in Hatay were severely impacted. Of 54 surveyed businesses, 57% remained active while 43% closed, with retail enterprises disproportionately affected. Losses included complete fish mortality in 16 enterprises, partial

losses of up to 90%, and major damage to electrical, water, ventilation, and filtration systems (Figure 1. A and B). Structural damage ranged from minor cracks to total collapse, and income losses were widespread, with nearly half of enterprises reporting zero revenue. Recovery was hindered by financial constraints, supply shortages, and a lack of skilled staff; only 3% maintained normal operations. Preventive measures emphasized insurance, generators, and earthquake-resistant aquariums, while support requests focused on tax relief and financial aid. Overall, the findings of Ulusoy, Çek and Bircan-Yıldırım (2026) highlight the pronounced vulnerability of ornamental fish enterprises to seismic events and emphasize the urgent need for resilience strategies, including infrastructure reinforcement, financial safeguards, and comprehensive emergency preparedness. In countries like Türkiye, which are located on active fault lines, it is necessary to take precautions against natural disasters in advance to ensure the sustainability of the sector.

This book chapter will examine the types of natural disasters affecting aquaculture, the biological and ecological impacts of such events, their economic and social consequences, as well as resilience and adaptation strategies

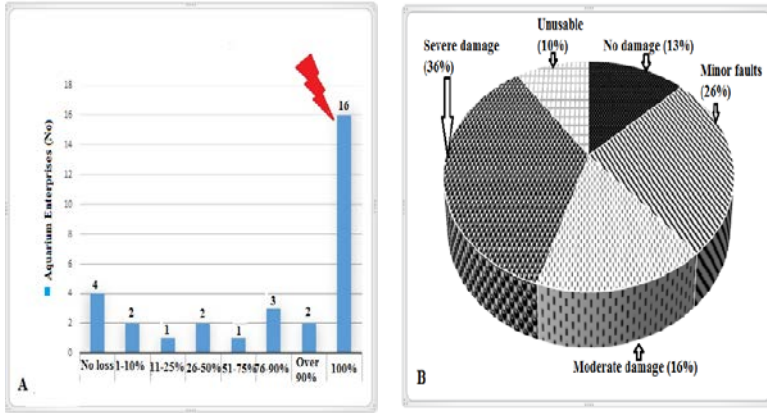


Figure 1. The impacts of the February 6, 2023 earthquake on aquarium enterprises were documented by Ulusoy, Çek, and Bircan-Yıldırım (2026). A) Sixteen enterprises reported complete loss of their fish stocks. B) 36% of enterprises reported severe damage to their electrical systems.

2. TYPES OF NATURAL DISASTERS AFFECTING AQUACULTURE

Natural disasters affecting aquaculture can be grouped under four main categories (Figure 2). These disasters are classified as hydrological, meteorological, geological, and biological. Floods caused by excessive rainfall, tsunamis, storms, and the overflow of water resources fall under hydrological disasters. Hurricanes, extreme temperatures, and droughts, which are natural events linked to atmospheric and weather conditions, are considered meteorological disasters.



Figure 2. Basic Categories of Natural Disasters Affecting Aquaculture

Movements of the earth's crust, geological processes, earthquakes, and volcanic eruptions are examples of geological disasters. Harmful algal blooms and disease outbreaks are among the most common biological disasters. Each disaster type interacts uniquely with aquaculture systems based on geography, species cultivated, and farming methods. This introduction explores how these forces shape the industry's sustainability challenges and adaptive responses. Natural disasters such as floods, droughts, and disease outbreaks pose serious threats to aquaculture systems, affecting water quality, fish health, and production sustainability.

2.1. Hydrological effects on aquaculture sector

Events related to the overflow of water resources or movements of the sea. Floods, driven by climate change through increased rainfall, sea-level rise, and glacial melt, pose severe threats to aquaculture. They damage farmland, infrastructure, and fish farms, leading to fish mortality,

deterioration of water quality, and significant economic losses. Afis and Iwatt (2023) reviewed the impacts of floods on aquaculture, highlighting negative effects such as disruption of fish communities, changes in species distribution, mortality from direct and indirect causes, reduced dissolved oxygen leading to anoxic conditions, fish migration and stock losses, and overall water quality decline. They also noted some positive effects, including groundwater recharge, nutrient transport, and enhanced ecosystem productivity. Their recommendations for mitigation include constructing ponds to technical standards, implementing early warning systems, emergency management, and engineering solutions such as dams and levees.

Hsiao et al. (2025) investigated flood impacts on aquaculture in Taiwan under global warming scenarios using typhoon rainfall data from the TCCIP platform. Under the AR5 RCP8.5 scenario, they compared historical typhoon events (1979-2008) with mid-21st century projections (2040–2065). Flood simulations with the SOBEK model revealed that Donggang, Linbian, and Peishih basins were most affected, accounting for about 60% of total flood area. Fish farms inundated by more than 30 cm of water could increase nearly fourfold, from 4.75 km² historically to 19.21 km² in the mid-century scenario. While total rainfall may not rise significantly, rainfall intensity is expected to increase, raising flood risks, particularly for low-lying coastal aquaculture facilities. Wang et al. (2024) examined storm surge-induced flooding in Pearl River Delta aquaculture farms using MIKE21 hydrodynamic modeling and UAV-derived topographic data. They found that flood severity and extent could be reduced by constructing a sluice gate and managing pond water levels. Maintaining pond water between 0 and 0.5 m below sea level was identified as optimal for reducing flood risk. Their

findings emphasize sluice gate construction and water-level management as effective strategies for sustainable coastal aquaculture under storm surge threats. Regionally, Lam et al. (2024) reported that Asia is most affected by floods, while Africa faces widespread flood-related disruptions, the Americas experience frequent floods but fewer drought impacts, and Europe is increasingly exposed to both floods and droughts. Shovon et al. (2025) further highlighted that droughts cause reproductive failures, mortality, disease risks, and reduced harvests, while floods damage infrastructure, cause fish escapes, and degrade water quality. They recommend adaptive strategies such as IAA systems, selective breeding, RAS technologies, species diversification, raised tanks, and community-based solutions.

Overall, the literature underscores that floods and droughts pose serious ecological and economic threats to aquaculture. Sustainable adaptation strategies, resilient infrastructure, and integrated policies are critical to safeguarding aquaculture's role in global food security.

2.2. Meteorological effects on aquaculture sector

Climate change poses increasingly severe threats to global aquaculture systems through a complex array of interacting stressors. A scientometric analysis of 47 years of research reveals enduring themes such as ocean acidification and global warming, alongside emerging concerns like deforestation and nutrient runoff. Innovative practices including carbon sequestration, seaweed farming, and integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) are emphasized as mitigation strategies, with greater collaborative research needed in underrepresented regions such as Southeast Asia and Africa (Moss et al., 2025). Yet despite aquaculture's rapid growth surpassing wild fisheries capture by 2016 and

accounting for approximately half of all seafood consumed globally scientific coverage of climate change impacts on the sector constitutes only 5% of all food system climate publications, far behind agriculture (74%) and fisheries (21%). Disease and freshwater availability remain underrepresented in the literature. The authors caution against overreliance on technological solutions, which may be economically inaccessible in lower-income producing regions (Froehlich et al., 2022).

Understanding why these gaps matter requires looking beneath the surface at biological vulnerabilities. Climate change must be understood as an interconnected set of stressors global warming, altered precipitation, ocean acidification, salinity shifts, reduced dissolved oxygen, and extreme weather events rather than isolated phenomena. Heat stress triggers immunosuppressive responses including elevated cortisol, suppressed lymphocyte function, and increased disease susceptibility. Autochthonous breeds, exhibiting greater environmental resilience, may represent a valuable strategy for sustainable livestock management (Filipe et al., 2020). These immunological pressures do not operate in isolation. Compounding such vulnerabilities, climate-driven shifts destabilize microbial communities essential for disease regulation. Rising temperatures and acidification intensify bacterial (*Vibrio* spp.), parasitic (*Ichthyophthirius multifiliis*), and fungal (*Saprolegnia* spp.) outbreaks. Antimicrobial resistance is accelerating in shrimp farming across Southeast Asia, while Pacific oyster larval survival is reduced by 50% under acidified conditions (Jeyachandran, 2025). Harmful algal blooms and shifting rainfall patterns further threaten water quality and aquaculture infrastructure (Yadav et al., 2024).

The biological toll of these converging stressors translates directly into measurable economic losses. In China, each one-unit increase in the composite Climate Physical Risk Index is associated with a reduction of approximately 311,000 tons of freshwater aquaculture output, with natural disasters mediating roughly 26% of this effect (Zhang, Qu, and Yang, 2026). In the United States, trout, sturgeon, and perch face significant biological stress, with small-scale farms particularly disadvantaged (Fong et al., 2024). Shrimp aquaculture, supplying about 70% of global demand, faces mounting supply chain disruptions and pathogen epidemics (Campbell et al., 2026). Beyond chronic stressors, extreme weather events constitute one of the most immediate and economically damaging dimensions of climate risk. In Vietnam's Quang Ngai province, floods and typhoons reduce household aquaculture income by 8–9% and erode 10–20% of initial investment (Pham et al., 2025). In Louisiana, five hurricanes caused significant declines in species richness, while a severe drought elevated salinity to ecologically damaging levels (Davis, 2025). In Cuba, Hurricane Irma and Tropical Storm Alberto produced mangrove loss, altered salinity, and reduced catches illustrating how extreme events compound pre-existing environmental degradation rather than producing isolated shocks (Ramenzoni et al., 2020). Such shocks fall hardest on regions least equipped to absorb them. The most severe institutional vulnerabilities are found in sub-Saharan Africa and South and Southeast Asia. In Mozambique, Cyclones Idai and Kenneth destroyed over 2,000 vessels, 228 fish ponds, 371 floating cages, and resulted in the loss of over 863,000 fish fry (Muhala et al., 2021). In Bangladesh and the broader region, sea level rise, salinity intrusion, and extreme rainfall compound threats to shrimp farming and public health. Adaptation strategies must therefore be context-specific and integrated across policy

levels, inseparably linked to broader poverty reduction and food security goals (Rahman et al., 2022).

2.3. Geological effects on aquaculture

Geophysical disasters including earthquakes, volcanic eruptions, tsunamis, landslides, floods, and droughts cause sudden disruptions in water quality, species composition, and microbial communities, often leading to declines in survival and productivity of aquatic organisms. These events frequently interact with one another and with anthropogenic stressors, compounding their negative effects and ultimately threatening food security, livelihoods, and cultural services dependent on fisheries and aquaculture (Cooke et al., 2023). Among these hazards, tsunamis represent one of the most acute threats to aquaculture infrastructure. The January 2022 Tonga tsunami caused direct damage to oyster, scallop, and seaweed farms in Japan, demonstrating that even moderate wave heights can disrupt seafood supply (Imamura et al., 2022). Field surveys along Japan's Sanriku Coast confirmed that damage ratios exceeded 60% in some fishing grounds, with raft- and longline-type systems particularly vulnerable. To improve risk assessment, Shigihara et al. (2025) proposed a new metric Potential Drift Displacement (PDD) that quantifies drifting behavior of aquaculture structures and correlates strongly with tsunami flow velocity, offering a predictive tool for designing more resilient systems. The destructive potential of tsunamis is further illustrated by earlier catastrophic events. The 2004 Indian Ocean tsunami devastated Thailand's Andaman coast with estimated losses of 6,481 million Baht, destroying over 5,000 fishing boats and 27,000 cage culture operations, with long-term resilience requiring participatory management and ecosystem restoration (Supratid and Srivichai, 2013). The 2011 Great East Japan Earthquake and tsunami proved even more catastrophic, destroying over 25,000 fishing vessels, 319

ports, and most aquaculture facilities across three prefectures, with damages exceeding ¥1.2 trillion. Recovery varied by region, and long-term challenges including aging fisher populations persist (Okuda and Ohashi, 2012). Notably, districts where agriculture and fisheries were rebuilt in balance experienced slower population decline, underscoring how seismic disasters reshape entire coastal livelihoods (Nakamura et al., 2022). The consequences of earthquakes, however, extend well beyond physical destruction. Scholtens and Oueghlissi (2020) found that earthquakes significantly reduce stock returns of listed fishing companies worldwide with impacts more pronounced than those of oil spills or policy changes reflecting how financial markets perceive seismic events as critical long-term threats to the sector.

A stark illustration of this multi-dimensional impact is provided by the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes in Türkiye. In Hatay Province, 43% of ornamental fish businesses ceased operations, with widespread failures in electrical, water, and filtration systems, and nearly half reporting complete income loss (Ulusoy, Çek, and Yıldırım, 2026). Commercial fisheries suffered equally, with average sea time at İskenderun Fishing Port dropping by more than 60%, while sediment transport and habitat changes reduced catches and cage aquaculture firms faced additional supply chain disruptions (Demirci et al., 2024). In response to such vulnerabilities, efforts to engineer earthquake resilience into aquaculture systems are emerging. Zhang et al. (2023) proposed an integrated offshore structure combining a monopile wind turbine with a steel aquaculture cage, finding that multiple tuned mass dampers provided superior suppression of seismic responses highlighting the importance of advanced engineering for multi-purpose offshore structures.

Yet not all geological disturbances produce lasting damage, pointing to the importance of ecological resilience. Following the 2005 Nias Islands earthquake, reef fish assemblages recovered within five years, with diversity indices gradually rebounding by 2010 (Putra et al., 2025). By contrast, coastal communities with limited institutional and financial capacity as documented in Bangladesh remain highly vulnerable to compounding geophysical and hydro-meteorological hazards, with resilience indices consistently falling in the low range across socio-economic, institutional, and physical dimensions (Hossain, Haque, and Kabir, 2022).

2.4. Effects of biological hazards on aquaculture

Aquaculture systems face a range of biological threats including harmful algal blooms (HABs), disease outbreaks, parasitic infestations, and toxin-producing organisms that affect not only the health and productivity of cultured species but also ecosystem stability, public health, and economic viability (Anderson et al., 2012; Hallegraeff, 1993). Among the most critical of these stressors are HABs, driven by the rapid proliferation of microalgae that accumulate toxic compounds and deplete dissolved oxygen, frequently triggering mass mortality events. The global incidence of HAB events reportedly tripled between 2000 and 2020, with economic consequences including USD 10–100 million in annual losses in the United States alone and USD 50.8 million from a single bloom in Hong Kong (Oh et al., 2023; Landsberg, 2002; Trainer et al., 2020). Traditional monitoring programs remain insufficient due to temporal and spatial limitations, while mitigation approaches such as aeration, clay flocculation, and algicidal bacteria have yet to be tested at field scale (Fernandes-Salvador et al., 2021; Oh et al., 2023). In freshwater aquaculture, cyanotoxins were detected in fish tissues at or above the tolerable daily intake threshold in 60%

of cases across 63 studies and 22 countries, with intensive aquaculture practices fueling eutrophication in a dynamic expected to intensify under climate change (Drobac Backovic & Tokodi, 2024).

