

SU ÜRÜNLERİ

Alanında Uluslararası Derleme, Araştırma ve Çalışmalar



EDİTÖR DOÇ. DR. BENGÜNUR ÇORAPCI

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8559-82-8

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

SU ÜRÜNLERİ ALANINDA ULUSLARARASI DERLEME, ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR

- ARALIK 2025 -

EDİTÖR **DOÇ.DR. BENGÜNUR ÇORAPCI**

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

TÜRKİYE'DE KÜLTÜRÜ YAPILAN TATLISU BALIKLARININ PARAZİTER HASTALIKLARI

Ahmet ÖZER—1

Bölüm 2

MİKROPLASTİKLERİN İZLENMESİ, DEĞERLENDİRİLMESİ VE MODELLENMESİNDE YAPAY ZEKÂ METOTLARI

Adem Yavuz SÖNMEZ, Yiğit TAŞTAN—27

Bölüm 3

ALG TEMELLİ KARBON GİDERİMİ: BİLİMSEL TEMELLER, ÖLÇÜM YAKLAŞIMLARI VE POLİTİKA BAĞLANTILARI

Betül GÜROY—41

Bölüm 4

SOUS-VİDE TEKNOLOJİSİ: SU ÜRÜNLERİ

Levent İZCİ—65

Bölüm 5

MİKRO VE NANOPLASTİK KİRLENMESİNİN DEKAPODLARA ETKİLERİ EFFECTS OF MICRO AND NANOPLASTIC CONTAMINATION ON DECAPODS

Ayşe Gül HARLIOĞLU—79

Bölüm 6

BALIK YAKALAMA ALETLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Fahrettin YÜKSEL—99

Bölüm 7

İNFEKSİYÖZ PANKREATİK NEKROZİS VİRÜSÜ (IPNV): ETİYOLOJİ, EPİZOOTİYOLOJİ, PATOGENEZ VE AKUAKÜLTÜRDE HASTALIK YÖNETİMİNE KAPSAMLI BİR BAKIŞ

Şeydanur KAN—123

Bölüm 8

YAPAY ZEKA VE SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE KULLANIM ALANLARI

Hülya EMİNÇE SAYGI—141

Bölüm 9

SUCUL CANLILARDA MİKROPLASTİK MARUZİYETİNE BAĞLI FİZYOLOJİK YANITLAR

Elif PAÇAL—159

Bölüm 10

SU KALİTESİ VE EKOSİSTEM SAĞLIĞI

Gözde ŞAVRAN, Fahrettin KÜÇÜK—173

Bölüm 11

MİKROPLASTİKLERİN İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Ataman Altuğ ATICI—197

Bölüm 12

OTOLİT MİKROYAPISI

Celal ATEŞ, İsmail REİS—225

Bölüm 13

SU EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK - AĞIR METAL İLİŞKİSİ

Adem Yavuz SÖNMEZ, Yiğit TAŞTAN—241

Bölüm 14

OZON: SU ÜRÜNLERİNDE UYGULAMALAR

Levent İZCİ—259

Bölüm 15

JEOTERMAL SU KULLANARAK SİRULİNA (*ARTHROSPIRA SPP.*) YETİŞTİRİCİLİĞİ: POTANSİYEL, YÖNTEMLER VE ENTEGRASYON MODELLERİ

Betül GÜROY, Derya GÜROY—273

Bölüm 16

BALIK HEMATOLOJİSİ VE BAĞIŞIKLIK SİSTEMİ

Başar ALTINTERİM—303

Bölüm 17

TÜRKİYE'DE KÜLTÜRÜ YAPILAN DENİZ BALIKLARININ PARAZİTER HASTALIKLARI

Ahmet ÖZER—327

Bölüm 18

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SÜREÇLERİNİN SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Sibel DOĞAN, Özden BARIM ÖZ—353

Bölüm 19

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE KUANTUM NOKTA TABANLI YENİLİKLER

Özden BARIM ÖZ, Sibel DOĞAN—375

//

Bölüm 1

TÜRKİYE'DE KÜLTÜRÜ YAPILAN TATLISU BALIKLARININ PARAZİTER HASTALIKLARI

Ahmet ÖZER¹

¹ Prof. Dr., Sinop Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, 57000, Sinop, Türkiye, aozer@sinop.edu.tr

ORCID: 0000-0002-2890-6766

1. GİRİŞ

Dünya genelinde su ürünleri üretiminin kaynağı temel olarak avcılık ve yetiştiricilik yoluyla elde edilen ürünlere dayanmaktadır. Ülkemiz de bu genel trend içinde uzun yıllar avcılık yoluyla üretilen su ürünleri miktarı son yıllara kadar yüksek miktarlarda gerçekleşmişken, günümüzde bu durum artan kültür balıkçılığı üretimi sayesinde değişime uğramıştır. Türkiye’de su ürünleri üretimi 2024 yılında 933 bin 194 ton olarak gerçekleşmiştir. Toplam üretimin içindeki avcılık yoluyla yapılan üretim 356 bin 70 ton olarak gerçekleşmişken, yetiştiricilik yoluyla yapılan üretim ise 577 bin 124 ton olarak gerçekleşmiştir. Yetiştiricilik yoluyla 2024 yılında yapılan üretimin 405 bin 742 tonu (%70,3) denizlerde, 171 bin 382 tonu (%29,7) ise iç sularda gerçekleşmiştir. Yetiştirilen en önemli balık türleri iç sularda 170 bin 905 ton ile alabalık iken, denizlerde ise 165 bin 55 ton ile levrek ve 155 bin 279 ton ile çipura balığı olmuştur (TUIK, 2024). Ülkemiz tatlısu balığı yetiştiriciliği her geçen gün artmakta ve yeni potansiyel alanlarda da yeni üretim planlamaları gerçekleştirilmektedir. Bu son derece önemli gelişmeler karşısında bazı sınırlayıcı faktörlerin varlığı bilinmektedir. Bu faktörlerin en önemlilerinden bir tanesi hastalıklardır. Bakteriyel, viral, mantar ve paraziter kaynaklı hastalıklar neden oldukları ekonomik kayıpların yanı sıra bu etkenlere karşı yürütülen tedbir ve tedavi amaçlı uygulamalar da önemli bir ekonomik kayıp olarak ortadadır. Bu etkenler içinden parazitlerden kaynaklanan hastalıklar önemli bir yer tutmaktadır. Temel olarak balıklardan bildirilen parazitler Ciliphora, Euglenozoa, Metamonada, Platyhelminthes (Monogenea, Trematoda, Cestoda), Nematoda, Arthropoda, Cnidaria (Myxozoa), Acanthocephala ve Myxozoa üst taksonlarında yer alırlar. Kültür balıkçılığında ise bildiri yapılan parazitler genellikle daha basit yaşam döngüsüne sahip olan yani sadece su kütlesi ve balık arasında gerçekleşenlerden oluşmakta, hızla çoğalmaları ve başkaca konaklara ihtiyaç duymamaları nedeniyle önemli hastalık olgularına neden olmakta ve son aşamada önemli balık ölümleriyle sonuçlanmaktadır. Bunun yanı sıra çok konaklı yaşam döngüsüne sahip olan bazı parazitler de önemli sağlık sorunlarının kaynağı olarak bildirilmektedirler. Bu derleme çalışmasında ülkemiz tatlısu kültür balıkçılığında bildiri yapılan bazı önemli parazitler ve neden oldukları hastalıklar detaylandırılarak etkenleri, belirtileri ve yaşam döngüleri hakkında temel düzeyde bilgi sağlanması ve bu alandaki tüm ilgililere bu yönüyle katkı yapılması hedeflenmiştir.

2. TÜRKİYE TATLISU KÜLTÜR BALIKLARINDAN BİLDİRİLEN BAZI PARAZİTLER VE NEDEN OLDUKLARI HASTALIKLAR

Balıkları enfeste/enfekte eden parazitler bulundukları organlara göre dış parazitler ve iç parazitler olmak üzere iki alt grup altında yer alırlar.

Balık parazitleri ayrıca yapısal taksonomik özelliklerine göre protozoa ve metazoa üst taksonu altında da konumlandırılırlar.