These biological stressors rarely act in isolation. Algal toxin exposure weakens immune responses in aquatic organisms, increasing susceptibility to infectious diseases (Mello et al., 2010), while harmful algae impair defense mechanisms in shellfish and finfish (Hegaret et al., 2007). This immunosuppression creates conditions favorable for pathogen proliferation, transforming localized infections into widespread outbreaks and compounding the direct damage caused by toxins themselves. Beyond HABs, parasitic infestations constitute one of the most persistent and economically significant challenges in finfish aquaculture. In Norwegian salmon farming, the salmon louse (*Lepeophtheirus salmonis*) has driven biological costs to levels comparable to feeding expenses roughly 30% of total production costs with the government maintaining a regulatory threshold of no more than 0.5 female lice per fish (Misund, 2022). Modeling the stochastic nature of lice infestations using historical Norwegian data, Ewald and Kamm (2025) find that an optimal harvesting rule yields approximately 1.5% gain in farm value per rotation compared to deterministic approaches. When biological hazards overwhelm control measures, they can escalate into mass mortality events (MMEs), carrying significant implications not only ecologically and economically but also for occupational health and safety. A comparative analysis of MME regulatory frameworks across Canada, Chile, Ireland, Norway, and Scotland reveals substantial cross-national variability and critical gaps in integrating occupational health concerns into risk management systems, with response workers exposed to hydrogen sulfide,

antimicrobial residues, and high-pressure environments (Neis et al., 2023).

Taken together, biological hazards in aquaculture operate across multiple scales through complex, interacting pathways. Addressing them requires integrated, cross-disciplinary strategies combining environmental sustainability, economic viability, and public and occupational health supported by advances in monitoring technologies, predictive modeling, and regulatory coordination.

3. CONCLUSION

This chapter has examined the multidimensional impacts of natural disasters on global aquaculture across hydrological, meteorological, geological, and biological hazard categories. A consistent pattern emerges: aquaculture systems are deeply vulnerable to natural disturbances, with this vulnerability compounded by the interacting nature of the hazards themselves, the biological fragility of farmed organisms, and the socioeconomic precarity of many producing communities.

Hydrological disasters cause immediate physical damage to pond infrastructure, cage systems, and fish stocks, while degrading water quality through sediment transport, salinity intrusion, and oxygen depletion. Evidence from Taiwan, the Pearl River Delta, and coastal Bangladesh consistently demonstrates that low-lying coastal facilities face escalating flood risk, and that adaptive engineering solutions remain unevenly accessible across production scales and income groups. Building on these physical vulnerabilities, meteorological stressors constitute the broadest and most persistent category of risk. Rising temperatures, ocean acidification, altered precipitation, and increasingly frequent

extreme weather events degrade biological performance, intensify disease pressure, and inflict structural damage on production infrastructure. Empirical evidence from China, Vietnam, Louisiana, and Mozambique confirms that climate-related losses are present-day economic realities, disproportionately affecting small-scale producers in developing regions who lack the capital and institutional support needed for effective adaptation. While meteorological risks are chronic, geological hazards though episodic can be catastrophic in scale. The 2004 Indian Ocean tsunami, the 2011 Great East Japan Earthquake, the 2022 Tonga eruption, and the 2023 Kahramanmaraş earthquakes each illustrate how seismic and volcanic events can instantaneously destroy decades of investment in aquaculture infrastructure and coastal livelihoods. The local findings from Hatay Province are particularly instructive, with recovery found to depend heavily on pre-existing institutional capacity and access to financial support. Cutting across all these physical hazards, biological threats add a further layer of complexity through less visible but equally destructive pathways. Harmful algal blooms whose global incidence has tripled over two decades threaten farmed organisms and consumer safety alike, while parasitic infestations impose chronic burdens on salmon aquaculture. Mass mortality events carry consequences extending to occupational health and safety risks for workers. Critically, biological hazards are amplified by the same meteorological and hydrological stressors described above, creating feedback loops that magnify the overall risk landscape.

A cross-cutting finding of this review is the persistent mismatch between the scale of risks facing aquaculture and the depth of research, policy attention, and adaptive investment directed toward the sector. Aquaculture now supplies more than half of all fish for human consumption and is a critical

pillar of food security in many vulnerable nations, yet it remains systematically understudied relative to agriculture and capture fisheries a gap especially pronounced for freshwater systems, disease risks, and producing regions in sub-Saharan Africa and Southeast Asia.

In sum, addressing the threats documented in this chapter will require the integration of disaster risk reduction, climate change adaptation, ecological monitoring, and socioeconomic resilience into a coherent, cross-sectoral governance framework one that is both globally informed and locally grounded.

4. FUTURE PERSPECTIVES

The findings of this chapter point toward several priority directions for future research, policy, and practice. Future research must move beyond single-hazard assessments toward integrated frameworks that capture the compounding and cascading nature of disaster risk, as hydrological, meteorological, geological, and biological hazards rarely operate in isolation. Multi-hazard risk indices coupled with dynamic ecological models will enable more realistic vulnerability projections, while machine learning and remote sensing offer promising avenues for real-time monitoring. Selective breeding programs targeting thermal tolerance, disease resistance, and salinity adaptability including underutilized indigenous species represent one of the most durable pathways to climate-resilient aquaculture.

Equally pressing is the need to address the underrepresentation of disease in the scientific and policy literature. Environmental DNA metabarcoding, satellite-based monitoring, and autonomous underwater vehicle sampling offer transformative potential for early detection, while

internationally coordinated surveillance networks particularly in Southeast Asia and sub-Saharan Africa are essential for timely management responses. At the infrastructure level, innovations such as Potential Drift Displacement metrics, tuned mass dampers, and seismic-resistant designs must be translated into cost-effective solutions accessible to small- and medium-scale producers. Yet physical infrastructure alone is insufficient, as post-disaster recovery trajectories are shaped as much by institutional capacity and financial access as by the severity of the event itself. Future policy frameworks should prioritize producer cooperatives, tailored disaster insurance, and gender-sensitive approaches recognizing women's critical role in aquaculture value chains. The occupational health dimensions of disaster response similarly remain underexplored, with cross-national harmonization of safety protocols representing a priority for both research and policy.

Finally, Türkiye's growth from 50,000 to 850,000 tons between 2002 and 2024 combined with its location on one of the world's most tectonically active fault systems makes it a particularly instructive case. As the country moves toward its USD 1 billion export target by 2028, integrating earthquake risk assessment into site planning and facility design must be regarded as a strategic priority with broader international relevance.

In conclusion, the future of aquaculture as a pillar of global food security will depend on the sector's ability to anticipate, absorb, and recover from natural disaster threats requiring sustained, interdisciplinary, and internationally collaborative research that is as attentive to the livelihoods of small-scale producers as it is to the frontiers of genomics, engineering, and remote sensing.

REFERENCES

- Afia, O. E., & Iwatt, I. J. (2023). Impacts of flooding on the aquaculture sector. In I. A. Ayandele, G. N. Udom, E. O. Effiong, U. R. Etuk, I. E. Ekpo, U. G. Inyang, G. E. Edet, & I. Moffat (Eds.), *Contemporary discourse on Nigeria's economic profile, a festschrift in honour of Prof. Nyaudoh, U. Ndaeyo* (pp. 333–340). University of Uyo.
- Anderson, D. M., Cembella, A. D., & Hallegraeff, G. M. (2012). Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries and Coasts*, 35(3), 704–726. doi:10.1007/s12237-010-9341-8
- Aydın, C. B., Gerdan, S., & Aslan, R. (2024). The effects of 6 February 2023 earthquakes on the production and marketing process of firms in the agriculture and food sector: The case of Malatya Province Türkiye. *Sustainability*, 16(21), 9479. doi:10.3390/su16219479
- Aydın, F., & Çek, Ş. (2026). Mineral-microbiota interactions in aquaculture: Implications for fish gut health and nutrition. *Veterinary Research Communications*, 50(268), 268–284. doi:10.1007/s11259-026-11207-2
- Aydın, F., & Çek-Yalnız, Ş. (2019). Effect of probiotics on reproductive performance of fish. *Natural and Engineering Sciences*, 4(2), 153–162.
- Aydın, İ., Öztürk, R. Ç., Eroldoğan, O. T., Arslan, M., Terzi, Y., Yılmaz, S., & Sevgili, H. (2025). An in-depth analysis of the finfish aquaculture in Türkiye: Current status, challenges, and future prospects. *Reviews in Aquaculture*, 17(2). doi:10.1111/raq.70010

- Campbell, E., Becker, J. A., Bracher, P., Budhiraja, B., Chaiyapechara, S., Chen, W. N., Colyer, L., Karoonuthaisiri, N., Keeffe, G., McKinley, J., Petchkongkaew, A., Rungrassamee, W., & Elliott, C. T. (2026). Challenges and strategies for globally resilient shrimp aquaculture. *npj Science of Food*. Advance online publication. doi:10.1038/s41538-026-00787-7
- Cooke, S. J., et al. (2023). Natural disasters and aquatic ecosystems: A synthesis of geophysical impacts across realms and taxa. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 33(2), 345–367. doi:10.1007/s11160-023-09773-2
- Davis, G. C. (2025). *Impacts of extreme weather conditions on coastal fisheries near Bayou Teche, Louisiana from 2019–2023* (Master's thesis). Louisiana State University, Graduate School.
- Dede, K., & Çek, S. (2025). Dietary incorporation of *Bacillus subtilis* enhances growth performance, survival rate, gametogenesis, and intestinal health in zebrafish (*Danio rerio*). *Israeli Journal of Aquaculture Bamidgeh*, 77(1), 19–29. doi:10.46989/001c.129030
- Demirci, A., Şimşek, E., Kale, S., & Demirci, S. (2024). Early effects of the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes on the fishery sector and suggestions for process management: The case of Hatay. *Acta Natura et Scientia*, 5(1), 41–50. doi:10.61326/actanatsci.v5i1.5
- Drobac Backović, D., & Tokodi, N. (2024). Blue revolution turning green? A global concern of cyanobacteria and cyanotoxins in freshwater aquaculture: A literature

- review. *Journal of Environmental Management*, 360, 121115. doi:10.1016/j.jenvman.2024.121115
- Ewald, C. O., & Kamm, K. (2025). On the impact of biological risk in aquaculture valuation and decision making. *Aquaculture*, 603, 742368. doi:10.1016/j.aquaculture.2025.742368
- Fernandes-Salvador, J. A., Davidson, K., Maguire, J., et al. (2021). North-East Atlantic shellfish harmful algal bloom forecasting: Current systems and future perspectives. *Frontiers in Marine Science*, 8, 666583. doi:10.3389/fmars.2021.666583
- Filipe, J. F., Herrera, V., Curone, G., Vigo, D., & Riva, F. (2020). Floods, hurricanes, and other catastrophes: A challenge for the immune system of livestock and other animals. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 16. doi:10.3389/fvets.2020.00016
- Fong, C. R., Frazier, M., Clawson, G., Epperly, H., Froehlich, H. E., & Halpern, B. S. (2024). Downscaled climate change threats to United States freshwater finfish aquaculture. *Science of the Total Environment*, 957, 177596. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.177596
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *The state of world fisheries and aquaculture 2024*. FAO.
- Froehlich, H. E., Koehn, J. Z., Holsman, K. K., & Halpern, B. S. (2022). Emerging trends in science and news of climate change threats to and adaptation of aquaculture. *Aquaculture*, 549, 737812. doi:10.1016/j.aquaculture.2021.737812

- Hallegraeff, G. M. (1993). A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32(2), 79–99. doi:10.2216/i0031-8884-32-2-79.1
- Hégaret, H., Wikfors, G. H., & Soudant, P. (2007). Flow cytometric analysis of haemocytes from eastern oysters exposed to harmful algae. *Aquaculture*, 271(1–4), 540–549. doi:10.1016/j.aquaculture.2007.06.029
- Hoagland, P., Anderson, D. M., Kaoru, Y., & White, A. W. (2002). The economic effects of harmful algal blooms in the United States: Estimates, assessment issues, and information needs. *Estuaries*, 25(4), 819–837. doi:10.1007/BF02804908
- Hossain, T., Haque, M. W., & Kabir, M. H. (2022). Resilience to natural disasters: A case study on southwestern region of coastal Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Management*, 4(2), 91–108. doi:10.18485/ijdrm.2022.4.2.6
- Hsiao, Y.-H., Chen, C.-C., Ho, C.-H., Chao, Y.-C., Hsu, C.-T., Li, H.-C., & Yeh, K.-C. (2025). Analysis of the impact of flood disasters on aquaculture in a warming scenario – with aquaculture in Pingtung County as an example. *Journal of Water & Climate Change*, 16(11), 3416–3435. doi:10.2166/wcc.2025.110
- Imamura, F., Suppasri, A., Arikawa, T., Koshimura, S., Satake, K., & Tanioka, Y. (2022). Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure and Applied Geophysics*, 179(5), 1549–1560. doi:10.1007/s00024-022-03058-0
- Jeyachandran, S. (2025). Review on climate change, microbial resilience, and disease risks in global aquaculture

- systems. *Comparative Immunology Reports*, 9, 200240. doi:10.1016/j.cirep.2025.200240
- Lam, P. T., Tinh, P. H., Isaac-Lam, M. F., & Dien, N. T. (2024). Economic losses and damages in aquaculture production caused by extreme weather events: An empirical assessment at the household scale in Quang Ngai province, Vietnam. *Environmental Systems and Decisions*. Advance online publication. doi.org/10.1007/s13412-024-00993-3
- Landsberg, J. H. (2002). The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms. *Reviews in Fisheries Science*, 10(2), 113–390. doi:10.1080/20026491051695
- Lefebvre, K. A., & Robertson, A. (2010). Domoic acid and human exposure risks: A review. *Toxicon*, 56(2), 218–230. doi:10.1016/j.toxicon.2009.05.034
- Ma, Z., Xu, H., Newton, R., Benter, A., Fang, D. S., Wang, C., Little, D., & Zhang, W. (2025). Aquaculture industry composition, distribution, and development in China. *Sustainability*, 17, 11331. doi:10.3390/su172411331
- Mazlum, Y., Yazıcı, M., Çek, Ş., Naz, M., Türkmen, M., Uzunmehmetoğlu, O. Y., & Dede, K. (2025). Effects of dietary supplementation with *Codium fragile* and fennel essential oil on growth, enzyme activity, and hepatopancreas histology in juvenile narrow-clawed crayfish (*Pontastacus leptodactylus* Eschscholtz, 1823). *Turkish Journal of Zoology*, 49(4), 220–232. doi:10.55730/1300-0179.3227
- Mello, D. F., Proença, L. A. O., & Barracco, M. A. (2010). Comparative study of various immune parameters in oysters exposed to harmful algal blooms. *Aquatic*