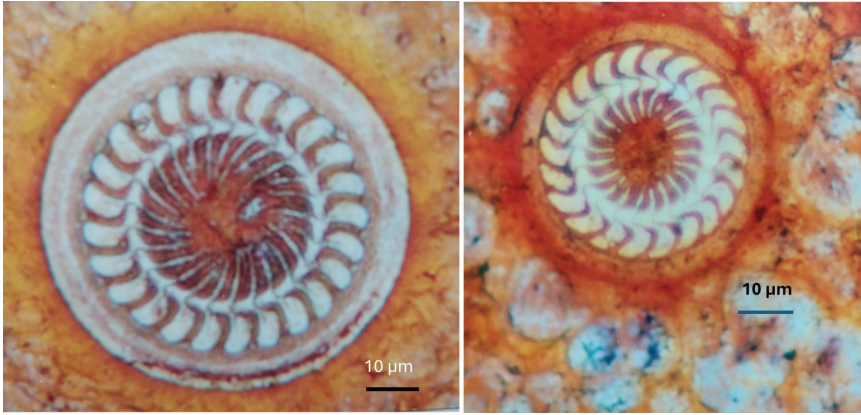
2.1. Dış parazitler ve neden oldukları hastalıklar

Balıkları enfeste eden protozoa ve/veya metazoa üst taksonuna ait dış parazitler anatomik yapılardan solungaçlara, yüzgeçlere ve vücut yüzeyine yani deyiye lokalize olurlar ve neden oldukları enfestasyon olguları bu organlar üzerinde gerçekleşir. Doğal sularda yaşayan balıkların dış parazitleri genellikle su kalitesinin iyi oluşu ve olası konak balıkların daha seyrek dağılım göstermeleri nedeniyle gerek enfestasyon oranı (%) gerekse de parazit yoğunluğu açısından daha düşük değerlerde bulunurlar. Ancak, sucul yaşam ortamındaki bazı hazırlayıcı faktörler nedeniyle konak balıklarda ortaya çıkan aşırı stres daha ağır enfestasyonların ortaya çıkmasına neden olur ve bu durum da balıklarda sağlık sorunlarının başlamasında önemli bir faktör haline gelir. Dolayısıyla, kültür balıkçılığı ortamları tam da bu noktada daha yoğun balık popülasyonunun ve daha düşük su kalitesinin olması nedeniyle daha ağır ve yoğun enfestasyonlara zemin hazırlarlar ve artan parazit enfestasyon değerleri de kültür balıkçılığında en önemli sorunlardan biri olarak ortaya çıkar.

Dünya genelinde kozmopolit olarak balıklarda en yaygın görülen ve balıkların da hassas oldukları bildirilen protozoalardan dış parazit olanlarının hareketli peritrikler olarak; *Trichodina* sp., *Trichodinella* sp. *Tripartiella* sp.; holotrik olarak *Ichthyophthirius multifiliis*, ; sabit ve sapsız peritrikler olarak; *Ambiphrya* sp., *Apiosoma* sp., *Epistylis* sp.; hareketli holotrikler olarak; *Chilodonella* sp., ve sabit Suctorina olarak; *Capriniana* sp., (eski yayınlarda geçtiği adıyla *Trichophrya* sp.); hareketli ve flagellalı olanlardan; *Ichthyobodo* sp. (eski yayınlarda geçtiği adıyla *Costia* sp.) olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. Doğal yaşam ortamlarında bu parazitler balıkların dış organlarında az sayıda bulunurlar ve genellikle sağlık sorunlarına neden olmazlar. Ancak belirli koşullar altında ikiye bölünme şeklinde çoğalarak çok yüksek sayılara ulaşırlar ve bu durumda konak balığın organları ve genel sağlık durumları ciddi şekilde zarar görebilir. Kalabalık ve kötü su kalitesi nedeniyle strese giren konak balıkların direnci azalır ve bu parazitlere karşı daha duyarlı hale gelirler. Buna ek olarak kültür koşullarındaki popülasyon yoğunluğunun neden olduğu birim alandaki sayıca artış parazitlerin hem ortamdaki balıklarla olan temasının artmasına hem de bir balıktan bir diğer balığa geçişine olanaka sağlar.

2.1.1. Trikodiniyazis (Trichodiniasis)

Etken; *Trichodina* cinsi parazitlerdir. *Tripartiella* ve *Trichodinella* olmak üzere iki ayrı cinse ait parazitler de vardır. Işık mikroskopunda çay tabağı şeklinde görülen gövde etrafında kirpikleri olan bir protozodur. Taban kısmının merkezinde etrafı keskin çengellerden oluşmuş bir disk vardır. Bu parazitler balıkların deri, yüzgeç ve solungaçlarda lokalize olurlar. Tatlısu, tuzlusu ve acısu ortamlarında yaşayan balıklarında görülürler. Akvaryum balıklarında da önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Genellikle konak seçici değildirler, ancak bazı balık türlerine özgü türler de bulunmaktadır. Diğer taraftan, *T. mutabilis* ve *Trichodina nigra* (Şekil 1) ülkemiz dahil Avrupa, Asya ve Amerika'daki çok sayıda tatlısu balığından bildirilmiştir. Ilıman bölgelerde genellikle suların ısınmaya başladığı kış mevsiminin son dönemi, ilkbahar ve yaz dönemlerinde yoğun olarak ortaya çıkar ve çok yüksek sayılara ulaşırlar. Bu dönemlerde, ağırlıklı olarak ta kışlama döneminde, bulunan ve beslenme aktivitesi nispeten yavaşlamış, üreme sezonunun da yaklaşmasıyla strese de giren balıklarda daha fazla sayıda ve sıklıkta ortaya çıkarak hastalığa neden olurlar.



Şekil 1. Sazan balığı (*Cyprinus carpio*) solungaçlarındaki *Trichodina mutabilis* (sol) ve *Trichodina nigra* (sağ) bireyleri (Kaynak: Özer, 1995'ten).

Belirtiler; Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. **Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:** Orta derecedeki yada daha ileri derecedeki enfestasyonlarda genellikle balıklar ilk olarak yem yemeyi bırakabilirler, etrafta bulunan nesnelere veya havuz ise havuz kenarlarına hatta çok sayıda balık birarada olduğu için birbirlerine sürtünebilir ve gerek su içinde ani hareketler ser-

gileyebilirler gerekse de suyun dışına çıkarak su yüzeyinden solunum yapmaya çalışırlar.

2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:* Deride renk değişiklikleri ve aşırı mukus üretimi olabilir. Özellikle solungaçlar artan solunum hızı nedeniyle şişmiş, kanamalı veya aşırı mukuslu görünebilir. Tüm türlerde yüzgeç ve dikenlerin aşınmasıyla ilişkili pamuksu büyümeler oluşturabilirler. Pullarda gevşeme ve yüzgeçlerde aşınmalar oluşur, bu durum diğer bakteriyel, viral ve mantar hastalıklarına zemin hazırlayabilir.
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Bu tarz teşhisler için enfeste dokulardan alınan örnekler ile hazırlanan doku kesitlerinden yapılır. Solungaç dokusundaki hücre sayısında artış nedeniyle anormal şekilde büyüme olarak tanımlanan epitel hiperplazisi, alttaki hücrelerde kızarıklık, şişlik ve fonksiyon kaybının göstergesi olan enflamasyon, ileri durumlarda ise epitel nekrozu ve mukus hücrelerinde artış görülebilir. Deri dokusu solungaçlara göre anatomik yapısı gereği daha dirençli olmakla beraber aynı tepkileri gösterebilir.

2.1.2. Sesil parazit enfestasyonları

Etken: Armut biçimli bir çekirdeği olan ve taban kısmında küçük bir sap (scopula) ile balık dolungaç, deri ve yüzgeçlerine tutunan *Apiosoma* (Şekil 2) (eski kaynaklarda *Glossatella*); Şerit şeklinde bir makroçekirdeğe ve taban kısmında geniş bir sapa sahip olan (scopula) *Amblyphrya*; At nalı şeklinde bir makronükleusu olan ve fincan şeklindeki dış görünümüyle *Epistylis* (Şekil 2); Kirpikleri olmayan ve yuvarlak gövdeleri üzerinde değişken sayıda tentakül barındıran *Suctorina* (eski kaynaklarda *Trichophrya* ve diğer cinsler) bu enfestasyonlarda yer alırlar.



Şekil 2. Sazan balığı (*Cyprinus carpio*) solungaçlarındaki *Apiosoma* sp. (sol) ve *Epistylis* sp. (sağ) bireyleri (Özer, 1995'ten).

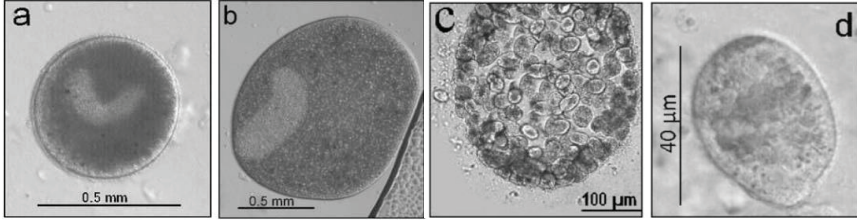
Belirtiler: Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* Orta derecedeki yada daha ileri derecedeki enfestasyonlarda genellikle balıklar ilk olarak yem yemeyi bırakabilirler, sadece orta derecede patojenik oldukları, ancak solungaçlarda yüksek miktarlarda tutunduklarında kaplamış oldukları yüzeyim büyüklüğü ve aşırı mucus salgısının fiziksel olarak gaz değişimini engelledikleri, balıkların solunum ihtiyacı karşılamak üzere solunum hızlarının arttığı ve yoğun ölümlerin bu nedenle gerçekleştiği bildirilmiştir.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskobik Belirtiler:* Deri ve solungaçlarda aşırı mukus üretimi olabilir. Özellikle solungaçlar artan solunum hızı nedeniyle şişmiş veya aşırı mukuslu görünebilir. Koloni şeklindeki yapıları ile *Epistylis* cinsine ait parazitler tutundukları epidermis dokusu üzerinde kanamalı lezyonlara neden olabilirler. Bu durum diğer bakteriyel, viral ve mantar hastalıklarına zemin hazırlayabilir.
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Bu tarz teşhisler için enfeste dokulardan alınan örnekler ile hazırlanan doku kesitlerinden yapılır. Solungaç dokusunu koruyan operküler kemiğin üzerinde lokalize enfeksiyon enfeksiyonlarda lezyonun kötüleştiği ve kemik dokuda geniş çaplı perforasyonuna neden olduğu bildirilmiştir. Suctoria türlerinin (*Trichophyra* spp.) bazı durumlarda solungaç lamella hücrelerinde sitolojik hasara ve ardından solungaç dokusunda hiperplazi ve kanamalara neden oldukları da bildirilmiştir.

2.1.3. BEYAZ BENEK HASTALIĞI (ICHTHYOPHTHIRIASİS)

Etken: *Ichthyophthirius multifiliis*'tir (Şekil 3). Bu parazit, su ürünleri yetiştiriciliği tesislerinde ve sergi akvaryumlarında felaket boyutunda kayıplara neden olabilen yaygın bir protozoon parazittir. Vücut şekli oval yuvarlak elastiki olup, büyüklüğü 50 mikron ile 1 mm arasındadır. Vücudun her tarafı kirpiklerle düzgün bir şekilde kaplanmıştır. Nal şeklinde olan nükleus boyanmamış preparatlarda bile görülebilir (Şekil 4). Olgunlaştığında gri-beyaz renkte tuz kristalleri gibi deri epiteli altında, solungaç ve yüzgeçlerde görülür (Şekil 5). İkiye bölünerek çoğalırlar, Bölünme balık üzerinde olmaz. Vücuttan ayrılan kist binin üzerinde genç kirpikliye bölünebilir. Kistlerin açılması ile parazitin genç şekilleri su yüzüne dağılır. Eğer bu genç parazitler 24-48 saat içerisinde bir konakçı balık bulamaz ise ölürlər. Balığa tutunan genç parazit deri içine girer, ora-

da gelişerek olgunlaşır. Hayat siklusu ısıyla ilgili olarak 4-10 gün arasında değişir. Optimum ısı 24-27 °C arasındır . Bütün tatlı su balıklarının ılık sularda yaşayanlarında görülür.



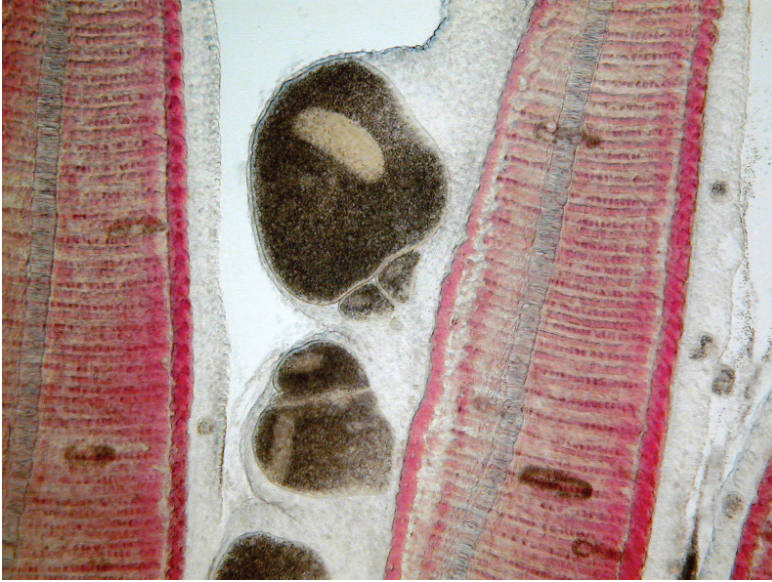
Şekil 3. *Ichthyophthirius multifiliis*'in farklı gelişim evreleri. a-b: Tomont evresindeki bireyler; c: kist içindeki tomite evresindeki bireyler; d: Theront evresindeki birey (Öztürk ve Özer, 2010'dan)

Belirtiler; Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. **Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:** İlk larval ever dahil olmak üzere bütün gelişim evrelerindeki ve yaşlardaki balıklar hassastırlar. Hastalığa yakalanan balıklar havuz köşelerinde birikirler. Balıklar parazitler tarafından tahriş edildiği ileri aşamalarda iştahsızlık, zayıflama, sıçrama, atlama ve cisimlere veya diğer balıklara sürtünme hareketleri yaparak üzerlerindeki parazitlerden kurtulmaya çalışırlar. Parazit solungaçlara yerleştiğinde balıklar suyun geldiği yöne doğru giderler. ancak solungaçlarda yüksek miktarlarda tutunduklarında kaplamış oldukları yüzeyim büyüklüğü ve aşırı mucus salgısının fiziksel olarak gaz değişimini engelledikleri, balıkların solunum ihtiyacı karşılamak üzere solunum hızlarının arttığı ve yoğun ölümlerin bu nedenle gerçekleştiği bildirilmiştir.
2. **Dışarıdan Görülebilen Makroskobik Belirtiler:** Parazitin oluşturduğu en tipik belirti vücuttaki küçük beyaz tümsek şeklindeki beneklerdir. Kabarcık şeklinde de tanımlanabilen bu beyaz benekler daha çok deri ve yüzgeçlerde nadiren de solungaçlarda görülür. Bazen de yalnızca solungaçlarda olabilir ve gövdede görülmeyebilir, bu yüzden dikkatli muayene gerekir. Deri ve solungaçlarda aşırı mukus üretimi olabilir. Özellikle solungaçlar artan solunum hızı nedeniyle şişmiş veya aşırı mukuslu görünebilir. Su yüzeyinin bir süre sonra tamamen içinde parazit barındıran mukus ile kaplandığı görülür. Solungaçlardaki parazit yoğunluğu arttığında ise ölümler artan sayılarda görülmeye başlar ve müdahale yapılmazsa tüm balıklar ölebilirler.

3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler*: Balıkların vücut yüzeyi, yüzgeçleri ve solungaçlarına localize olan beyaz benekler, yetişkin parazit evresi olan trofont tarafından gerçekleştirilir ve balıkların bu dokularındanın dış katmanlarına yani epite hücrelerine nüfuz ederek beslenmek ve hareket etmek için bir boşluk oluşturmalarıyla ortaya çıkarlar (Şekil 4). Bu lezyonların neden olduğu ciddi tahrişler ve patolojik bozukluklar balıklardaki ölümlerin asıl nedenidirler.

Korunma: Bu hastalık en önemli, en yaygın ve de en paojenik parazitler hastalıklardan bir tanesidir. Her hangi bir balık ünitesinde ortaya çıktığında tamamen yok etmek son derece zor , zahmetli ve zaman alıcı bir işlemdir. O yüzden korunma ve işletmeye girişini önleme en önemli strateji olmalıdır. Nakliye ve ellemenin yanı sıra semptom göstermeyen yani herhangi bir klinik belirtileri olmayan taşıyıcılar, yeni gelen balıkların bu hastalığa yakalanmasına neden olabilir ve bu



Şekil 4. Solungaç dokusuyla beslenen parazit *Ichthyophthirius multifiliis*. Yetişkin parazitleri kaplayan ve onları kimyasal tedavi amaçlı işlemlerden koruyan epitel ve mukus tabakalarına dikkat edin (Kaynak: D. Pouder, UF/IFAS).

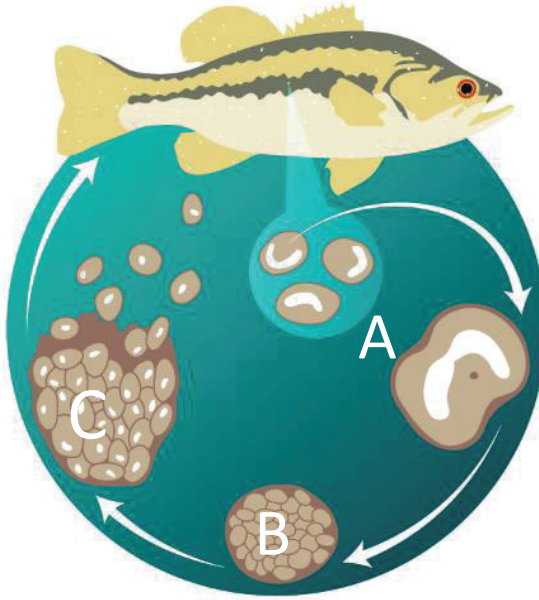


Şekil 5. *Ichthyophthirius multifiliis* ile enfekte olmuş kanal kedibalığı. Beyaz lekeler, trofontları içeren kist benzeri boşluklardır (Kaynak: Ewing, 2002).

balıklar, temas ettikleri diğer balıklar için birer enfeksiyon kaynağıdır. Su sıcaklığı bu parazitin çok evreli yaşam döngüsünde en önemli faktördür. Özellikle nispeten daha yüksek su sıcaklığına sahip akvaryumlardaki balıklarda aktif hastalık genellikle nakilden 1-3 hafta sonra belirgin hale gelir. Bu nedenle, yeni balıklar için en az 30 günlük bir karantina süresi önerilir. Bu karantina süresinin su ürünleri yetiştiriciliği veya halka açık akvaryum tesisleri için son derece önemi olduğunu ifade etmek gerekir. Ayrıca, gelişim evresine göre farklı isimleri olan bu parazitin yaşam döngüsünün (Şekil 6) ilk evresi olan ve bölünmenin gerçekleştiği tomont kistinin yapışkan özelliği nedeniyle işletmeler arasında kolayca yayılabilirler. Bu nedenle, dezenfekte edilmemiş ağlar, sifon hortumları ve diğer ekipmanlar, özellikle karantina alanında, tanklar arasında paylaşılmamalıdır. Bu bağlamda, özellikle göz ardı edilememesi gereken bir konu da, enfekte balıklara maruz kalmış olabilecek tatlı su bitkileri veya diğer yapılar da tomont aşamalarını taşıyabiliyor olmalarıdır. Yaşam döngüsünün su içinde gerçekleşen bu ilk evresinin ardından balıklara tutunmanın gerçekleştiği theront evresi gelişir ve ardından da balık dokularından beslenme sürecinin yaşandığı trophont evresi yani beyaz beneklerin olduğu evre ortaya çıkar. Bu yaşam döngüsünün bilinmesi önleme amaçlı alınacak tüm tedbirlerin de belirleyicisidir.