- Toxicology*, 97(2), 160–170.
doi:10.1016/j.aquatox.2009.12.007
- Moss, A., Peh, J. H., Afiqah-Aleng, N., Segaran, T. C., Gao, H., Wang, P., Handayani, K. S., Lananan, F., Wei, L. S., Fitzer, S., & Azra, M. N. (2025). Aquaculture and climate change: A data-driven analysis. *Annals of Animal Science*, 25(2), 547–568. doi:10.2478/aoas-2024-0085
- Muhala, V., Chicombo, T. F., Macate, I. E., Guimarães-Costa, A., Gundana, H., Malichocho, C., Hasimuna, O. J., Remédio, A., Maulu, S., Cuamba, L., Bessa-Silva, A. R., & Sampaio, I. (2021). Climate change in fisheries and aquaculture: Analysis of the impact caused by Idai and Kenneth cyclones in Mozambique. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 714187. doi:10.3389/fsufs.2021.714187
- Nakamura, M., Hattori, T., & Kariya, M. (2022). Comparison of structural changes in the agriculture and fisheries industries before and after the Great East Japan Earthquake: A case study of Iwate Prefecture's coastal area. *Fisheries Science*, 88(3), 345–361. doi:10.1007/s12562-021-01579-6
- Neis, B., Gao, W., Cavalli, L., Thorvaldsen, T., Holmen, I. M., Jeebhay, M. F., López Gómez, M. A., Ochs, C., Watterson, A., Beck, M., & Tapia-Jopia, C. (2023). Mass mortality events in marine salmon aquaculture and their influence on occupational health and safety hazards and risk of injury. *Aquaculture*, 566, 739225. doi:10.1016/j.aquaculture.2022.739225
- Oh, J.-W., Pushparaj, S. S. C., Muthu, M., & Gopal, J. (2023). Review of harmful algal blooms (HABs) causing

- marine fish kills: Toxicity and mitigation. *Plants*, 12(23), 3936. doi:10.3390/plants12233936
- Okuda, K., & Ohashi, M. (2012). On the studies of recovery and reconstruction of fisheries hit by the Great East Japan Earthquake. *Procedia Technology*, 5, 208–214. doi:10.1016/j.protcy.2012.09.023
- Partelow, S., Nagel, B., Gentry, R., Gephart, J. A., & Rocha, J. (2025). Archetypes of aquaculture development across 150 countries. *Aquaculture*, 595, 741484. doi:10.1016/j.aquaculture.2024.741484
- Pham, T. L., Pham, H. T., Isaac-Lam, M. F., & Nguyen, T. D. (2025). Economic losses and damages in aquaculture production caused by extreme weather events: An empirical assessment at the household scale in Quang Ngai province, Vietnam. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 15(4), 899–915. doi:10.1007/s13412-024-00993-3
- Putra, R. D., Siringoringo, R. M., Abrar, M., Puranamasari, N. W., Bengen, D. G., Zamani, N. P., Subhan, B., Aji, L. P., Giyanto, Almanar, I. P., & Dollu, E. A. (2025). Reef fish resilience following a significant earthquake disaster in the Nias Islands, Indonesia. *Biodiversitas*, 26(4), 1836–1845. doi:10.13057/biodiv/d260433
- Rahman, M. A., Kanon, K. F., Islam, M. J., Mojumdar, S., Ashik, A., & Molla, M. H. R. (2022). Impacts of climate change on aquaculture and fisheries: An integrated approach for adaptation and mitigation. *Journal of Biological Studies*, 5(1), 171–188.
- Ramenzoni, V. C., Borroto Escuela, D., Rangel Rivero, A., González-Díaz, P., Vázquez Sánchez, V., López-Castañeda, L., Falcón Méndez, A., Hernández Ramos,

- I., Hernández López, N. V., Besonen, M. R., & Yoskowitz, D. (2020). Vulnerability of fishery-based livelihoods to extreme events: Local perceptions of damages from Hurricane Irma and Tropical Storm Alberto in Yaguajay, Central Cuba. *Coastal Management*, 48(5), 354–377. doi:10.1080/08920753.2020.1802198
- Sarıcan, D., & Aktar, H. (2025). Türkiye'de su ürünleri sektörünün mevcut durumu: Üretim, tüketim ve dış ticaret. In O. Karkacığer (Ed.), *Alternatif tarımsal üretim sistemleri ve ekonomisi* (pp. 176–190).
- Scholtens, B., & Oueghlissi, R. (2020). Shocks and fish stocks: The effect of disasters and policy announcements on listed fishing companies' market value. *Business Strategy and the Environment*, 29(8), 3636–3668. doi:10.1002/bse.2601
- Shigihara, Y., Tanaka, K., Suppasri, A., Takagawa, T., Yamamoto, A., Sasaki, D., & Imamura, F. (2025). A new index for assessing aquaculture facility damage caused by tsunamis using a drifting model: A case study of the 2022 Tonga eruption tsunami. *Coastal Engineering Journal*, 67(3), 471–494. doi:10.1080/21664250.2025.2513744
- Shovon, M. A. C., Mostafiz, R. B., Al Assi, A., & Rohli, R. V. (2025). Hydroclimatic extremes and aquaculture: A review of impact and response strategies. *Aquaculture International*, 33(439), 439–482. doi.org/10.1007/s10499-025-02108-3
- Supratid, S., & Srivichai, M. (2013). Restoration of coastal ecosystems and fisheries in Thailand after Northern Sumatra earthquake and tsunami disasters. *Journal of International Fisheries Symposium*, 10, 17–26.

- Trainer, V. L., Moore, S. K., Hallegraeff, G. M., Kudela, R. M., Clement, A., Mardones, J. I., & Cochlan, W. P. (2020). Pelagic harmful algal blooms and climate change: Lessons from nature's experiments with extremes. *Harmful Algae*, 91, 101591. doi:10.1016/j.hal.2019.03.009
- Ulusoy, N., Çek, Ş., & Yıldırım, Y. B. (2026). Impacts of the February 6, 2023 earthquakes on aquarium fish farming and retail aquarium enterprises: Hatay province case study. *Acta Aquatica Turcica*, 22(2), 220204. doi:10.22392/actaquatr.1857317
- Wang, L., Hu, S., Han, J.-C., Hu, P., & Yu, X. (2024). Mitigation measures of storm surge inundation at an onshore aquaculture farm. *Journal of Hydrology*, 638, 131443. doi:10.1016/j.jhydrol.2024.131443
- Yadav, N. K., Patel, A. B., Singh, S. K., Mehta, N. K., Anand, V., Lal, J., Dekari, D., & Devi, N. C. (2024). Climate change effects on aquaculture production and its sustainable management through climate-resilient adaptation strategies: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 31731–31751. doi:10.1007/s11356-024-33397-5
- Yanık, T. (2022). Aquaculture in Turkey. *Current Trends in Natural Sciences*, 11(21), 481–486. doi:10.47068/ctns.2022.v11i21.052
- Zhang, T., Wang, W., Li, X., & Shi, W. (2023). Vibration mitigation of an integrated structure consisting of a monopile offshore wind turbine and aquaculture cage under earthquake, wind, and wave loads. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 30(4), 627–646. doi:10.1080/15376494.2021.2020941

Zhang, Y., Qu, H., & Yang, S. (2026). Impact of extreme climate risk on Chinese freshwater aquaculture production. *Fishes*, 11(1), 69.
doi:10.3390/fishes11010069

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE MİKORNA'LARIN ROLÜ: BALIKLARDA MOLEKÜLER ETKİ MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ

Altuğ KÜÇÜKGÜL¹

Azime KÜÇÜKGÜL²

Zuhal KARAMAN³

1. GİRİŞ

Su Ürünleri sektörü, gıda güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir doğal kaynak yönetimi açısından stratejik öneme sahip alanların başında gelmektedir. Küresel ölçekte hızlı bir büyüme gösteren balık yetiştiriciliği, doğal balık stokları üzerindeki av baskısını azaltması, gıda arzına önemli katkı sağlaması ve istihdam oluşturarak ekonomik kalkınmayı desteklemesi bakımından su ürünleri sektörünün sürdürülebilir gelişiminde kritik bir rol üstlenmektedir (FAO, 2024).

Bununla birlikte, balık yetiştiriciliği faaliyetlerinde yavru kalitesindeki değişkenlik, artan yem maliyetleri, hastalık salgınlarının yaygınlaşması, yabancı türlerle meydana gelen melezlenmeler ile çevresel ve antropojenik baskılar gibi çok boyutlu sorunlar sıklıkla ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu problemlerin çözümüne yönelik olarak çok sayıda

¹ Prof. Dr., Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Veteriner Fakültesi, Biyokimya Bölümü, Serinyol/Hatay, ORCID: 0000-0003-4387-6814.

² Prof. Dr., Munzur Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, Yetiştiricilik Bölümü, Hastalıklar Anabilim Dalı, Aktuluk/Tunceli, ORCID: 0000-0002-0515-6667.

³ Dr., Munzur Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, Yetiştiricilik Bölümü, Hastalıklar Anabilim Dalı, Aktuluk/Tunceli, ORCID: 0000-0002-2499-7752.

araştırmacı, yetiştiricilik sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik biyolojik mekanizmaları ve potansiyel iyileştirme stratejilerini kapsamlı biçimde incelemektedir.

Özellikle büyüme performansı ve hastalıklara karşı direnç gibi ekonomik açıdan kritik öneme sahip özelliklerin geliştirilmesinde seçici yetiştirme uygulamaları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, su ürünlerinin küresel ölçekte önemli bir besin kaynağı olması, yetiştiricilikte daha ileri ve bütüncül yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, fonksiyonel genomik alanına yönelik çalışmaların önemi giderek artmaktadır. Zira balıklarda büyüme, bağışıklık sistemi ile diğer gelişimsel ve fizyolojik süreçlerin moleküler düzeyde düzenlenmesine ilişkin mekanizmaların ortaya konulması, sürdürülebilir ve yüksek verimli yetiştiricilik uygulamalarının geliştirilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Rasal ve ark., 2024).

Son zamanlarda fonksiyonel genomik kapsamında öne çıkan araştırma alanlarından olan mikroRNA'lar (miRNA) gen ekspresyonunun düzenlenmesinde rol oynamaktadır. Yaklaşık 18-25 nükleotid uzunluğundaki bu küçük kodlamayan RNA molekülüleri, hedef mRNA'ların translasyonunu baskılayarak veya yıkımını teşvik ederek çok sayıda biyolojik sürecin ince ayarlı kontrolünü sağlamaktadır (Lee ve ark, 1993). Balıklarda gerçekleştirilen çalışmalar, miRNA'ların büyüme, gelişim, metabolizma, üreme, stres yanıtı ve bağışıklık mekanizmalarının düzenlenmesinde kritik işlevlere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle miRNA temelli araştırmalar, ekonomik açıdan önemli türlerde verimliliğin artırılması, hastalıklara karşı dayanıklılığın geliştirilmesi ve yetiştiricilik koşullarına adaptasyonun iyileştirilmesi amacıyla yeni biyobelirteçlerin ve moleküler seleksiyon stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır. Bu bağlamda bu derlemede, balıklarda miRNA'ların biyogenezi, etki mekanizmaları ve özellikle

büyüme ile bağışıklık süreçlerindeki düzenleyici rolleri güncel literatür ışığında ele alınarak, su ürünleri yetiştiriciliğinde miRNA temelli uygulamaların potansiyeli ve gelecekteki araştırma perspektifleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilecektir.

2. GEN EKSPRESYONUNUN DÜZENLENMESİNDE MİKRORNA'LARIN ROLÜ

Genetik bilginin depolanması, aktarılması ve nesiller boyunca korunması tüm canlı organizmalarda deoksiribonükleik asit (DNA) tarafından sağlanmaktadır. DNA üzerinde bulunan genler, protein kodlayan ekzon (exon) bölgeleri ile protein kodlamayan intron dizilerinden oluşmaktadır. Uzun yıllar boyunca intronlar ve diğer kodlamayan genomik bölgeler biyolojik açıdan işlevsiz kabul edilerek “çöp DNA (junk DNA)” olarak tanımlanmış olsa da, genomik ve transkriptomik teknolojilerindeki gelişmeler bu yaklaşımın önemli ölçüde değişmesine yol açmıştır. Günümüzde ökaryotik genomların büyük bir bölümünün protein kodlamayan ancak gen ekspresyonunun düzenlenmesinde görev alan fonksiyonel diziler içerdiği bilinmektedir (Mattick, 2001; Eddy, 2001). Özellikle bu bölgelerden sentezlenen kodlamayan RNA'ların (non-coding RNA; ncRNA), transkripsiyonel, post-transkripsiyonel ve epigenetik düzeylerde gen düzenleme mekanizmalarına katıldığı ve hücresel homeostazın sürdürülmesinde kritik işlevler üstlendiği gösterilmiştir (Esteller, 2011).

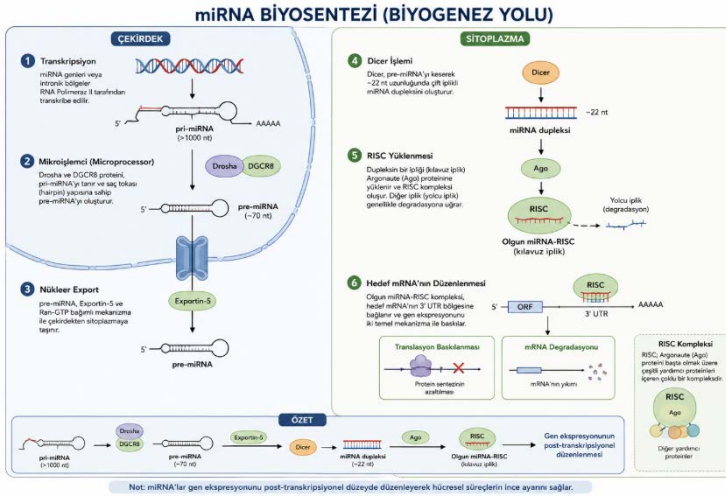
Moleküler biyolojinin merkezi, genetik bilgi DNA'dan RNA'ya, RNA'dan ise proteine aktarılmaktadır. Bu süreçte mesajcı RNA (mRNA), transfer RNA (tRNA) ve ribozomal RNA (rRNA) protein sentezinin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. mRNA genetik bilginin ribozomlara taşınmasını sağlarken, tRNA amino asitlerin doğru sırada

polipeptit zincirine eklenmesine aracılık etmekte, rRNA ise ribozomun yapısal ve katalitik çekirdeğini oluşturarak translasyonun gerçekleşmesini sağlamaktadır (Alberts ve ark., 2015). Bununla birlikte, son yıllarda gerçekleştirilen yüksek kapasiteli genomik çalışmalar hücrel transkriptomun önemli bir kısmının protein kodlamayan RNA'lardan meydana geldiğini ortaya koymuştur (de Souza ve ark., 2012). Bu RNA'lar arasında küçük nükleer RNA (snRNA), küçük nükleolar RNA (snoRNA), uzun kodlamayan RNA (lncRNA), dairesel RNA (circRNA), PIWI-etkileşimli RNA (piRNA) ve mikroRNA'lar (miRNA) yer almaktadır. Özellikle küçük kodlamayan RNA sınıfında bulunan miRNA'lar, hedef genlerin ekspresyonunu post-transkripsiyonel düzeyde düzenleyerek çok sayıda biyolojik sürecin kontrolünde görev almaktadır (Bartel, 2004; He ve Hannon, 2004).