Tedavi amaçlı kimyasal uygulamalar: Bu parazit her hangi bir **üretim** veya görsel dekorasyon içeren sisteme girdiğinde, kısa sürede balıkların kitlesel ölümüne neden olabilir ve ciddi durumlarda kontrol imkansız hale gelebilir ve balıkların %100'ünün ölümü beklenebilir. Çoğu paraziter hastalıkta tedavi etme veya tedavi etmeme kararı enfeksiyonun derecesine ve diğer faktörlere bağlıyken, tek bir parazit ile enfekte olan balıklar bile, patlama potansiyelinin yüksek olduğu üreme hızları nede-

niyle derhal tedavi işlemeine başlanmalıdır. Tek bir tedavi uygulaması bu hastalık için yeterli değildir, çünkü balıkların üzerindeki yaşam aşaması (trofont) ve su içinde ve zeminde kist halinde bulunan aşama (tomont) kimyasallara dirençlidir. Sadece bulaşıcı teront aşaması tedaviye duyarlıdır. Dolayısıyla, bakır sülfat ve formalin gibi uygun kimyasal tedavinin tekrarlanması veya tuzun uzun süreli kullanımı, yaşam döngüsünü bozacak ve salgını kontrol altına alacaktır. Tankların günlük temizliği de önemlidir, çünkü organik maddelere yapışan tomontlar fiziksel olarak ortamdan uzaklaştırılabilir. Bu paraziter enfeksiyondan kurtulan balıkların, parazitin potansiyel rezervuarı olduğu bilinmektedir ve diğer balıkların enfekte olmasına neden olabileceği akılda tutulmalıdır.



Şekil 6. *Ichthyophthirius multifiliis* 'in yaşam döngüsü. Yaşam aşamaları şu şekilde gösterilmektedir: (A) at nalı şeklinde çekirdeğe sahip yetişkin beslenen trofont (balık üzerinde); (B) tomont içinde üreyen tomitler ; (C) yeni balık konakçı arayan bulaşıcı terontlar (Kaynak: UF/IFAS).

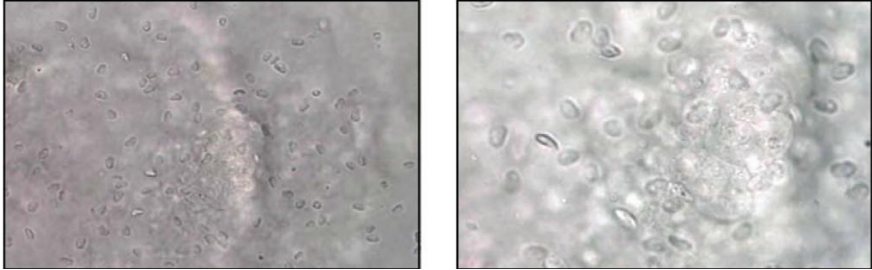
2.1.4. İHTİYOBODİYAZİS (COSTİASİS)

Etken: Ichthyobodiasis, *Ichthyobodo* (*Costia*) spp. (Şekil 7) tarafından neden olur. Balıklar için yaygın olarak bildirilen *Ichthyobodo pyriformis* ve *I. necator* türleridir. Protozoonlardan flagellata (kamçılılar) sınıfına giren çok küçük bir parazit olan *Ichthyobodo* olarak adlandırılmıştır. 2x20 mikron boyutlarında, serbest olarak yüzer ve kamçılarıyla hareket eder. Şekli oval veya böbrek biçiminde olup, iki uzun kamçısı vardır. Çekirdek

vücudun ortasındadır. Ortadan bölünerek çoğalırlar. Bu parazit dünya genelindeki birçok balık türünde görülmüştür. Tüm tatlı su balık türlerinin bu parazitin hedefidirler ve genellikle tür ayrımı yapmaksızın tropikal balıklardan somon balıkları türlerine kadar neredeyse tüm kültür balıklarında sorun teşkil etmektedir. Bu parazitler konak balığa ihtiyaç duyan zorunlu bir parazitlerdir, konak bulunamaması durumunda kısa sürede ölürlür. Konağın solungaç, vücut yüzeyi ve yüzgeçlerine yapışır, ancak olumsuz koşullar parazitin balık üzerinde veya suda serbest olarak kist oluşturmaya neden olabilir.

Belirtiler: Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

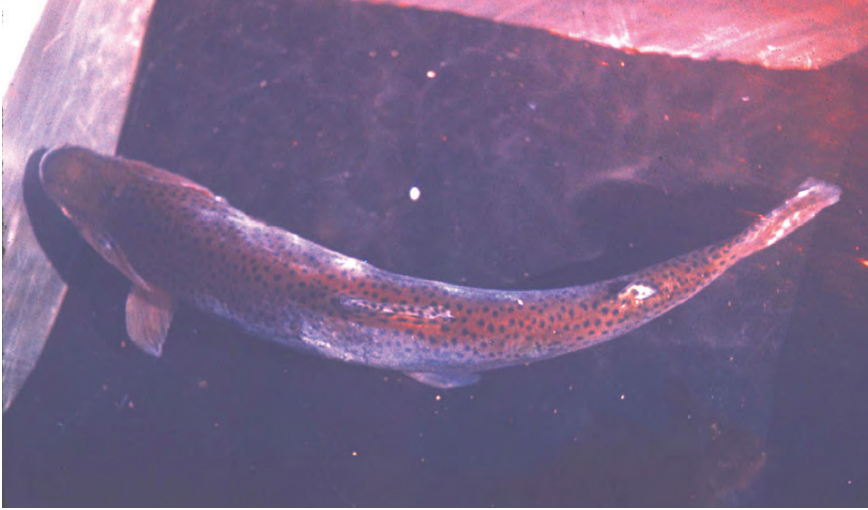
1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* Enfekte balıklar parazitler tarafından tahriş edildiklerinden sıçrama, atlama ve sürtünme hareketleri yaparlar. Enfekte balıklar ayrıca ye almayı bırakabilir ve su yüzeyinden solunum yapmaya çalışabilirler.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:* İhtiyobodiyazisin en karakteristik belirtileri ilerlemiş olaylarda gövde ve yüzgeçler üzerinde açık mavi - gri bir tabakanın oluşmasıdır. Epitel hücreleri içine giren parazit hücreleri parçalamaktadır ve bu durum da açık mavi - gri tabakanın oluşum sebebidir (Şekil 8). Bazen epitelin tamamen kaybolduğu ve deride pigment oluşumunun azlığı nedeniyle solgun bir görünüm oluşur.



Şekil 7. *Ichthyobodo cinsi parazitlerin balık dokusundaki genel görünümü*
(Kaynak: Pouder vd. 2005)

3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* *Ichthyobodo* spp. balıkların derisi ve solungaçlarına lokalize olmaları nedeniyle patolojik bozukluklar bu organlarda görülür. Histolojik kesitlerde genellikle mukoza hücrelerinin çoğaldığı görülür, ancak enfeksiyon bölgelerindeki dokularda iltihaplanma her zaman görülmez. Solungaçlar hiperemik, şişkin, filamentler hatta lamellalar birbirine yapışmıştır. İlerlemiş olaylarda nekroz bile görülebilir. Epitel

dokulardaki nekrotik odakların artması balıklarda özellikle de yavrularda ölümlerin sebebidir.



Şekil 8. Alabalığın vücut yüzeyindeki mavimsi mucus oluşum tabakasının görünümü (Fotoğraf: Fred Meyer, Kaynak: Roger, 1994)

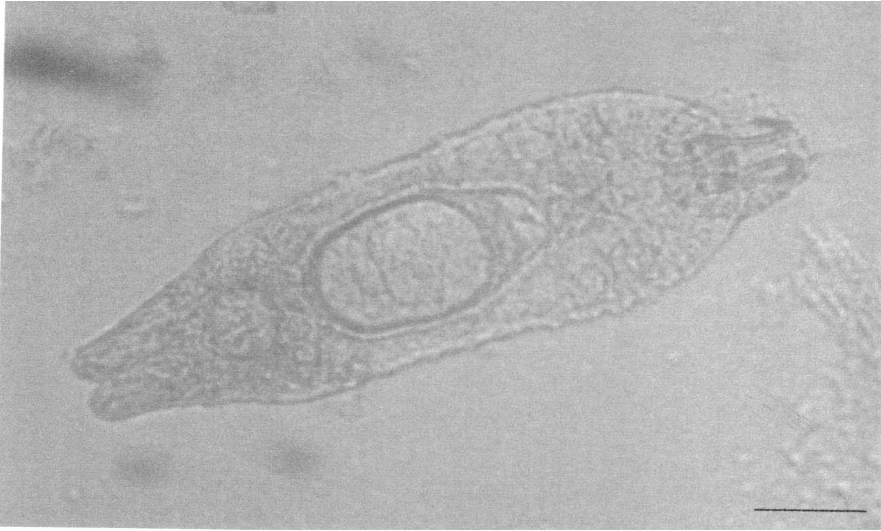
2.1.5. MONOGENİYAZİS (*Gyrodactylus* spp, *Dactylogyrus* spp.)

Monogenea sınıfına ait parazitler birçok tatlı su balığının vücut yüzeyinde (deri, yüzgeçler ve solungaçlar) yaygın olarak bulunurlar. Ekonomik önemi olan balıklarda hastalığa neden olan (1) *Gyrodactylus* spp., ve (2) *Dactylogyrus* spp. cinslerine ait olan parazitlerdir. Bu parazitlerin tümü genellikle 1 mm veya daha az boyuttadır ve bazıları konak seçici olup sadece bazı balıklara özgüdür. Yani, bu parazitler genellikle yalnızca bir konak balık türüne veya yakından ilişkili diğer konak türlerinde enfestasyon yaparlar.

Etken: Monogenea sınıfına ait bu iki cinsin genel tanımlamaları ve hastalık olguları aşağıdadır.

I. *Gyrodactylus* spp. Girodaktilozis, *Gyrodactylus* spp. (Platyhelminthes: Monogenea) tarafından neden olur (Şekil 11). Vivipar olarak üreme özelliği gösteren küçük ve uzunca gövdeli bir parazittir (Şekil 9). Genellikle 0.5 – 0.8 mm uzunlukta bireyler olup, ön kısmı iki loptan oluşmuştur. Her lopun ayrı bir baş organı vardır. Bunlar göz noktalarının olmaması ve içlerinde gelişmiş bir embriyonun bulunması ile *dactylogyrus*lardan ayrılır. Parazitin arka kısmında yer alan çekmen iyi teşekkül etmiştir.

Orta kısmında bir çift büyük çengeli (çapa) ve on altı kenar (marjinal kanca) çengeli vardır. Ovaryum (V) şeklinde olup testisin alt kısmında yer alır. Parazitin larvası mikroskopik olarak ebeveyn parazitin içinde bir çift çengelin varlığı ile görülür. Sazan balıkların fry evresindeki yavruları ile parmak boyundaki yavruları ağır girodaktilozis salgınları nedeniyle ölebilir. Atlantik salmonlarından bildirimi yapılan ve dünya genelinde en önemli patojen olan *G. salaris* türüdür ve bildirimi zorunlu hastalıklar arasında yer alır. Her yaştaki balıkta görülebilir, ancak genç balıklar en çok etkilenenlerdir. Bir konak balığı enfeste eden parazit sayısı yani yoğunluğu genellikle konağın yaşı arttıkça azalır. Bakteri ve/veya mantarların neden olduğu ikincil enfeksiyonlar, genellikle gyrodactyliasis ile ilişkili ölümlerin nedenlerinden biri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 9. *Gyrodactylus arcuatus* türü parazitin dikence balığındaki genel görünümü, skala: 100 μ m (Kaynak: Özer vd. 2002).

Belirtiler; Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. **Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:** Vücut yüzeyinde yaşayan parazitler ile orta veya ağır derecede enfekte olan bazı balıklar (örneğin gökkuşağı alabalığı) ani hareketler ve dönme şeklindeki davranışlarla tahrişi gidermeye çalışırlar. Yoğun şekilde enfekte olan balık yavrularında bir süre sonra zayıflama ve uyuşukluk hali görülebilir, ardından da ölümler gerçekleşebilir.
2. **Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:** Ağır enfestasyonlarda yavruların genel olarak koyulaşması, yüzgeçlerin (özellikle

sırt yüzgeci) aşınması, gövdenin yan taraflarında solgunluk ve kalınlaşmış kütikül, bazen mavi/gri renkte mukus salgıları ve özellikle genç balıklarda zayıflama görülebilir. Parazitlerin haptor organı ile tutundukları dokularda parazitin güçlü organelleri ciddi doku hasarlarına neden olur (Şekil 10).

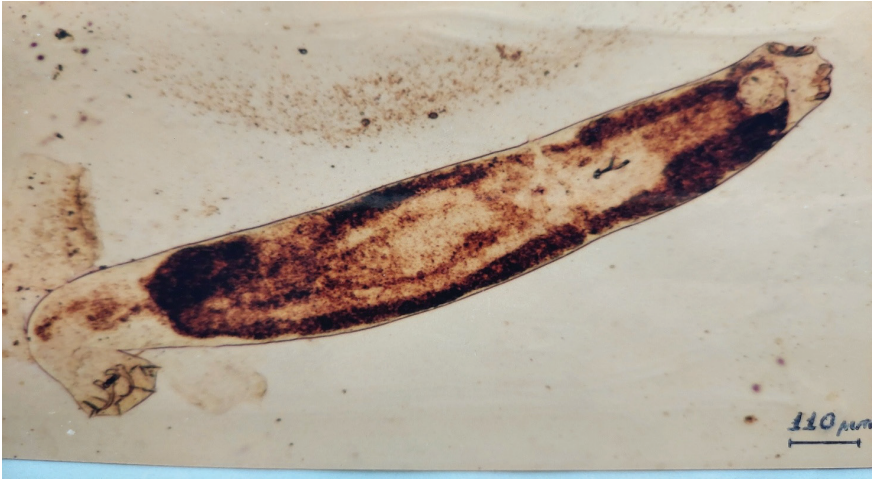
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler*: Bu parazitler serbest olarak hareket etme yeteneğinde olup, balıktan balığa geçerler, hem tutunmak hem de beslenmek için uygun doku ararlar ve vücut yüzeyinin epidermisi, yüzgeçleri veya solungaçları ile beslenir. Parazitlerin tutunma aparatı (haptor) da mekanik hasara neden olur. Ağır enfeste olmuş balıkların vücut yüzeylerinde dejenerasyon ve nekroz bölgeleri ile birlikte epidermal hiperplazi görülebilir.



Şekil 10. *Gyrodactylus salaris* türü parazitin Atlantik salmonundaki tutunmuş halinin genel görünümü, skala: 100 μ m (Fotoğraf: Jannicke Wiik-Nielsen, Kaynak: <https://www.vetinst.no/nyheter/lakseparasitten-gyrodactylus-salaris-pavist-i-sverige>).

II. *Dactylogyrus* spp. Daktilogirozis, *Dactylogyrus* spp. (Platyhelminthes: Monogenea) tarafından neden olur. Bu parazit bütün balık türlerinde, özellikle de sazangillerde yaygın olarak bulunur ve genellikle solungaçlara yerleşir. *Dactylogyrus vastator*, *D. extensus* (Şekil 11) ve *D. anchoratus* yaygın bulunan türler olup ülkemizde de tespit edilmişlerdir. Bunlarda çekmen kutiküler (epidermisle ilgili) çubuk ile desteklenmiş bir çift çengellidir. Testis ve ovaryum yuvarlaktır. Ovaryumun testisin önünde yer alması ve dört adet göz noktası olması ile *gyrodactylus*'lardan ayrılır. Yassı, silindirik yada iğ şeklinde ve ortalama 1.5 mm uzunlukta parazitlerdir. Sazan yavruları ve parmak boyundaki yavrular Daktilogirus enfestasyonuna özellikle duyarlıdır ve kültür ortamlarında yüksek ölüm oranları görülür. *Dactylogyrus* spp., kabuklu yumurtalar üretir ve nesil süresi sıcaklığa bağlı olan yaşam döngülerine sahiptir. Soğuk iklimlerde

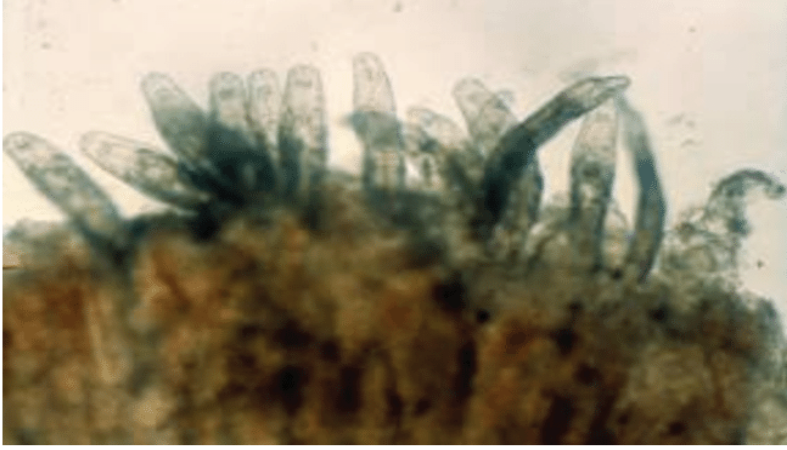
yetiştirilen sazanlarda bulunan türler, sıcak iklimlerde bulunanlara göre (örneğin 22-24 °C'de sadece birkaç gün) genellikle daha uzun bir nesil süresine örneğin 1-2 °C'de 5-6 aya sahiptir. Aşırı kalabalık, özellikle genç balıklardan enfekte olanlarda ölümlerin ortaya çıkmasına neden olan stresli koşullar yaratabilir. Bazı sazan yavru popülasyonlarında %80-100 oranında ölüm kaydedilmiştir. *Dactylogyrus* spp. tipik olarak konakçılarının solungaçlarında bulunur ve oksijen konsantrasyonunun düşük olduğu sularda solunum bozukluğu yavru ve parmak boydaki balıkların ölümüne yol açabilir, 35 mm'den uzun balıkların nispeten yüksek enfeksiyon yoğunluklarına tolerans gösterdiği ve bazı daha büyük sazanların *Dactylogyrus* larvalarına maruz kaldıklarında enfeksiyona dirençli olduğu bildirilmiştir.