İlk kez Lee ve ark. (1993) tarafından *Caenorhabditis elegans*'ta tanımlanan bu moleküller, daha sonraki çalışmalarda bitkilerden memelilere kadar çok geniş bir organizma grubunda korunmuş gen düzenleyicileri olarak tanımlanmıştır. miRNA'lar bağımsız transkripsiyon birimlerinden, protein kodlayan genlerin intronik bölgelerinden veya polikistronik transkriptlerden köken alabilmekte ve gen ekspresyonunun ince ayarını sağlayan önemli düzenleyici moleküller olarak görev yapmaktadır (Bartel, 2004).

miRNA biyogenezi, çekirdek ve sitoplazmada gerçekleşen çok aşamalı bir süreçtir. İlk olarak RNA polimeraz II tarafından sentezlenen primer miRNA (pri-miRNA) transkriptleri, Drosha ve DGCR8 proteinlerinden oluşan mikroişlemci (microprocessor) kompleksi tarafından işlenerek yaklaşık 70 nükleotid uzunluğundaki saç tokası yapısına sahip prekürsör miRNA'lara (pre-miRNA) dönüştürülmektedir. Daha sonra Exportin-5 aracılığıyla sitoplazmaya taşınan pre-miRNA'lar, RNase III ailesine ait Dicer enzimi tarafından kesilerek çift iplikli miRNA duplekslerini oluşturmaktadır. Bu

duplekslerden biri Argonaute proteinlerini içeren RNA kaynaklı susturma kompleksine (RNA-induced silencing complex; RISC) yüklenerek fonksiyonel olgun miRNA'yı meydana getirirken, diğer iplik çoğunlukla degradasyona uğramaktadır. Olgun miRNA-RISC kompleksi hedef mRNA'nın genellikle 3'-UTR bölgesine bağlanarak translasyonun baskılanmasına veya mRNA'nın yıkımına neden olmakta ve böylece protein sentezinin hassas bir şekilde düzenlenmesini sağlamaktadır (He ve Hannon, 2004; Winter ve ark., 2009).



Resim. 1. MikroRNA Biyogenezinin Moleküler Mekanizması

miRNA aracılı gen düzenleme mekanizmaları, hücrenin proliferasyon, farklılaşma, apoptoz, metabolizma, organ gelişimi, bağışıklık yanıtı ve çevresel stres adaptasyonu gibi çok sayıda biyolojik sürecin kontrolünde görev almaktadır (Bushati ve Cohen, 2007). Bu nedenle miRNA ekspresyonundaki değişimlerin gelişimsel bozukluklar, metabolik hastalıklar, enfeksiyonlar ve çeşitli patolojik durumlarla ilişkili olduğu bildirilmektedir. Günümüzde miRNA'lar yalnızca temel biyolojik süreçlerin düzenleyicileri olarak değil, aynı zamanda biyobelirteç, tanısal araç ve potansiyel terapötik hedefler olarak da değerlendirilmektedir. Özellikle son yıllarda su ürünleri

yetiştiriciliği alanında yürütülen çalışmalar, miRNA'ların büyüme, gelişim, bağışıklık ve hastalık direnci mekanizmalarının anlaşılmasında önemli moleküler göstergeler olduğunu ortaya koymuş ve bu molekülleri akuakültür araştırmalarının odak noktalarından biri haline getirmiştir.

3. BALIKLARDA MİKRORNA'LAR VE SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNE YANSIMALARI

Su ürünleri, yüksek biyolojik değere sahip proteinler, dengeli esansiyel amino asit profili, uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitleri (LC-PUFA), vitaminler ve temel mikro besin öğeleri bakımından insan beslenmesinde önemli bir gıda grubu olarak değerlendirilmektedir (Tekinşen ve Gökmen, 2007). Özellikle balıklar, yüksek sindirilebilirlik ve kaliteli protein içeriği ile hayvansal protein kaynakları arasında ayrıcalıklı bir konuma sahip olup, eikosapentaenoik asit (EPA) ve dokosaheksaenoik asit (DHA) gibi omega-3 yağ asitlerinin başlıca doğal kaynaklarını oluşturmaktadır (WHO, 2023). Bunun yanı sıra B12 ve D vitaminleri ile iyot, selenyum, çinko, fosfor ve demir gibi mikro besin öğeleri açısından zengin olmaları, su ürünlerinin insan sağlığı üzerindeki besleyici değerini artırmaktadır. Bu bileşenlerin birlikte etkisiyle düzenli su ürünleri tüketiminin kardiyovasküler sağlık, nörolojik gelişim, bağışıklık fonksiyonları ve kemik metabolizması üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmektedir (WHO, 2023). Bu çerçevede su ürünleri, yalnızca temel bir besin kaynağı değil, aynı zamanda küresel beslenme güvenliğinin sürdürülebilirliğine katkı sağlayan stratejik bir gıda bileşeni olarak kabul edilmektedir.

Artan küresel nüfus, kentleşme ve yüksek kaliteli protein talebindeki sürekli yükseliş, su ürünlerini küresel gıda

sistemlerinin merkezine yerleştirmiştir (FAO, 2024). Doğal stoklar üzerindeki avcılık baskısının sürdürülebilir sınırlarına ulaşmasıyla birlikte, üretim ihtiyacının karşılanmasında su ürünleri yetiştiriciliği (akuakültür) belirleyici bir rol üstlenmiştir. Günümüzde akuakültür, dünya genelinde en hızlı büyüyen gıda üretim alanlarından biri olup birçok bölgede avcılığa dayalı üretimi aşmış durumdadır. Modern akuakültür sistemi, üretim teknolojileri, yem geliştirme, genetik iyileştirme, hastalık yönetimi, işleme ve pazarlama süreçlerini kapsayan entegre bir endüstriyel yapı hâline gelmiştir. Bu sektör, doğrudan ve dolaylı istihdam oluşturarak kırsal kalkınmayı desteklemekte, ulusal ekonomilere katkı sağlamakta ve dış ticarete önemli bir gelir kaynağı oluşturmaktadır. Bu yönüyle su ürünleri yetiştiriciliği, yalnızca gıda üretimi değil, aynı zamanda gıda güvenliği, ekonomik sürdürülebilirlik ve mavi ekonomi politikalarının temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Su ürünleri, beslenme, ekonomik ve ekolojik işlevlerinin yanı sıra moleküler ve fonksiyonel biyoloji araştırmaları açısından da önemli model sistemler arasında yer almaktadır. Son yıllarda genomik ve transkriptomik teknolojilerdeki ilerlemeler, balıklarda büyüme, gelişim, metabolik süreçler, çevresel stres yanıtları ve bağışıklık mekanizmaları gibi ekonomik açıdan kritik özelliklerin moleküler düzeyde ayrıntılı olarak incelenmesine imkân sağlamıştır. Bu gelişmeler, gen ekspresyonunun düzenlenmesinde rol oynayan çok katmanlı kontrol mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına katkı sunarken, özellikle kodlamayan RNA'ların fonksiyonel önemini ön plana çıkarmıştır.

Son yıllarda fonksiyonel genomik araştırmaların önemli odak noktalarından biri haline gelen mikroRNA'lar (miRNA'lar), gen ekspresyonunun post-transkripsiyonel düzeyde düzenlenmesinde görev alan küçük kodlamayan RNA molekülüleri olarak tanımlanmaktadır. Balıklarda miRNA

araştırmaları 2000’li yılların başından itibaren hız kazanmış, özellikle zebra balığının (*Danio rerio*) model organizma olarak yaygın kullanımı, miRNA biyogenezi, embriyonik gelişim ve gen düzenleme mekanizmalarının aydınlatılmasına önemli katkılar sağlamıştır. Bunu takiben Atlantik somonu (*Salmo salar*), gökkuşuğu alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*), çipura (*Sparus aurata*) ve tilapia (*Oreochromis niloticus*) gibi ekonomik öneme sahip türlerde çok sayıda miRNA tanımlanmış ve bu moleküllerin gelişimsel ve fizyolojik süreçlerdeki fonksiyonel rolleri ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, miRNA’ların yalnızca büyüme ve gelişim süreçlerinin düzenlenmesinde değil, aynı zamanda hipoksi, tuzluluk değişimleri, ağır metal maruziyeti (Sitjà-Bobadilla ve ark., 2016) çevresel kirleticiler ile bakteriyel ve viral enfeksiyonlar gibi çeşitli biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı verilen hücrel yanıtın şekillendirilmesinde de rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca alternatif yem uygulamaları gibi yetiştiricilik temelli besleme stratejilerinin de miRNA ekspresyon profillerini etkileyebildiği belirlenmiştir. Bu durum, su ürünleri araştırmalarında genetik yapının tanımlanmasının ötesine geçilerek gen ekspresyonunun çevresel ve fizyolojik bağlamda düzenlenme dinamiklerinin anlaşılmasına yönelik bir paradigma değişimine işaret etmektedir.

Moleküler düzeyde miRNA’lar, hedef mRNA’ların translasyonunu baskılayarak veya degradasyonunu indükleyerek çok sayıda biyolojik sürecin düzenlenmesinde görev almaktadır. Bu sürecin temelini oluşturan Drosha ve Dicer enzimleri ile Argonaute proteinlerini içeren RISC kompleksi, miRNA aracılı gen susturma mekanizmasının işlevsel çekirdeğini oluşturmaktadır. Özellikle zebra balığı embriyolarında miRNA biyogenezinin bozulması veya Dicer fonksiyonunun kaybı, ciddi gelişimsel anomalilere yol açmakta ve miRNA’ların embriyonik gelişim için vazgeçilmez olduğunu ortaya koymaktadır. Bu

süreçte miR-430 ailesi, maternal-zygotik geçiş aşamasında maternal mRNA'ların yıkımını düzenleyerek embriyonun kendi transkripsiyonel programının aktive edilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Gelişimsel süreçlerin yanı sıra miRNA'ların bağışıklık yanıtı ve stres adaptasyonundaki rolleri de giderek daha iyi tanımlanmaktadır; özellikle viral enfeksiyonlara karşı oluşan konak yanıtında miRNA biyogenez yollarının dinamik olarak değiştiği bildirilmiştir. Bununla birlikte miRNA'ların primordial germ hücrelerinin korunması, vücut planının düzenlenmesi ve organogenez süreçlerinin kontrolü gibi temel gelişimsel mekanizmalar ile genotoksik stres ve DNA hasar yanıtı süreçlerinin düzenlenmesinde de görev aldığı ortaya konmuştur. Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, miRNA'ların balıklarda embriyonik gelişimden bağışıklık yanıtına, stres adaptasyonundan genom stabilitesinin korunmasına kadar uzanan geniş bir biyolojik ağın merkezi düzenleyicileri olduğu ve su ürünleri biyolojisi ile akuakültür araştırmalarında temel bir çalışma alanı oluşturduğu anlaşılmaktadır.

4. BALIKLARDA miRNA EKSPRESYONUNU DÜZENLEYEN FAKTÖRLER GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE BULGULAR

MikroRNA'lar (miRNA'lar), yalnızca genetik programın bir parçası olmayıp aynı zamanda organizmanın çevresel uyarılara verdiği moleküler yanıtın önemli bir bileşeni olarak görev yapmaktadır. Bu nedenle balıklarda miRNA ekspresyonu sabit bir düzeyde olmayıp, tür, doku ve gelişim evresine bağlı içsel faktörlerin yanı sıra çevresel koşullar ve fizyolojik streslere bağlı olarak yukarı veya aşağı yönde düzenlenebilmektedir. Dolayısıyla miRNA ekspresyonunu etkileyen faktörlerin anlaşılması hem temel biyolojik süreçlerin aydınlatılması hem

de su ürünleri yetiştiriciliğinde verimlilik ve hastalıklara direnç gibi ekonomik açıdan önemli özelliklerin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

4.1. Çevresel Faktörler

Balıklarda miRNA'lar, çevresel değişimlere karşı gelişen fizyolojik ve moleküler adaptasyon mekanizmalarının düzenlenmesinde önemli rol oynayan düzenleyici moleküllerdir. Günümüzde sıcaklık değişimleri, hipoksi, tuzluluk farklılıkları, ağır metal ve kimyasal kirleticilere maruziyet gibi çevresel stres faktörlerinin miRNA ekspresyon profillerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Özellikle sıcaklık stresine bağlı olarak çeşitli balık türlerinde farklılaşan miRNA yanıtları tanımlanmıştır. Atlantik somonunda (*Salmo salar*) ani sıcaklık düşüşü koşullarında miR-210 ve miR-30d ekspresyonlarının arttığı ve bu miRNA'ların metabolik yeniden düzenlenme süreçlerinde görev aldığı bildirilmiştir (Bizuayehu ve ark., 2015). Benzer şekilde Chinook somonunda (*Oncorhynchus tshawytscha*) sıcaklık stresine bağlı miRNA değişimleri tanımlanırken (Tomalty ve ark., 2015), Nil tilapyasında (*Oreochromis niloticus*) miR-202 ve miR-200 ailesinin sıcaklığa bağlı cinsiyet farklılaşması mekanizmalarında rol oynadığı gösterilmiştir (Wang ve ark., 2017). Hipoksi de balıklarda en yaygın çalışılan çevresel stres faktörlerinden biri olup, "hipoksamiR" olarak tanımlanan miR-210'un birçok türde ekspresyonunun arttığı ve HIF-1 α sinyal yolunun düzenlenmesinde görev aldığı ortaya konmuştur (Zhang ve ark., 2018). Atlantik somonunda hipoksi ve enerji metabolizması ile ilişkili miRNA'lar tanımlanırken (Mennigen ve ark., 2013), deniz medakasında (*Oryzias melastigma*) hipoksi koşullarının yumurtalık dokusunda çok sayıda miRNA'nın ekspresyonunu değiştirerek steroidogenez ile ilişkili genlerin düzenlenmesini etkilediği bildirilmiştir (Baumgart ve ark., 2017). Bu bulgular, miRNA'ların çevresel stres altında yalnızca metabolik süreçleri

değil, aynı zamanda üreme fonksiyonlarını da düzenlediğini göstermektedir.