Şekil 11. Sazan balığı (*Cyprinus carpio*) solungaçlarındaki *Dactylogyrus extensus bireyi* (Özer, 1995'ten).

Belirtiler; Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. **Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:** Bu parazitler konak balıklarının solungaçlarında yaşar (Şekil 12) ve balıklarda solunum güçlüğü sıklıkla görülür. Genç balıklarda, özellikle su sıcaklığı yüksek olduğunda, ağır enfeksiyonlarda solunum yetersizliği görülebilir. Bu koşullar altında balıklar genellikle uyuşuktur ve beslenemez.
2. **Dışarıdan Görülebilen Makroskobik Belirtiler:** Ağır enfestasyonlarda, genç balıkların solungaçlarında belirgin bir mukus üretimi ve operkulumda hafif bir şişkinlik görülür.



Fresh-mount picture

Şekil 12. Sazan balığı (*Cyprinus carpio*) solungaçlarındaki çok sayıda *Dactylogyrus vastator* bireyi (Kaynak: Molnar vd. 2019)

3. **Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:** Solungaç lamellerinin epitelinde meydana gelen mekanik hasar, hamuli ve marjinal kancalarla donanmış olan tutunma diski (haptor) ve bu parazitlerin beslenmesinden kaynaklanır. Tutunma bölgesinde hiperplazi içeren hafif bir doku reaksiyonu bildirilmiştir. Vaskülarizasyonun azaldığı bölgelerde nekroz meydana gelebilir.

2.1.6. ARGULOZİS (BALIK BİTİ)

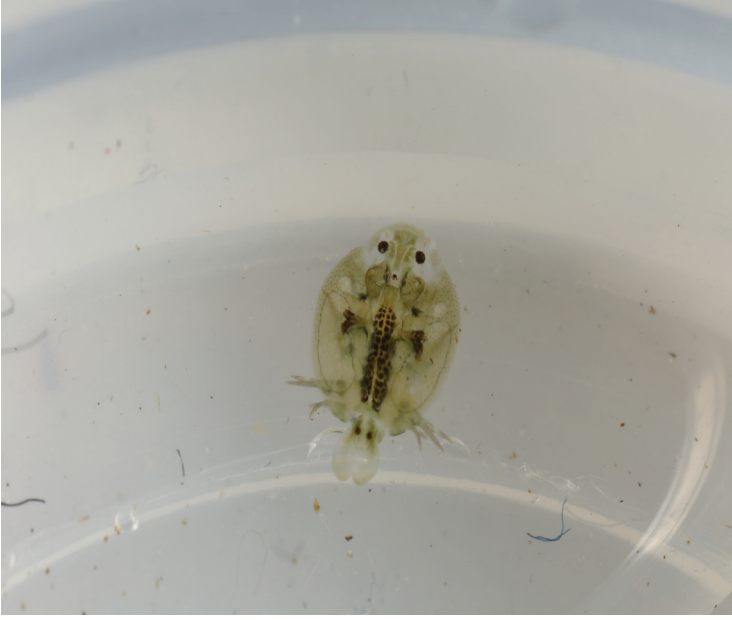
Etken: *Argulus* cinsine ait hem tatlı su ve deniz balıklarından bildiri yapılan 140'dan fazla türün neden olduğu bir hastalıktır, Avrupa kıtasında en bilinen tür *Argulus foliaceus*'tur (Şekil 13). Konak balıkların solungaç, deri ve yüzgeçlerine tutunur ve bu bölgeletrden beslenirler (Şekil 14). Argulidler büyük parazitlerdir ve yetişkinler 5 ila 20 mm boya ulaşır. Türlerin çoğu Kuzey ve Güney Amerika, Afrika ve Avrasya'da pan-kıtasal olarak yaygın olup, birkaç türün ise küresel olarak yaygın oldukları bildirilmiştir. Tüm türler tatlı su, acısu veya deniz ortamlarında bulunur. Sadece tatlı su veya deniz sularına adapte olmuş türlerin yanı sıra genellikle nehir, göl, gölet gibi büyük alıcı ortamlardaki balıklar ile nehir ağzı habitatlarındaki anadrom konaklardan da bildirilmişlerdir. *Argulus* türlerinin büyük çoğunluğu konak seçici olmayıp, tek bir tür, birkaç farklı takım ve familyaya ait balıkları enfeste edebilir. Argulidler, özellikle kültür balıklarında ve bildirilen çoğu vakada fırsatçı parazitler olarak kabul edilebilir.

Döllenmiş dişi parazit bireyi, konak balıkların derisini veya solungaçlarını terk eder ve su altında bulunan nesnelerin üzerine birkaç yüz yumurta bırakır. Serbestçe yüzen ikinci kopepodid larva, 48 ila 72 saat sonra yumurtadan çıkar ve 48 ila 98 saat içinde bir konak balık bulmak zorundadır, aksi takdirde ölür. Larvalar pozitif fototaksiktir ve parlak ışıkta daha hızlı gelişir. Konak üzerinde kopepodid ve sub-yetişkin aşamalarında birkaç kez metamorfoz yapar ve yapısal değişiklikler görülür. Su sıcaklığına bağlı olarak, yetişkin aşamasına yaklaşık 15 ila 40 gün içinde ulaşılır. Hem erkekler hem de dişiler konak üzerinde parazitiktir.

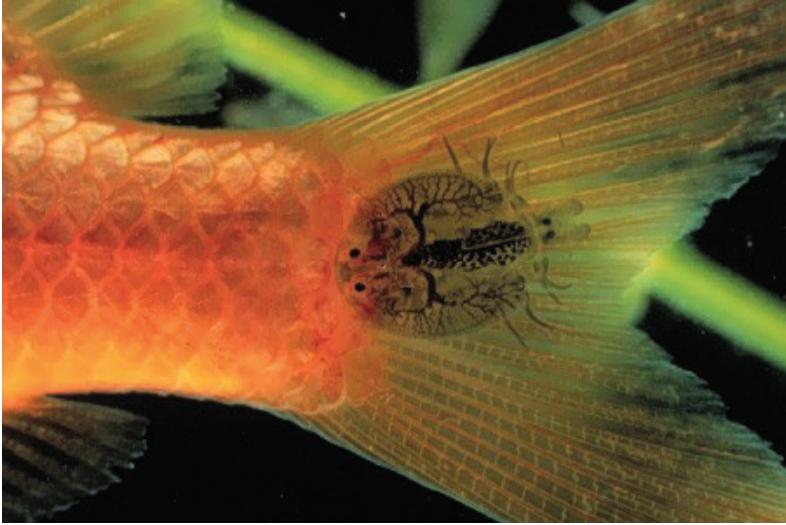
Hem kültür balıklarının hem de doğadaki balıkların ölümlerinin nedenleri arasında *Argulus* enfestasyonları da bildirilmiştir. Özellikle, Kuzey ve Güney Amerika, Afrika ve Avrasya'da çeşitli tür ve yaş sınıflarındaki kültür balıkları *Argulus* enfeksiyonları nedeniyle toplu ölümler yaşamıştır. Optimum su sıcaklıkları (23 to 28°C) parazitin başarılı bir şekilde üremesine ve yüksek sayılarına ulaşmasına neden olur, ve dolayısıyla konak balıkların ölüm oranı ve hastalığın ilerlemesinde artan parazit yoğunluğu önemli bir faktördür. Ağır enfeste balıklar daha hızlı ölür. Kültür balıklarının ilk enfestasyonu genellikle parazitli konak balıkların ortama getirilmesiyle başlar. Balıkların kalabalık olması, düşük çözünmüş oksijen seviyeleri ve yavaş akıntı koşulları, hastalığın yayılmasını ve patojenitesini artırır.

Belirtiler: Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* Hafif ila orta dereceli enfestasyonları, kültür balıklarının parazitten kurtulmak için havuzların ya da kafesin kenarlarına sürtünmelerine neden olur. Ağır durumlarda ise balıkların yorgun düşene kadar aşırı hareketler sergilediği ve bir süre sonra hareketlerinin azalarak uyuşuk hale gelip tankların kenarlarına ve tabanlarına yöneldiği görülür. Ağır enfeksiyonların bir sonucu olarak denge kaybı bildirilmiştir.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:* Balıkların genellikle derisi veya solungaç yüzeyinde görülebilirler. Eski yaralar, nekrotik hale geldikten veya ülserleştikten sonra veya ikincil bakteriyel ve fungal enfeksiyonlardan etkilendikten sonra da gözlemlenebilirler. Solungaçlar ve yüzgeçlerde kopepodid evresindeki patojen parazitlerin beslenme aktivitesine tepki olarak aşırı mukus salgılandığı görülür.



Şekil 13. *Argulus foliaceus* bireyinin genel görünümü (Fotoğraf: Donald Hobern, Kaynak: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Argulus_foliaceus_%282827618812604%29.jpg)



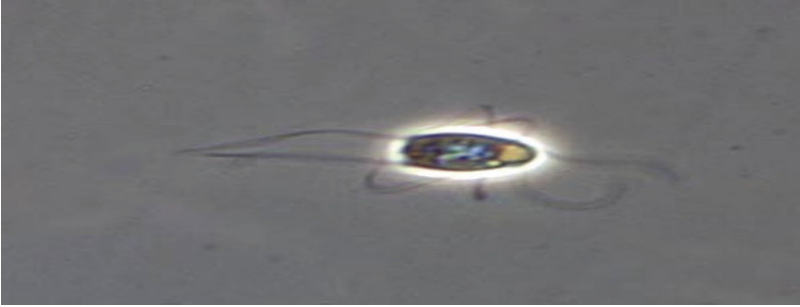
Şekil 14. *Argulus foliaceus* bireyinin koi balığının kuyruk yüzgecindeki görünümü (Kaynak: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/df/Argulus_foliaceus_3.jpg)

3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Parazitler, ağzın ön kısmında bulunan iğne şeklinde içi boş bir organ ile tutundukları konak balığın dokusunu delerler, sitolitik bir toksin enjekte ederler ve bu noktadan kanla beslenir. İğne şeklindeki organın girdiği noktadaki konak yüzeyi eritemik ve hemorajik hale gelebilir. Aynı konak dokusunda sayıca fazla olduklarında ödem ve dokularda lokalize şişkinliklere neden olabilirler. Bu organın giriş yarasının çevresinde proliferasyon gözlemlenmiştir.

2.2. İÇ PARAZİTLER VE NEDEN OLDUKLARI HASTALIKLAR

2.2.1. HEKZAMİTOZİS (*Hexamita* /*Spironucleus*)

Etken: *Hexamita/Spironucleus*, tatlı su balıklarının bağırsak sisteminde yaygın olarak bulunan küçük bir parazittir (Şekil 9). Hastalık diğer enfeksiyon hastalıklarıyla birlikte veya stres faktörlerine bağlı olarak ortaya çıkar. Özellikle alabalık yavrularının bağırsaklarında ve safra keselerinde görülür. Parazit 7-12 mikron boyunda, 3-6 mikron eninde oval bir yapıdadır. 6 adet önde ve iki adette arkada olmak üzere 8 kamçılı ve iki çekirdeği vardır. Bilateral olarak simetriktir, uzunlamasına ikiye bölünerek çoğalırlar, bazı koşullarda çok hızlı dörde bölünebilirler. Spiral şeklinde hareket ederler ve yoğun istilalarda sayıları çok fazla olduğu için gözden kaçmazlar. *Hexamita* ağız yoluyla bulaşır ve anal yoldan da bulaşma olasılığı vardır. Bu parazitin kurumaya karşı dayanıklılık sağlayan koruyucu bir kist oluşturabildiği ve bu sayede gölet tabanındaki dışkıda ve sindirim sisteminden geçerken mide asidinde inaktif kalabildiği bildirilmiştir.



Şekil 9. *Hexamita inflata* bireyinin genel görünümü (Kaynak: https://cfb.unh.edu/phycokey/Choices/Amoebae_Flagellates_Ciliates/Flagellates/HEXAMITA/Hexamita_Image_page.html)

Belirtiler; Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* İştahsızlık, ani yüzme hareketi, su yüzeyinde ve dibinde belirli süre kalma, çoğu zaman renklerde koyulaşma, iştahsızlık sonucu aşırı zayıflama ve toplu iğne görünümü almadır. Kronik olaylara sık rastlanır. Birkaç hafta devam ederek önemli kayıplara neden olur. Akut olaylarda burgu şeklinde yüzme hareketleri göstermesi karakteristiktir. Bu belirti IPN hastalığında da görülebilir. Akut olaylarda %50-75 oranında ölüm görülebilir.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:* Dışarıdan bakıldığında, aynı yaş grubundaki diğer balıklara göre önemli ölçüde daha küçük boyuttaki bireyler, anemi, şişkin karın, soluk parlak dışkı ve yüksek ölüm oranları görülür. “Kafada delik” (hole-in-the-head-disease) lezyonları görülebilir (Şekil 10). İç organlardaki bazı belirtiler ise Atlantik somonunda böbrek ve karaciğerde beyazımsı granülatöz nodüller; kasta kırmızı-kahverengi çıbanlar; beyin zırhında kanama, normalden daha sıvı ve yeşilimsi renkli arka bağırsak içeriği, fibrinöz perihepatit, şiddetli kas dejenerasyonu, multifokal ensefalit ve süpüratif menenjit bildirilmiştir. Ayrıca, çinook somonunda ise serosanguinöz asit, büyümüş, benekli ve tıkanmış karaciğer, büyümüş böbrek ve dalak bildirilmiştir.
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Karaciğer ve böbrekte multifokal pıhtılaşma ve peynirimsi nekrozlar, karaciğer ödemi, tıkanıklık ve iltihaplanma; böbrek interstisyumunda hiperplazi bildirimleri yapılmıştır. Gastrointestinal enfeksiyonlarda epitel hücrelerinde aşırı mukus, sitoplazmik kabarcıklar ve apoptotik cisimler gözlenmiştir.



Şekil 10. Oscar balığında görülen başta delik hastalığı belirtileri (Kaynak: <https://www.theaquariumwiki.com/w/images/7/7a/Oscar-HITH.jpg>)

2.2.2. DİPLOSTOMİYAZİS (GÖZDE KATARAKT VE KÖRLÜK HASTALIĞI)

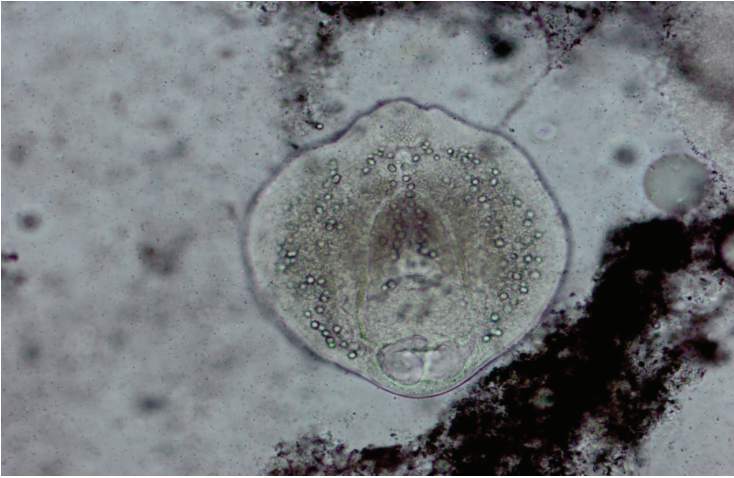
Etken: Diplostomiasis, tatlısu balıklarında, özellikle alabalık ve sazanlarda önemli bir enfeksiyondur ve digenetik trematodlar olan *Diplostomum* cinsine ait türler özellikle *Diplostomum spathaceum* (Şekil 15) ve *D. pseudospathaceum* bilinen en yaygın parazitlerdir.

Çok konaklı yaşam döngüsü (Şekil 16), ilk ara konak olarak lymnae-id salyangozları, ikinci ara konak olarak çeşitli balık türlerini (>125) ve nihai konak olarak balık yiyen kuşları (özellikle martılar ve sumrular) içerir. Enfekte bir salyangozdan suya çok sayıda serkaria adı verilen yavru parazit bireyleri su kütesine salınır. Balıklarda enfeksiyon, suda serbestçe yüzen ve serkari olarak adlandırılan parazit bireylerinin deri veya solungaçlardan doğrudan nüfuz etmesiyle gerçekleşir. Ardından, metacercariae evresine ulaşan parazitler, balıkların göz merceğinde yaşar ve kataraktlara neden olurlar. Ağır enfeksiyonlar akut ölümlere neden olabilirken, kataraktlar kronik enfeksiyonların karakteristik özelliğidir. Enfeksiyon, yetersiz beslenme, büyüme geriliği ve hayatta kalma oranının düşmesine neden olabilir. Su ürünleri yetiştiriciliğinde diplostomiasis'i kontrol etmenin en önemli yolu, bu çok konaklı yaşam döngüsü halka-

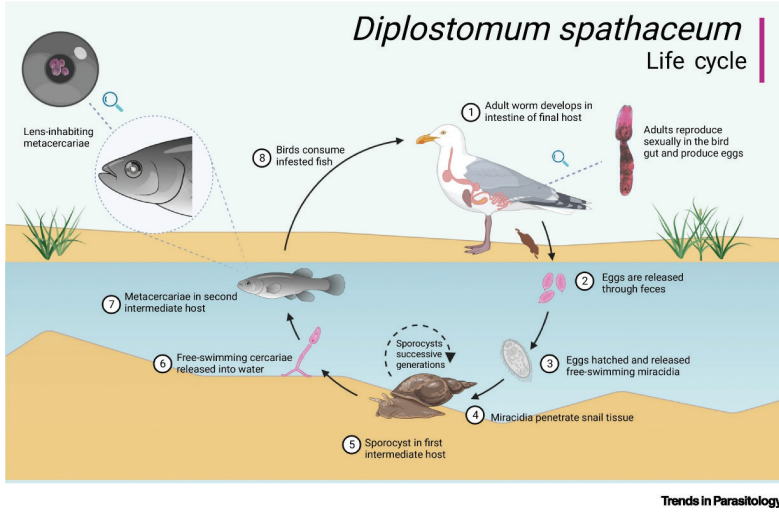
sında yer alan ara konak salyangozlar ve su kuşları üzerinedeki çalışmalarla mümkündür.