Osmotik stres ve çevresel kirleticiler de miRNA aracılı düzenleme mekanizmalarının önemli bileşenleri arasında yer almaktadır. Tuzluluk değişimlerine bağlı olarak Japon yılanbalığında (*Anguilla japonica*) miR-30 ve Mozambik tilapyasında (*Oreochromis mossambicus*) miR-8 ekspresyonunun belirgin şekilde arttığı, bu miRNA'ların osmoregülasyon ve iyon dengesiyle ilişkili genlerin kontrolünde görev aldığı bildirilmiştir (Kültz ve ark., 2015). Ağır metaller ve diğer kimyasal kirleticiler de miRNA ekspresyonunda önemli değişimlere neden olmaktadır. Sazanlarda (*Cyprinus carpio*) ağır metal maruziyeti ve kışlama süreçlerinde farklılaşan çok sayıda miRNA rapor edilmiş (Ademek ve ark., 2013), çipurada (*Sparus aurata*) ise kadmiyum maruziyetinin miR-33 ekspresyonunu baskılayarak lipid metabolizmasını olumsuz etkilediği gösterilmiştir (Dalmau ve ark., 2019). Ayrıca kadmiyum, bakır ve pestisit gibi toksik ajanların miR-21 ve miR-122 gibi metabolizma ve stres yanıtlarıyla ilişkili miRNA'ların ekspresyonunu değiştirdiği bildirilmiştir.

Çevresel koşullara bağlı fizyolojik adaptasyonlarda fotoperiyot, beslenme uygulamaları, egzersiz ve farmakolojik ajanlar da miRNA ekspresyonunu etkileyen önemli faktörlerdir. Atlantik somonunda smoltifikasyon sürecinde gün uzunluğuna bağlı olarak miR-7 ve miR-25 düzeylerinde değişimler meydana geldiği belirlenmiştir (Andreassen ve ark., 2016). Sürekli yüzme egzersizinin zebra balığında (*Danio rerio*) kas dokusunda miR-499 ekspresyonunu artırarak kas lifi dönüşümünü desteklediği gösterilirken (Magnoni ve ark., 2018), Avrupa levreğinde (*Dicentrarchus labrax*) n-3 PUFA uygulamalarının ve çipurada yem ikamesi stratejilerinin miRNA profillerini etkilediği bildirilmiştir (Rimoldi ve ark., 2016). Bunun yanı sıra florfenikol gibi farmakolojik uygulamaların sazanlarda miR-21

ekspresyonunu baskılayarak bağışıklık yanıtını değiştirebildiği rapor edilmiştir (Liu ve ark., 2019). Son yıllarda elde edilen bulgular, çevresel stres faktörlerine bağlı olarak değişen miRNA ekspresyon profillerinin yalnızca adaptasyon mekanizmalarının anlaşılmasında değil, aynı zamanda çevresel izleme ve sağlık değerlendirmelerinde kullanılabilecek potansiyel biyobelirteçler olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir (Cao ve ark., 2023).

4.2. Biyolojik Faktörler

Balıklarda miRNA araştırmalarının en yoğunlaştığı alanlardan biri bağışıklık sistemi ve konak-patojen etkileşimleridir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, miRNA'ların viral, bakteriyel ve paraziter enfeksiyonlara karşı gelişen doğal ve kazanılmış bağışıklık yanıtlarının düzenlenmesinde kritik roller üstlendiğini ortaya koymuştur. Patojen maruziyeti sonrasında konak hücrelerde miRNA ekspresyon profillerinde meydana gelen değişiklikler, inflamasyonun kontrolü, sitokin üretimi, interferon sinyalizasyonu ve hücresel savunma mekanizmalarının düzenlenmesinde görev almaktadır. Bu nedenle miRNA'lar, enfeksiyon süreçlerinin moleküler düzeyde anlaşılmasında önemli biyolojik belirteçler olarak değerlendirilmektedir.

Viral enfeksiyonlar sırasında bağışıklıkla ilişkili çok sayıda miRNA'nın farklı düzeylerde eksprese olduğu gösterilmiştir. Atlantik somonunda (*Salmo salar*) enfeksiyöz pankreatik nekroz virüsü (IPNV) ve *Piscine orthoreovirus* (PRV) enfeksiyonları sırasında miR-1, miR-146 ve miR-210'un bağışıklık yanıtlarının düzenlenmesinde rol aldığı bildirilmiştir (Eikeland ve ark., 2015). Benzer şekilde gökkuşağı alabalığında (*Oncorhynchus mykiss*) viral hemorajik sepsis virüsü (VHSV) ve enfeksiyöz hematopoietik nekroz virüsü (IHNV) enfeksiyonlarına karşı oluşan konak yanıtlarında miR-1, miR-

133 ve miR-206'nın görev aldığı belirlenmiştir (Bizuayehu ve ark. 2012; Andreassen ve ark. 2017). Özellikle VHSV enfeksiyonu sonrasında miR-146a ekspresyonunun önemli ölçüde arttığı ve interferon aracılı antiviral savunma mekanizmalarının düzenlenmesinde rol oynadığı rapor edilmiştir (Andreassen ve ark., 2017). Benzer şekilde sazanda (*Cyprinus carpio*) koi herpes virüsü (KHV) enfeksiyonunun miR-21, miR-155 ve miR-200b gibi miRNA'ların ekspresyonunu değiştirerek doku hasarı ve immün yanıt süreçlerini etkilediği gösterilmiştir (Sun ve ark., 2020). Ayrıca büyükbaş sazanda (*Hypophthalmichthys nobilis*) GCRV enfeksiyonu sırasında miR-210 ve miR-338'in antiviral savunma mekanizmalarıyla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Wang ve ark., 2018).

Bakteriyel ve paraziter enfeksiyonlarda da benzer şekilde miRNA aracılı düzenleme mekanizmaları tanımlanmıştır. Avrupa levreğinde (*Dicentrarchus labrax*) *Vibrio* enfeksiyonu sonrasında miR-181a'nın bağışıklıkla ilişkili genlerin ekspresyonunu düzenlediği gösterilirken (Sarropoulou ve ark., 2019), Nil tilapyasında (*Oreochromis niloticus*) *Streptococcus* enfeksiyonları ve kanal yayın balığında (*Ictalurus punctatus*) *Edwardsiella* enfeksiyonları sırasında bağışıklık yanıtlarıyla ilişkili çok sayıda miRNA'nın farklılaştığı rapor edilmiştir (Zhu ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2021). Paraziter enfeksiyonlarda ise çipurada (*Sparus aurata*) *Enteromyxum spp.* enfeksiyonunun bağırsak dokusundaki miRNA profillerini önemli ölçüde değiştirdiği ve özellikle miR-192 ekspresyonundaki azalmanın enfeksiyona bağlı doku bozulması ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Piazzon ve ark., 2014-2020). Bu bulgular, miRNA'ların yalnızca patojenlere karşı gelişen savunma mekanizmalarında değil, aynı zamanda enfeksiyona bağlı doku homeostazisinin korunmasında da görev aldığını göstermektedir.

Yüksek kapasiteli dizileme teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte balıklardaki miRNA repertuarları

ayrıntılı biçimde tanımlanmış ve konak-patojen etkileşimlerinin moleküler temelleri daha iyi anlaşılmaya başlanmıştır. Gökkuşağı alabalığında oluşturulan ilk kapsamlı miRNA veri setleri fonksiyonel genomik çalışmalar için önemli bir altyapı sağlamış (Salem ve ark., 2010), daha sonra Atlantik somonunda yüzlerce miRNA geni ve olgun miRNA tanımlanarak enfeksiyon süreçlerinde görev alan düzenleyici ağlar ortaya konmuştur (Woldemariam ve ark., 2019). Nitekim megalositivirüs enfeksiyonları sırasında bağışıklıkla ilişkili miRNA-mRNA etkileşim ağlarının belirlenmesi (Wu ve ark., 2021) ve Avrupa levreğinde viral sinir nekrozu hastalığına karşı dirençle ilişkili miR-199-5p'nin tanımlanması (Requel ve ark., 2026), miRNA'ların hastalık direncinin moleküler belirteçleri olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Tüm bu bulgular, miRNA'ların yalnızca bağışıklık yanıtının düzenlenmesinde görev yapan moleküller olmadığını, aynı zamanda hastalık direncinin tahmini, erken tanı sistemlerinin geliştirilmesi ve selektif yetiştiricilik programlarında kullanılabilecek önemli biyobelirteçler olarak da büyük potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

4.3. Beslenme Kaynaklı Faktörler

Beslenme kompozisyonu ve metabolik durum, miRNA ekspresyonunu doğrudan etkileyen bir diğer önemli faktördür. Yem içeriğinde balık ununun bitkisel proteinlerle değiştirilmesi, özellikle lipid metabolizması ile ilişkili miR-33 ve miR-122 ekspresyonunu etkilemektedir (*Sparus aurata*) (Mennigen ve ark., 2013). Ayrıca uzun zincirli n-3 çoklu doymamış yağ asitlerinin (PUFA) eksikliği, *D. labrax* larvalarında miR-430 düzeylerini azaltarak gelişimsel süreçleri olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Açlık ve yeniden beslenme durumları da miRNA ekspresyonunda hızlı değişimlere neden olmaktadır. *D. rerio*'da miR-122'nin açlık durumunda karaciğerde azaldığı, buna bağlı olarak glikoz üretiminin arttığı ve yeniden beslenme

ile bu düzeylerin kısa sürede normale döndüğü bildirilmiştir (Rimoldi ve ark., 2016).

4.4. Genetik Faktörler

Genetik yapı ve epigenetik mekanizmalar, miRNA ekspresyonunun türler ve popülasyonlar arasında farklılık göstermesine neden olmaktadır. Aynı çevresel strese farklı balık türlerinin farklı miRNA yanıtları geliştirdiği bildirilmiştir, örneğin soğuk stresine karşı alabalıkta miR-210, sazan balığında ise miR-29'un baskın yanıt oluşturduğu rapor edilmiştir (Johnston ve Bower, 2018). Selektif ıslah çalışmaları kapsamında hızlı büyüme için seçilen *O. mykiss* hatlarında miR-133 seviyelerinin daha düşük olduğu ve bunun kas gelişimi ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (Salem ve ark., 2018). Epigenetik düzeyde ise DNA metilasyonu ve histon modifikasyonlarının miRNA ekspresyonunu düzenlediği, örneğin promotör metilasyonunun miR-200 ailesini baskıladığı, histon asetilasyonunun ise miR-146a ekspresyonunu artırdığı bildirilmiştir (Campos ve ark., 2014).

4.5. Gelişimsel Faktörler

Balıklarda miRNA'ların en yoğun araştırıldığı alanlardan biri embriyogenez, organogenez, hücresel farklılaşma ve üreme biyolojisini kapsayan gelişimsel süreçlerdir. Özellikle zebra balığı (*Danio rerio*), miRNA'ların gelişim boyunca üstlendiği düzenleyici rollerin aydınlatılmasında temel model organizma olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, miRNA ekspresyonunun balıkların yaşam döngüsü boyunca dinamik değişimler gösterdiğini ve gelişimin farklı evrelerinde özgül biyolojik işlevler üstlendiğini ortaya koymuştur (Wienholds ve ark., 2005; Giraldez ve ark., 2006).

Gelişimsel süreçlerin en erken aşaması olan embriyogenezde, miR-430 ailesi en iyi karakterize edilmiş miRNA gruplarından biridir. Zebra balığında miR-430'un

maternal mRNA'ların yıkımını sağlayarak maternal-zigotik geçişin düzenlenmesinde ve embriyonik genetik programın aktivasyonunda kritik rol oynadığı gösterilmiştir (Giraldez ve ark., 2006). Ayrıca miR-430'un nöral tüp gelişimi sırasında yönlendirilmiş hücre bölünmelerini düzenlediği ve nöroepitelyal organizasyonun oluşumunda temel bir düzenleyici olarak görev yaptığı bildirilmiştir (Takacs ve ark., 2016). Benzer şekilde *Monopterus albus* larvalarında miR-430'un steroidogenez ve steroid hormon biyosentezini kontrol ederek erken gelişim dönemlerindeki endokrin düzenlemede önemli işlevler üstlendiği ortaya konmuştur (Zhang ve ark., 2021). Wienholds ve ark. 2005) ise zebra balığı embriyolarında 115 korunmuş omurgalı miRNA'sının zamansal ve mekânsal ekspresyon örüntülerini belirleyerek bu moleküllerin doku farklılaşması ve doku kimliğinin korunmasındaki önemini göstermiştir.

Gelişimin ilerleyen evrelerinde miRNA'ların üreme biyolojisi ve cinsiyet farklılaşması süreçlerinde de etkin rol oynadığı belirlenmiştir. Medaka (*Oryzias latipes*, *O. melastigma*) türlerinde nörogelişim ve cinsiyet belirleme mekanizmaları ile ilişkili çok sayıda miRNA tanımlanırken (Qiu ve ark. 2015), Nil tilapyasında (*Oreochromis niloticus*) miR-200b ve miR-429'un gonad gelişimi sırasında farklı düzeylerde eksprese olduğu ve sıcaklığa bağlı cinsiyet belirleme mekanizmalarında görev aldığı bildirilmiştir (Tao ve ark., 2016). Akuakültür açısından önemli diğer türlerde de benzer bulgular elde edilmiş; Avrupa levreğinde (*Dicentrarchus labrax*) larval gelişim, çipurada (*Sparus aurata*) embriyonik gelişim ve büyükbaş sazanın (*Hypophthalmichthys nobilis*) erken yaşam evrelerinde gelişimsel gen düzenleme ağlarının oluşumunda miRNA'ların önemli roller üstlendiği gösterilmiştir (Wang ve ark., 2017; Fu ve ark., 2022).

MiRNA'ların gelişimsel süreçlerdeki etkileri yalnızca erken yaşam evreleriyle sınırlı olmayıp yaşlanma döneminde de

devam etmektedir. Atlantik somonunda (*Salmo salar*) kas dokusunda miR-1 ve miR-206 düzeylerinin yaşlanmayla birlikte azaldığı ve bu azalmanın kas dejenerasyonu (sarkopeni) ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (Johansen ve ark., 2017). Bu bulgular, miRNA'ların embriyogenezden yaşlanmaya kadar uzanan yaşam döngüsünün tüm evrelerinde gen ekspresyonunu düzenleyen temel moleküler kontrol mekanizmalarının önemli bileşenleri olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

MikroRNA'lar (miRNA'lar), balıklarda gen ekspresyonunun post-transkripsiyonel düzeyde düzenlenmesinde görev alan ve çok sayıda biyolojik sürecin kontrolünde kritik rol oynayan küçük kodlamayan RNA molekülleridir. Son yıllarda yeni nesil dizileme teknolojileri ve biyoinformatik analiz yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde balık türlerinde miRNA repertuarları ayrıntılı olarak tanımlanmış, bu moleküllerin gelişim, büyüme, metabolizma, üreme, çevresel adaptasyon ve bağışıklık yanıtı gibi temel fizyolojik süreçlerdeki işlevleri daha iyi anlaşılmıştır. Mevcut çalışmalar, miRNA'ların embriyogenezden yaşlanmaya kadar yaşam döngüsünün tüm evrelerinde gen düzenleyici ağların önemli bileşenleri olduğunu göstermektedir. Özellikle embriyonik gelişim, organogenez, cinsiyet farklılaşması ve kas gelişimi gibi süreçlerde belirli miRNA'ların zamansal ve dokuya özgü ekspresyon örüntüleri sergilediği ortaya konulmuştur. Bunun yanı sıra sıcaklık, hipoksi, tuzluluk değişimleri, ağır metal maruziyeti ve beslenme kaynaklı stresler gibi çevresel faktörlerin miRNA ekspresyonunu önemli ölçüde etkilediği ve bu moleküllerin çevresel adaptasyon mekanizmalarında merkezi rol oynadığı belirlenmiştir. Benzer şekilde viral, bakteriyel ve paraziter enfeksiyonlar sırasında değişen miRNA profilleri, bağışıklık

sisteminin düzenlenmesinde ve hastalık direncinin oluşumunda miRNA'ların kritik işlevlere sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Akuakültür açısından değerlendirildiğinde, miRNA'ların büyüme performansı, stres toleransı, üreme başarısı ve hastalık direnci gibi ekonomik öneme sahip özelliklerle yakından ilişkili olduğu görülmektedir. Bu nedenle miRNA'lar, yalnızca temel biyolojik süreçlerin anlaşılmasına katkı sağlayan moleküller olarak değil, aynı zamanda çevresel streslerin izlenmesi, hastalıkların erken teşhisi ve selektif yetiştiricilik programlarında kullanılabilecek potansiyel biyobelirteçler olarak da büyük önem taşımaktadır.

Gelecekte farklı balık türlerinde gerçekleştirilecek fonksiyonel genomik çalışmaların artırılması, miRNA-mRNA etkileşim ağlarının daha ayrıntılı olarak ortaya konulması ve çoklu omik yaklaşımların entegrasyonu, miRNA'ların biyolojik rollerinin daha kapsamlı şekilde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Bu gelişmelerin, sürdürülebilir akuakültür uygulamalarının geliştirilmesi ve su ürünleri yetiştiriciliğinde verimliliğin artırılmasına yönelik yeni biyoteknolojik yaklaşımların ortaya çıkmasına önemli katkılar sunacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Adamek, M., Matris, M., Dawson, A., Piackova, V., Gela, D., Kcour, M., Adamek, J., Kaminski, R., and Rakus. K. (2013). Koi Herpesvirus infection changes miRNA expression in carp. *Veterinary Microbiology*, 165(3-4) 332342. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2013.04.020>
- Alberts, B., Bray, D., Hopkin, K., Johnson, A. D., Lewis, J., Raff, M., & Walter, P. (2015). *Essential cell biology*. Garland science.
- Andreassen, R., Rangnes, F., Sivertsen, M., Chiang, M., Tran, M., & Worren, M. M. (2016). Discovery of miRNAs and their corresponding miRNA genes in Atlantic salmon (*Salmo salar*) Use in development of a microRNA microarray. *BMC Genomics*, 17, 692. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2963-y>
- Andreassen, R., Woldemariam, N. T., Egeland, I. Ø., Agapito, R. S., & Jensen, I. (2017). Global assessment of the effect of VHSV infection on miRNA expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *BMC Genomics*, 18(1), 245. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-3610-4>
- Bartel, D. P. (2004). MicroRNAs: genomics, biogenesis, mechanism, and function. *cell*, 116(2), 281-297.
- Baumgart, M., Barth, E., Savino, A., Groth, M., Koch, P., Petzold, A., ... & Cellerino, A. (2017). A miRNA catalogue and ncRNA annotation of the short-living fish *Nothobranchius furzeri*. *BMC genomics*, 18(1), 693.
- Bizuayehu, T. T., Babiak, J., Norberg, B., Fernandes, J. M., Johansen, S. D., & Babiak, I. (2012). Sex-biased miRNA expression in Atlantic halibut brain and gonads. *Sexual Development*, 6(5), 257-266. <https://doi.org/10.1159/000341372>

- Bizuayehu, T. T., Johansen, S. D., Puvanendran, V., Toften, H., & Babiak, I. (2015). Temperature during early development has long-term effects on microRNA expression in Atlantic cod. *BMC Genomics*, 16, 305. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1503-7>
- Bushati, N., & Cohen, S. M. (2007). microRNA functions. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.*, 23(1), 175-205.
- Campos, C., Valente, L. M., & Fernandes, J. M. (2014). Epigenetic regulation of muscle growth in fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24(3), 853–870. <https://doi.org/10.1007/s11160-014-9343-9>
- Cao Q, Zhang H, Li T, He L, Zong J, Shan H, Huang L, Zhang Y, Liu H, Jiang J. Profiling miRNAs of Teleost Fish in Responses to Environmental Stress: A Review. *Biology*. 2023; 12(3):388. <https://doi.org/10.3390/biology12030388>
- Dalmau, A., Sánchez-Hernández, M., Martínez-Llorens, S., & Pérez-Sánchez, J. (2019). Cadmium exposure modulates hepatic lipid metabolism and miR-33 expression in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) *Aquatic Toxicology*, 212, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.05.002>
- Eddy, S. R. (2001). Non-coding RNA genes and the modern RNA world. *Nature Reviews Genetics*, 2(12), 919-929.
- Eikeland, I. Ø., Woldemariam, N. T., Andreassen, R., & Jensen, I. (2015). Expression of miRNAs during ISAV infection in Atlantic salmon. *BMC Genomics*, 16, 532. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1738-1>
- Esteller, M. (2011). Non-coding RNAs in human disease. *Nature reviews genetics*, 12(12), 861-874.

- Fu, J., Zhu, W., Wang, L., Luo, M., Jiang, B., & Dong, Z. (2022). Dynamic expression and gene regulation of MicroRNAs during bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) early development. *Frontiers in Genetics*, 12, 821403.
- Giraldez, A. J., Mishima, Y., Rihel, J., Grocock, R. J., Van Dongen, S., Inoue, K., Enright, A. J., & Schier, A. F. (2006). Zebrafish miR-430 promotes deadenylation and clearance of maternal mRNAs. *Science*, 312(5770), 75–79. <https://doi.org/10.1126/science.1122689>
- He, L., & Hannon, G. J. (2004). MicroRNAs: small RNAs with a big role in gene regulation. *Nature reviews genetics*, 5(7), 522-531.
- URL1: <https://doi.org/10.4060/cd0683en>. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). The state of world fisheries and aquaculture 2024. Blue transformation in action. FAO.
- Johansen, S. D., Karlsen, B. O., Furmanek, T., Andreassen, M., Jørgensen, T. E., Bizuayehu, T. T., Breines, R., Emblem, Å., Kettunen, P., Luukko, K., Edvardsen, R. B., Nordeide, J. T., Coucheron, D. H., & Moum, T. (2017). RNA deep sequencing of the Atlantic cod transcriptome. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 22, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2017.03.001>
- Johnston, I. A., & Bower, N. I. (2018). MicroRNAs and muscle development in teleost fish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 27, 30,38. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2018.05.002>
- Kültz, D., Li, J., Gardell, A., & Sacchi, R. (2015). Quantitative molecular phenotyping of gill remodeling in a cichlid

- fish responding to salinity stress. *Molecular & Cellular Proteomics*, 14(2), 396–411.
<https://doi.org/10.1074/mcp.M114.042085>
- Labella, A. M., Castro, D., Leiva-Rebollo, R., Manchado, M., & Borrego, J. J. (2011). Nodavirus VNN infection modulates miR-122 and miR-192 in Senegalese sole. *Fish & Shellfish Immunology*, 30(6), 1207–1213.
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2011.04.009>
- Lee RC, Feinbaum RL, Ambros V. The *C. elegans* heterochronic gene *lin-4* encodes small RNAs with antisense complementarity to *lin-14*. *Cell*. 1993 Dec 3;75(5):843-54. doi: 10.1016/0092-8674(93)90529-y. PMID: 8252621.
- Liu, S., Zhao, C., Yan, L., Zhao, X., & Lu, Y. (2019). Effects of florfenicol on immune responses and miR-21 expression in common carp (*Cyprinus carpio*). *Fish & Shellfish Immunology*, 86, 290–297.
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.11.045>
- Magnoni, L. J., Roher, N., Crespo, D., Krasnov, A., & Planas, J. V. (2018). Transcriptomic response of skeletal muscle to swimming-induced exercise in zebrafish. *Scientific Reports*, 8, 12830. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31332-5>
- Mattick, J. S. (2001). Non-coding RNAs: the architects of eukaryotic complexity. *The EMBO Reports*, 2(11), 986-991.
- Mennigen, J. A., Plagnes-Juan, E., Figueredo-Silva, C. A., Seilliez, I., Panserat, S., & Skiba-Cassy, S. (2013). Acute endocrine and nutritional co-regulation of the hepatic omy-miRNA-122b and the lipogenic gene *fas* in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Comparative Biochemistry*

and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 165(1), 28–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2013.02.002>

OECD-FAO. Organisation for Economic Co-operation and Development & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). OECD-FAO agricultural outlook 2024-2033. OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/4c5d2cfb-en>

Raquel, RV, Mukiibi, R., Ferraresso, S., Franch, R., Peruzza, L., Rovere, GD, ve Robledo, D. (2026). Avrupa levreklerinde viral sinir nekroz direncinin MicroRNA modülasyonu. *bioRxiv* , 2026-02.

Rasal KD, Kumar PV, Risha S, Asgolkar P, Harshavarthini M, Acharya A, Shinde S, Dhere S, Rasal A, Sonwane A, Brahmane M, Sundaray JK and Nagpure N (2024) Genetic improvement and genomic resources of important cyprinid species: status and future perspectives for sustainable production. *Front. Genet.* 15:1398084. doi: 10.3389/fgene.2024.1398084.

Rimoldi, S., Benedito-Palos, L., Terova, G., & Pérez-Sánchez, J. (2016). Wide-targeted gene expression infers tissue-specific molecular signatures of lipid metabolism in fed and fasted fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 26(1), 93–108. <https://doi.org/10.1007/s11160-015-9408-4>

Salem M, Xiao C, Womack J, Rexroad CE 3rd, Yao J. A microRNA repertoire for functional genome research in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Mar Biotechnol* (NY). 2010 Aug;12(4):410-29. doi: 10.1007/s10126-009-9232-z. Epub 2009 Oct 9. PMID: 19816740.

- Salem, M., Kenney, P. B., Rexroad, C. E., & Yao, J. (2018). MicroRNA expression in growth-selected rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Marine Biotechnology*, 20(2), 201-212. <https://doi.org/10.1007/s10126-018-9797-5>
- Svoboda, P. (2020). Introduction to RNAi and miRNA pathways. Nakladatelství Karolinum
- Sarropoulou, E., Tsalafouta, A., Sundaram, A. Y., & Magoulas, A. (2019). Differential expression of microRNAs in *Dicentrarchus labrax* in response to *Vibrio anguillarum* infection. *Fish & Shellfish Immunology*, 88, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.02.058>
- Sun, B., Greiner-Tollersrud, L., Kool, J., Bergh, Ø., and Jørgensen, J. B. (2020). MicroRNA regulation of the innate immune response in common carp (*Cyprinus carpio*) during koi herpesvirus infection. *Developmental and Comparative Immunology*, 103, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.dci.2019.103521>
- Sitjà-Bobadilla, A., Caldúch-Giner, J., Saera-Vila, A., Palenzuela, O., Álvarez-Pellitero, P., & Pérez-Sánchez, J. (2016). Chronic exposure to parasite *Enteromyxum leei* affects miRNA expression in gilthead sea bream. *International Journal for Parasitology*, 46(8), 519-529. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2016.04.002>
- Tao, W., Sun, L., Shi, H., Cheng, Y., Jiang, D., Fu, B., Conte, M. A., Gammerdinger, W. J., Kocher, T. D., & Wang, D. (2016). Integrated analysis of miRNA and mRNA expression profiles in tilapia gonads at early stage of sex differentiation. *BMC Genomics*, 17, 328. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2649-5>

- Takacs, C. M., & Giraldez, A. J. (2016). miR-430 regulates oriented cell division during neural tube development in zebrafish. *Developmental biology*, 409(2), 442-450.
- Tekinşen, K. K., & Gökmen, M. (2007). Beyşehir’de üretilen dondurulmuş sudak balığı (*Stizostedion lucioperca*) filetolarının bakterivolojik kalitesi. *Vet. Bil. Derg*, 23(3-4), 57-64.
- Piazzon, M. C., Estensoro, I., Calduch-Giner, J. A., del Pozo, R., Picard-Sánchez, A., Pérez-Sánchez, J., & Sitjà-Bobadilla, A. (2020). Hints on T cell responses in a fish-parasite model: *Enteromyxum leei* induces differential expression of T cell signature molecules in gilthead sea bream. *Frontiers in Immunology*, 11, 1018. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01018>
- Qiu, G. F., Ramachandra, R. K., Rexroad, C. E., & Yao, J. (2015). Identification of microRNAs expressed in the testis of the medaka. *Biology of Reproduction*, 93_(1), 21. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.114.127936>
- Wang, D., Mao, H., Chen, H., Liu, H., & Xiao, J. (2017). Identification of miRNAs involved in high-temperature responses in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *BMC Genomics*, 18, 255. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-3613-1>
- Wang, Y., Lu, Y., Zhang, Y., Ning, Z., Li, Y., Zhao, Q., Lu, H., Huang, R., Xia, X., Feng, Q., Liang, X., Liu, K., Zhang, L., Lu, T., Huang, T., Fan, D., Weng, Q., Zhu, C., Lu, Y., ... Zhang, G. (2018). The draft genome of the grass carp. *Nature Genetics*, 47_(6), 625–631. <https://doi.org/10.1038/ng.3280>

- WHO. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet> . World Health Organization. (2023). Healthy diet: Key facts. WHO.
- Wienholds E, Kloosterman WP, Miska E, Alvarez-Saavedra E, Berezikov E, de Bruijn E, vd. (Temmuz 2005). "Zebra balığı embriyonik gelişiminde MicroRNA ifadesi" Bilim. 309 (5732):310–11. Kaynak kodu:2005Sci 309 310W. doi:10.1126/science. 1114519 . PMID15919954 . S2CID 38939571 .
- Winter, J., Jung, S., Keller, S., Gregory, R. I., & Diederichs, S. (2009). Many roads to maturity: microRNA biogenesis pathways and their regulation. *Nature cell biology*, 11(3), 228-234.
- Woldemariam, NT, Agafonov, O., Høyheim, B., Houston, RD, Taggart, JB ve Andreassen, R. (2019). Atlantik Somonunda miRNA Repertuarının Genişletilmesi; Farklı Dokularda ve Gelişim Aşamalarında Yüksek Oranda İfade Edilen İzomiR'lerin ve miRNA'ların Keşfi. *Cells* , 8 (1), 42. <https://doi.org/10.3390/cells8010042>
- Wu, Q., Ning, X., & Sun, L. (2021). Megalocytivirus Induces Complicated Fish Immune Response at Multiple RNA Levels Involving mRNA, miRNA, and circRNA. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(6), 3156. <https://doi.org/10.3390/ijms22063156>
- Zhang, X., Wen, H., Wang, X., Wu, F., Li, Y., Li, J., & He, F. (2018). Effects of acute hypoxia on the expression of HIF-1 α and its downstream miR-210 in liver of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Fish ve Shellfish Immunology*, 72, 470-477. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.11.023>

- Zhang, L., Yang, Q., Xu, W., Wu, Z., & Li, D. (2021). Integrated analysis of miR-430 on steroidogenesis-related gene expression of larval rice field eel *Monopterus albus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 6994.
- Zhou Z, Leng C, Wang Z, Long L, Lv Y, Gao Z, Wang Y, Wang S and Li P (2023) The potential regulatory role of the lncRNA-miRNA-mRNA axis in teleost fish. *Front. Immunol.* 14:1065357. doi: 10.3389/fimmu.2023.1065357
- Zhu, J., Pan, D., Li, W., Tang, J., & Huang, J. (2015). *Streptococcus agalactiae* infection alters miRNA expression in Nile tilapia. *Fish & Shellfish Immunology*, 45_(2), 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2015.06.002>

BALIK PARAZİTOLOJİSİNDE TEMEL TERMİNOLOJİ

Mustafa DÖRÜCÜ¹

Mücahit YÜNGÜL²

1. GİRİŞ

Bir bilim dalında ya da uzmanlık alanında kullanılan temel kavramlara “terminoloji” denir. Terminoloji özel uzmanlık alanlarında iletişimin net, kesin ve evrensel olmasını sağlayarak yanlış anlaşılmalara önler, iş verimliliğini artırır ve standart bir dil oluşturur. Ayrıca karmaşık kavramları basitleştirip, küresel işbirliğini kolaylaştıran temel bir araç olarak tanımlanır.

Parazitoloji, parazitleri ve onların konakçıları ile olan ilişkilerini inceleyen biyolojinin önemli bir alanıdır. Biyolojik bilimlerin pek çok dalında olduğu gibi parazitolojist, parazitleri ve parazitizmin bütün safhalarını inceler. Bunun sınırları popülasyon ve makroekoloji’den, mikroekoloji ve biyokimyasal düzeylere kadar uzanır. Ayrıca halk sağlığı veya medikal parazitoloji, sosyocoğrafik ve sosyoekonomik yaklaşımda önemlidir.

Balıklar, tür bakımından dünya üzerindeki en zengin omurgalı grubudur ve küresel olarak sucul habitatların çoğunda yaşarlar. İnsan tüketimi için temel protein kaynaklarından biridir ve yetiştiricilik yoluyla sürekli artan üretimle gıda güvenliğinin önemli bir parçasını temsil etmektedir. Son yıllarda dünyada

¹ Prof. Dr., Fırat Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Yetiştiriciliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-1330-4965.

² Su Ürünleri Yüksek Mühendisi, Fırat Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Yetiştiriciliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-4226-0225.

açlığı önlemek için ilave protein kaynakları sağlamak amacıyla balık ve diğer tüketilebilir aquatik organizmaların zararlı parazitlerini tanıma ve kontrolü konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Böylece parazitleri ve parazitizmi anlamak sadece bilgi artışı yönünden değil, pratik açıdan da önemlidir.

Ancak, kültür balıklarının ve bazı durumlarda doğal balıkların büyüme ve sağlık durumu, tek hücreli ve çok hücreli parazitler de dahil olmak üzere hastalıklardan olumsuz etkilenebilir (Williams ve Jones, 1994; Woo, 2006; Morley, 2013). Parazit hastalıkları, balık konakçısı üzerinde büyüme geriliği, doku bozulması, metabolik bozukluklar ve hatta ağır enfeksiyonlarda ölüm de dahil olmak üzere büyük etkilere sahiptir. Protozoalar, helmintler, trematodlar, akantosefalanlar ve nematodlar, tatlı su ve deniz balıklarının yaygın parazitleridir. Balık yetiştiriciliğinin her alanına son zamanlarda artan ilgi, balık parazitlerinin kontrolü hakkında bilgi ihtiyacını doğurmuştur (Cahandra, 2008).

Parazitler kuluçkahanelerde %20'ye varan kayıplara neden olur ve kültür balıklarının büyümesinde %1-10'luk bir azalmaya katkıda bulunur. Su ürünleri yetiştiriciliği ve balıkçılıktaki yıllık kayıpların yaklaşık 10 milyar dolar olduğu tahmin edilmektedir (Selzer ve Epe, 2021).

Kültür balıklarında ve daha az sıklıkla doğal balıklarda patojen olarak parazitlerin tartışılmaz önemine ek olarak; parazitler, biyoçeşitlilik, ekolojik ve evrimsel çalışmalar için de önemli bir omurgasız grubu oluşturmaktadır.

Balık parazitolojisi, geniş bir yelpazede parazitik organizmaları kapsamaktadır. Balık parazitolojisindeki son 40 yıldaki önemli ilerleme, çok sayıda bilim insanı ve araştırma laboratuvarının uluslararası işbirliği çabalarıyla yakından ilişkilidir.

Ülkemizde özellikle son yıllarda, hobi veya ticari olarak balık yetiştiriciliği oldukça yaygındır. Balık yetiştiriciliğine olan ilginin artması, balık sağlığını, büyümesini ve hayatta kalmasını etkileyen parazitler konusunda farkındalığı ve deneyimi de artırmıştır. Bu bölümde yer alan bilgiler, balık parazitolojisinde yaygın olarak kullanılan terimlerin açık ve anlaşılır bir şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, balık parazitolojisi alanında kullanılan terminolojiyi bilimsel ve sistematik bir biçimde ortaya koyarak, söz konusu alanda çalışan araştırmacılar ile bu alana yeni başlayan bilim insanlarına rehberlik etmektir.

2. TEMEL TERMİNOLOJİ

Parazitoloji (Parasitology)

“Parazitoloji” terimi Yunanca kökenden gelmekte olup; “Para” yanında, “Sitos” yemek ve “Logus” çalışma anlamına gelir. Parazit ve konakçı arasındaki ilişkinin incelenmesiyle ilgilenen bilim dalıdır. Bu disiplin; filogenezi, morfoloji, ekolojisi, yaşam döngüsü, fizyoloji, kemoterapi, seroloji, immünoloji ve biyokimya gibi paraziter organizmaların incelenmesine yönelik çeşitli yaklaşımları içerir.

Balık Parazitolojisi (Fish Parasitology)

Balık parazitleri çalışmasıyla ilgilenen bilim dalıdır. Parazitlerin neden olduğu balık enfeksiyonunu ve hastalığını içerir.

Parazit (Parasite)

Parazit, yiyecek ve ayrıca yaşam döngülerini tamamlamak için dışsal veya dahili olarak nispeten büyük canlılarda bulunan organizmalardır. Bu iki organizma arasında daha küçük olanı parazit ve daha büyük olanı ise konakçıdır.

Konakçı özelliğine göre parazitler üç tipe ayrılır:

1. Mononoksen Parazitler (Monoxenous Parasites)

Sadece bir konakçı türde yaşam için uyarlanmış olan parazitlerdir.

2. Oligoksen Parazitler (Oligoxenous Parasites)

Aralarında bir veya daha fazlası tipik konakçı olsa bile, birkaç konakçıda yaşayabilen parazitlerdir.

3. Poliksen Parazitler (Polyxenous Parasites)

Konakçı özgünlüğüne sahip olmayan ve birçok konakçıyı enfekte edebilen parazitlerdir. Örneğin, *Ichthyobodo sp.* tüm teleostları enfekte eder.

Yaşam döngülerinin tamamlanması için konakçı sayısına göre parazitler üç bölüme ayrılır:

1. Stenoksenöz Parazitler (Stenoxenous Parasites)

Yaşam döngüsünü tek bir konakçı bireyde tamamlayan parazitler “stenoksen parazitler” olarak bilinir.

2. Heterosenöz Parazitler (Heteroxenous Parasites)

Yaşam döngülerinin tamamlanması için daha fazla bireye ihtiyaç duyan parazitler “heteroksen parazit” olarak bilinir.

Heteroksen parazitler de ikiye ayrılır:

a. Diheteroksenöz Parazitler (Dihetoxenous Parasites)

Yaşam döngülerinde iki konakçıya sahip olan parazitlere “diheteroksenöz parazitler” denir. Örneğin, *Tripanozoma*.

b. Triheteroksenöz Parazitler (Triheteroxenous Parasites)

Yaşam döngülerinde üç konakçıya sahip olan parazitlere “triheteroksenöz parazitler” denir.

Konakçının vücudundaki lokalizasyonuna göre de parazitler üçe ayrılır:

1. Dış Parazit (Ectoparasite)

Konakçı vücudunun dış yüzeyinde yaşayan parazitlere ektoparazit denir. Balıklarda deri, solungaç ve yüzgeçlerde bulunurlar. Örneğin, *Dactylogyrus* balık solungaçlarında, *Gyrodactylus* balık derisi üzerinde bulunur.

2. İç Parazit (Endoparasite)

Konakçının iç kısmında yaşayan parazitlerdir. Örneğin, *Ligula intestinalis* balıkların visseral boşluğunda yaşar.

3. Hemoparazitler (Haemoparasites)

Konakçının kanında yaşayan parazitlerdir. Örneğin, bazı protozoan ve nematod parazitler.

Bağımlılık temelinde parazitler dört grupta değerlendirilir:

1. Kalıcı Parazit (Permanent Parasite)

Konakçı ile kalıcı olarak temas halinde yaşayan bir parazite kalıcı parazit denir.

2. İstemli-Fakültatif Parazit (Facultative Parasite)

Konakçı olmadan da yaşayabilen parazitlere “istemli-fakültatif parazit” denir. Yani bu canlılar için parazitik yaşam bir zorunluluk değildir.

3. Zorunlu Parazit (Obligatory Parasite)

Konakçı olmadan yaşayamayan parazitlere “zorunlu parazit” denir. Bu parazitler, konakçıyı aralıklarla ziyaret eden parazitlerdir.

4. Tesadüfi Parazit (Incidental Parasite)

Normalde doğal konağı olmayan bir konakta geçici olarak bulunan ve yaşam döngüsünü çoğunlukla tamamlayamayan parazit türüdür.

5. Kararsız Parazit (Erratik Parazit)

Genellikle bulunmaması gereken bir organda dolaşan parazittir.

6. Peryodik ve Sporadik parazit (Priodic and Sporadic Parasite)

Bazı metabolik ihtiyaçlarını karşılamak için konakçısını aralıklarla ziyaret eden parazittir.

7. Patojenik Parazit (Pathogenik Parasite)

Konakçısında hastalığa neden olan parazittir. Hastalık kronik veya akut olabilir.

3. KONAKLA İLGİLİ TANIMLAMALAR

Konakçı (Host)

Fizyolojik olarak bir parazitten daha büyük olan, farklı bir türe ait ve parazite koruma ve besin sağlayan organizmadır.

Son Konakçı (Definitive-Final Host)

Parazitin cinsel olgunluğa ulaştığı ve ürediği, “definitive” veya “son konakçı” olarak adlandırılan konakçıdır. Örneğin, *Clinostomum* konakçısı olan su kuşları.

Ara Konakçı (Intermediate Host)

Parazitin larva aşamalarını barındıran, ancak cinsel olgunluğa ulaşmadığı konakçı “ara konakçı” olarak adlandırılır. Örneğin, *Clinostomum* konakçısı olan balıklar.

Rezervuar Konakçı (Reservoir Konakçı)

Rezervuar konakçı, sadece paraziti barındıran ve potansiyel bir konağa bulaştıran, enfeksiyon etkeninin kaynağı olarak görev yapan bir konaktır. Örneğin; Çöpçü balıkları (*Corydoras* türleri), *Ichthyophthirius multifiliis* (Beyaz Benek Hastalığı) paraziti için rezervuar konakçıdır.

Transfer-Paratenik Konakçı (Paratenik Host)

Olgunlaşmamış parazitin hiçbir gelişim göstermediği ancak belirli bir konakçı için bulaşıcı kaldığı konak türüne “paratenik konak” denir. Örneğin, *Calyptospora funduali* (parazitik protoza)’nin yutulan sporozoitleri çoğalmaz ancak enfektif hale gelmeleri için ön koşul olan bir tür “olgunlaşma” sürecinden geçerler.

Vektör (Vector)

Parazitin bulaşıcı aşamasını bir konakçıdan diğerine taşıyan ve bulaştıran konakçılara “vektör” denir.

Konakçı Özgüllüğü (Host Specificity)

Bir parazitin, yalnızca belirli bir konak türünde yaşayabilmesi veya çoğalabilmesi anlamına gelir. Bir parazit, her canlıda yaşayamaz. Sadece uygun olan belirli türleri enfekte edebilir. İşte bu seçiciliğe “Konakçı özgüllüğü” denir.

Antijen (Antigen)

Konakçı organizmada bağışıklık tepkisini (antikor üretmek için) indükleyebilen bir moleküldür. Bazen antijenler otoimmün bir hastalıkta konakçının kendisinin bir parçasıdır.

Antibody (Antikor)

İmmunoglobulin (Ig) olarak da bilinen bir antikor (Ab), esas olarak plazma hücreleri tarafından üretilen ve bağışıklık sistemi tarafından patojenik bakteriler ve virüsler gibi patojenleri

nötralize etmek için kullanılan büyük, “Y” şeklinde bir proteindir. Antikor, antijen adı verilen patojenin benzersiz bir molekülünü tanıır.

Patojen (Pathogen)

Biyolojide en eski ve en geniş anlamda bir patojen veya mikrop, hastalık üretebilen herhangi bir şey olup terim 1880’lerde kullanılmaya başlanmıştır. Tipik olarak bu terim, virüs, bakteri, protozoa, prion, mantar veya diğer mikroorganizmalar gibi bulaşıcı bir ajanı tanımlamak için kullanılır.

Yaşam döngülerine göre parazitler;

a. Monoksen Parazit (Monoxenou Parasite)

Yaşam döngülerini tek konakta tamamlayan parazitler “monoksen parazitler” olarak tanımlanırlar.

b. Heteroksen Parazit (Heteroxenous Parasite)

Yaşam döngüsünü birden fazla konakta tamamlayan parazitler için kullanılan bir terimdir. Kendi içinde ikiye ayrılır:

1. Diheteroksen Parazit (Diheteroxenous Parasite)

Yaşam döngüsünü tamamlayabilmek için iki farklı konağa ihtiyaç duyan parazit demektir.

2. Poliheteoksen (Polyheteroxenous Parasite)

Yaşam döngüsünü tamamlamak için ikiden fazla konağa ihtiyaç duyan parazit demektir.

Şaşkın Parazit (Aberrant parasite)

Normalde bulunması gereken konak veya organdan farklı bir yerde yaşayan parazittir.

Patoloji (Pathology)

Patoloji (hastalık bilimi), modern tıbbi tanı ve tıbbi araştırmalarda önemli bir alandır ve esas olarak patojenlerden

veya bulaşıcı olmayan fizyolojik bozukluktan kaynaklanan hastalığın nedensel çalışmaları ile ilgili bilim dalıdır.

Sestodların organları:

1. Skoleks (Scolex)

Bir tenyanın topuz benzeri ön ucu, olgun aşamasında tenyanın konakçıya bağlanma organları olarak görev yapan, vantuz veya kanca benzeri kısımlara sahip bölümdür.

2. Proboskis (Proboscis)

Acanthocephala (kancalı kurtçuklar) gibi parazitlerin tübüler beslenme, emme ve yapışma organlarını ifade etmektedir.

3. Strobila (Strobilla)

Strobila bir tenyanın segment zincirleridir.

Parazit Larvası (Larval Parasite)

Larva dönemindeki parazitler için kullanılan bir terimdir.

Korasidyum (Corasidium)

Pseudophyllid ve diğer sestodların kirpikli ilk evre sucul embriyosudur; kirpikli embriyoforun içinde, genellikle ara konakçı bir sucul kabuklu hayvanda bir sonraki larva evresine dönüşen kancalı larvalardır.

Serker (Carcaria)

Trematod (yapraksı solucan) parazitlerinin, sucul ortamlarda bulunan kuyruklu ve hareketli larva formuna verilen isimdir. Sporokist veya redi'nin germinal hücreleri içinde gelişir. Bir serker büyük penetrasyon bezlerine sahip, konik bir kafaya sahiptir.

Mezoserker (Mesosercaria)

Serker ve metaserker arasındaki kistlenmemiş evredir.

Metaserker (Metacercaria)

Birçok digenetik trematodun yaşam döngüsünde görülen serker ve erişkin arasındaki kistlenmiş evredir.

Pleroserkoid (Plerocercoid)

Pseudophyllidea takımında bulunan sestodların üçüncü dönem larvasıdır. Bazı şerit türlerinin ergin döneme yaklaşmış larva biçimidir.

Proserkoid (Proceroid)

Genellikle posterior serkomeri bulunan ve korasidyumdan gelişen sestod larvasıdır. Pseudophyllidea takımında bulunan sestodların ikinci dönem larvasıdır.

Eşeyli Üreme (Sexual Reproduction)

Dişi ve erkek üreme hücrelerinin (gametlerin) birleşmesiyle gerçekleşen üreme şeklidir.

Eşaysız Üreme (Asexual Reproduction)

Tek bir ebeveynin döllenme, gamet oluşumu veya genetik çeşitlilik olmaksızın, kendisiyle genetik olarak aynı yavrular ürettiği bir üreme şeklidir.

Partenogenez (Parthenogenesis)

Döllenmemiş bir yumurta hücresinin gelişerek yeni bir birey oluşturmasıyla gerçekleşen, eşaysız üreme benzeri özel bir üreme şeklidir.

Döllenmesiz üreme

Spor (Spore)

Yeni bir canlı oluşturabilen üreme hücresidir. Genellikle eşaysız üreme ile ilişkilidir. Dayanıklı yapısı sayesinde zor koşullarda canlı kalabilir.

Kist (Cyst)

Kalın bir duvarla çevrili, koruyucu yapıdır. İçinde tek hücreli bir canlı, parazit ya da bazen hücre topluluğu bulunabilir.

Hermafrodit (Hermaphrodite)

Aynı bireyde hem dişi hem erkek üreme organlarının bulunması durumudur. Yani bir canlı hem yumurta hem sperm üretebilir.

Dioik (Dioecious)

Erkek ve dişi üreme yapılarının aynı bireyde değil, ayrı bireylerde bulunmasıdır. İki evciklidir.

Doğrudan Yaşam Döngüsü (Direct Life Cycle)

Bir parazitin ara konakçı kullanmadan gelişerek yaşamını tamamlamasıdır. Yani parazit ya da canlı tek bir konakta yaşamını tamamlar.

Dolaylı Yaşam Döngüsü (Indirect Life Cycle)

Bir parazitin gelişimini tamamlamak için birden fazla konakçı kullanmasıdır.

Trematode (Trematod-Fluke)

Konakçı bir organizmanın üzerinde veya içinde yaşayan, genellikle yassı, vantuzları sayesinde tutunan parazitik yassı solucan sınıfıdır.

Helmin-Parazit Solucan (Worm)

Yuvarlak veya yassı ve balıkların vücuduna yerleşerek besinlerinden faydalanan, konağa zarar veren, genellikle gözle görülebilen büyük parazitlere verilen genel addır. “Nematod” (yuvarlak solucanlar), “Sestod” (şerit solucanlar) ve “Trematod” (yassı solucanlar-fluklar) parazit gruplarını kapsar.

Zoonoz (Zoonosis)

Omurgalı hayvanlardan insanlara doğal olarak bulaşabilen herhangi bir hastalıktır. Hayvanlar doğal ortamda zoonotik enfeksiyonların sürdürülmesinde önemli rol oynarlar. Zoonozlar bakteriyel, viral veya paraziter olabilirler. Bir halk sağlığı sorunu olmasının yanı sıra, büyük zoonotik hastalıkların çoğu hayvansal gıdaların verimli bir şekilde üretilmesini engeller ve hayvansal ürünlerde uluslararası ticarete engeller oluşturur.

Epizootik (Epizootic)

Belirli bir bölgede veya popülasyonda hayvanlar arasında hızla yayılan salgın hastalık anlamına gelir. İnsanlardaki “epidemik” kavramının hayvanlar için kullanılan karşılığıdır.

Simbiyoz (Symbiosis)

Farklı türden iki canlının yakın ve uzun süreli birlikte yaşaması anlamına gelir. Bu ilişki taraflara farklı şekillerde etkiler sağlayabilir.

Simbiyozun başlıca türleri şunlardır:

Mutualizm (Mutualism)

Farklı türden iki canlının bir arada yaşayarak her iki tarafın da bu ilişkiden karşılıklı fayda sağladığı şeklinde ifade edilen “simbiyotik (ortak)” yaşam biçimidir.

Kommensalizm (Commensalism)

İki canlı arasındaki bir ilişkidir ve bu ilişkide bir canlı fayda sağlarken, diğeri ne fayda görür ne de zarar görür.

Parazitizm(Parasitism)

Bir organizmanın (parazit) başka bir canlının (konak) üzerinde veya içinde yaşayarak, besinini ondan sağladığı ve karşılığında konağa zarar verdiği, türler arası yakın bir etkileşim türüdür.

Hiperparazitizm (Hyperparasitism)

Parazit olarak yaşayan bir canlının içinde veya üzerinde başka bir parazitin yaşamasıdır veya diğer bir ifadeyle bazen parazitin kendisinin diğer canlılara konak görevi görmesi “hiperparazitizm” olarak adlandırılır.

Forezi (Phoresis)

Bir canlının (foront) taşınma amacıyla başka bir canlıya (konak) geçici olarak tutunduğu, beslenme amacı gütmeyen kommensalistik bir yaşam biçimidir ve her iki organizma da fizyolojik olarak diğerine bağımlı değildir.

Temizleme Simbiyozu (Cleaning symbiosis)

Bir “temizleyici” canlının (balık, karides veya kuş) bir “konak” canlıdan parazitleri, ölü dokuları ve mucusu uzaklaştırdığı, karşılıklı olarak fayda sağlayan türler arası bir ilişkidir. Deniz ortamlarında yaygın olan bu etkileşim, konakçıların sağlıklarını korumalarına yardımcı olurken, temizleyiciler için de besin sağlar. Genellikle mercan resifi ekosistemlerinde kilit ve istikrarlı bir etkileşimdir.

Bağışıklık-İmmünite (Immunity)

Bir organizmanın spesifik antikorları ile belirli bir enfeksiyon veya toksin gibi yabancı tehditlere karşı geliştirdiği doğal savunma mekanizmasıdır.

Makrofaj (Macrophage)

Doğuştan bağışıklık sisteminin bir parçası olarak dokularda patojenleri, ölü hücreleri ve hücresel atıkları fagositoz yoluyla yutup sindiren, enfeksiyon bölgesine ilk ulaşan savunma hücreleridir. Vücudu enfeksiyonlardan korumanın yanı sıra, inflamasyon sürecini başlatır, doku onarımını düzenler ve antijen sunumu ile diğer bağışıklık hücrelerini uyarırlar.

İnflamasyon-İltihap (Inflammation)

Vücudun bir hasar, enfeksiyon ya da zararlı uyarana karşı verdiği doğal savunma yanıtıdır. Temel amacı hasarlı bölgeyi iyileştirmektir. Belirtileri arasında ağrı, kızarıklık, şişlik (ödem), sıcaklık artışı ve fonksiyon kaybı yer alır.

Hiperplazi (Hyperplasia)

Bir dokuda ya da organda hücre sayısının artması sonucu hacmin büyümesi durumudur. Bu artış, hücrelerin çoğalmasıyla gerçekleşir.

Metaplazi (Metaplasia)

Vücuttaki olgun bir hücre tipinin, kronik tahriş, enfeksiyon veya iltihap gibi stres etkenlerine yanıt olarak başka bir olgun hücre tipine dönüşmesi sürecidir. Genellikle bir savunma mekanizması olarak gelişen bu durum geri dönüşlü olabilir.

Hemoraji-Kanama (Heamorrhage)

Kanın, damar bütünlüğünün bozulması sonucu damar dışına sızması veya akması (kanama) durumudur.

Anemi (Anemia)

Vücutta dokulara oksijen taşıyan sağlıklı kırmızı kan hücrelerinin veya hemoglobinin yetersizliği durumudur.

Parazitik enfeksiyonların yaygınlık (%), ortalama yoğunluk ve bolluk değerlerinin hesaplanması ise aşağıda belirtilmiştir (Bush vd., 1997):

$$\text{Yaygınlık (\%)} = \frac{\text{İncelenen konakçı sayısı}}{\text{Enfekte konakçı sayısı}}$$

$$\text{Ortalama yoğunluk} = \frac{\text{Tespit edilen parazit sayısı}}{\text{Enfekte balık sayısı}}$$

$$\text{Bolluk} = \frac{\text{Tespit edilen parazit sayısı}}{\text{İncelenen konakçı sayısı}}$$

4. SONUÇ

Bu çalışmada, balık parazitolojisinde yaygın olarak kullanılan temel kavram ve terimler bir araya getirilerek tanımlanmış ve sistematik bir çerçevede sunulmuştur. Böylece alan araştırmacıları, lisansüstü öğrenciler ve balık sağlığı ile ilgilenen bilim insanları için Türkçe bir başvuru kaynağı oluşturulması amaçlanmıştır. Özellikle parazitlerin sınıflandırılması, yaşam döngüleri, konak tipleri, patolojik etkileri ve enfeksiyon parametrelerine ilişkin terimlerin tanımlanması, konuya ilişkin kavramsal bütünlüğün sağlanmasına katkı sunmaktadır.

Gelecekte balık sağlığı ve parazitoloji alanında yapılacak araştırmaların artmasıyla birlikte terminolojik birliğin sağlanması, bilimsel bilginin daha doğru aktarılmasına ve disiplinler arası iş birliğinin güçlenmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Bush, A.O., Lafferty, K.D., Lotz, J.M. and Shostak, A.W. (1997). Parasitology Meets Ecology on Its Own Terms: Margolis et al. Revisited. *The Journal of Parasitology*, 83(4), 575-583. <https://doi.org/10.2307/3284227>
- Chandra, K.J. (2008). A Practical Text Book Of Fish Parasitology And Health Management. Bangladesh: University Grants Commission of Bangladesh.
- Morley, N. (2013). Fish Parasites: Pathobiology And Protection - Edited by P.T.K. Woo, K. Buchmann. *Journal of Fish Biology*, 82(5), 1767-1768. <https://doi.org/10.1111/jfb.12119>
- Selzer, P.M. and Epe, C. (2021). Antiparasitics in Animal Health: Quo vadis? *Trends in Parasitology*, 37(1), 77-89. doi: 10.1016/j.pt.2020.09.004
- Sitja-Bobadilla, A., Bron, J.E., Wiegertjes, G. and Piazzon, M.C. (2021). Review of fish parasites: a handbook of protocols for their isolation, culture and transmission. European Association of Fish Pathologists, Vol.121: 1573-1574.
- URL 1: https://en.wikipedia.org/wiki/Fish_disease_and_parasite, (E.T.: 13.04.2026).
- URL 2: <https://www.wi-afs.org/Portals/0/PDF/Training/FishParasitology.pdf>, (E.T.: 16.04.2026).
- URL 3: <https://www.vetfolio.com/parasitology-and-necropsy-of-fish> (E.T.: 18.04.2026).
- URL 4: https://www.fws.gov/policy/aquatichandbook/Volume_2/Chapter8Parasitology.pdf (E.T.: 21.04.2026).
- URL 5: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/97811822942.ch7> (E.T.: 30.04.2026).

URL 6: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065308X08605138> (E.T.: 03.05.2026).

Williams, H. and Jones, A. (1994). Parasitic Worms of Fish. London: Taylor & Francis Publishers. <https://doi.org/10.1201/b12595>.

Woo, P.T.K. (2006). Fish Diseases and Disorders, Volume 1: Protozoan and Metazoan Infections. CABI is a trading name of CAB International. London, UK. pp. 75.

**SU ÜRÜNLERİ ALANINDA
AKADEMİK TARTIŞMALAR**

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com