Belirtiler: Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* Hastalığın su-yrine bağlı olarak dejenerasyon, lenslerde opaklık (katarakt) ve son olarak körlük ortaya çıkmaktadır. Görme yetisini kaybeden balıkların yem alımı zorlaşmakta ve hatta engellenmektedir, bu durum da iştah kaybına yol açmakta ve ikincil enfeksiyonların gelişmesi ile birlikte ölümler meydana gelmektedir.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:* *Diplostomum* spp. metaserkerleri balıkların lenslerine yerleşirler ve tipik belirtiler olarak dışarıdan bakıldığında enfekte balıkların göz lenslerinde opaklık yani katarakt görülmektedir. Parazitler sayıca arttığında göz içinde görünür hale gelirler (Şekil 17).

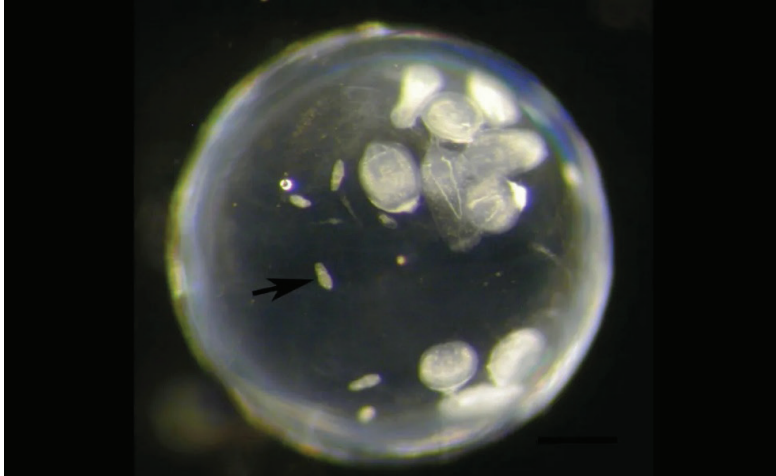


Şekil 15. *Diplostomum spathaceum* bireyinin balığının kuyruk yüzgecindeki görünümü (Kaynak: Özer, 2012)



Şekil 16. *Diplostomum* cinsi paraazitlerin çok konaklı ve gelişim evreli yaşam döngüsü (Kaynak: Capasso ve Gutierrez, 2023)

3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler*: Katarakt lezyonları lens epitelinin kapsüler ruptur bölgesinde anormal proliferasyona neden olurlar ve bunu izleyen dejenerasyon, fragmentasyon ve bitişik kortikal lens liflerinde sıvılaşma belirtilerini görülür.



Şekil 17. Parazit, konak balıkların göz küresine girer ve olgunlaşana kadar burada yaşar (Jörn Peter Scharsack ve Martin Kalbe, Kaynak: <https://www.insidehook.com/culture/common-parasite-can-hijack-hosts-brain-burrowing-eye> by Matthew Reitman)

KAYNAKÇA

- Abowe, J.F.N., Briyai, O.F. ve Bassey, S.E. (2011). A review of some basic parasite diseases in culture fisheries Flagellids, Dinoflagellides and Ichthyophthiriasis, Ichtyobodiasis, coccidiosis Trichodiniasis, Heminthiasis, Hirudinea infestation, crustacean parasite and ciliates. British Journal of Pharmacology, 2, 213–226.
- Avsever, M.L., Selver, M.M., Yazıcıoğlu, Ö., Tokşen, E., Tay, S., Erdal, G. ve Günen, M.Z. (2016). The first report of diplostomiasis from cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in Turkey. Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 63, 377-381.
- Capasso, S. ve Gutierrez, J.S. (2023). *Diplostomum spathaceum*. Trends in Parasitology, 39(11): 969-970.
- Durborow, R.M. (2003). Protozoan Parasites, SRAC Publication, No: 4701.
- Ewing, M.S. (2002). 3.9 Ichthyophthiriasis. Fish Health Section Blue Book, Section 1 Suggested Procedures for the Detection and Identification of Certain Finfish and Shellfish Pathogens sf. 285-291.
- Fijan, N. (1961). Massive invasion of carp fry (*Cyprinus carpio* L.) by protozoan of the genus *Glossatella* (Croatian text, English summary). Vet. Arh. Zagreb, 32: 30-33.
- Francis-Floyd, R., Yanong, R. ve Pouder, D. (2023). *Ichthyophthirius multifiliis* (White Spot) Infections in Fish, UF/IFAS Extension, CIR920, <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/FA006>
- Heckmann, R.A. ve T. Carroll, (1985). Host-parasite studies of *Trichophyra* infesting cutthroat trout (*Salmo clarki*) and longnose suckers (*Catostomus catastomus*) from Yellowstone lake Wyoming. Great Basin Nat., 45: 255-265.
- Hogans, B. (1994). 3.16 Branchiuran Fish Louse Disease. AFS Fish Health Section Blue Book, Section 1, Suggested Procedures for the Detection and Identification of Certain Finfish and Shellfish Pathogens, sf. 343-348.
- Lom, J. ve Dykova, I. (1992). Protozoan Parasites of Fishes. Elsevier, New York, New York.
- Molnár, K., Székely, C. ve Láng, M. (2019). Field guide to worm water fish diseases in Central and Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1182
- Noga, E.J. (2010). Fish disease: diagnosis and treatment. 2nd edition, Blackwell Publishing.
- Özer, A. (2012). Asağı Kızılırmak Deltasındaki Bafra Balık Göllerinde (Samsun) Yasayan Balıkların Parazit Faunasının ve Biyoçeşitliliğinin Fizikokimyasal ve Konak Faktörlerine Göre Belirlenmesi, Proje No: 110O424, Final Raporu, 167 sf.
- Özer, A. (2019). İstilacı Endemik Yerelleşmiş Balıklar ve Parazitleri. İdeal Kültür Yayıncılık, İstanbul, Turkey.

- Özer, A. (2021). Checklist of marine, freshwater, and aquarium fish parasites in Turkey. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV) Publication No: 62, Istanbul, Turkey.
- Özer A. ve Erdem, O. (1998). Ectoparasitic protozoa fauna of the common carp (*Cyprinus carpio* L., 1758) caught in the Sinop region of Turkey. Journal of Natural History, 32, 441-454.
- Özer, A., Öztürk, T., ve Öztürk, M.O. (2004). Prevalence and intensity of *Gyrodactylus arcuatus* Bychowsky, 1933 (Monogenea) infestations on the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus* L., 1758. Turk J Vet Anim Sci 28: 807-812.
- Öztürk, T. ve Özer, A. (2010). *Ichthyophthirius multifiliis* üzerine bazı terapötiklerin in vitro etkisi. Journal of FisheriesSciences.com Öztürk ve ark., 4(3): 209-215
- Petty, B.D., Francis-Floyd, R. ve Yanong, R.P.E. (2024). Parasitic Diseases of Fish, <https://www.msdsvetmanual.com/exotic-and-laboratory-animals/aquarium-fish/parasitic-diseases-of-fish>
- Post, G. (1987). Textbook of Fish Health. T. F. H. Publications, Inc., Neptune, New Jersey. 288 pp.
- Pouder, Deborah B., Curtis, Eric W., ve Yanong, Roy P. E. (2005). Common Freshwater Fish Parasites Pictorial Guide: Flagellates. UF/IFAS Extension, FA109, <https://doi.org/10.32473/edis-fa109-2005>
- Roberts, R.J. (1978). Fish Pathology. Bailliere Tindall, London.
- Roger, W. (1994). 3.2 Ichthyobodiasis. Fish Health Section Blue Book, Section 1 Suggested Procedures for the Detection and Identification of Certain Finfish and Shellfish Pathogens sf 211-215.
- Taylor, Peter W. ve Goodwin, Andrew E. (2002). 3.10. External Infection by Ciliated Parasites-1, AFS Fish Health Section Blue Book, Section 1, Suggested Procedures for the Detection and Identification of Certain Finfish and Shellfish Pathogens, sf. 292-299.
- TUİK. (2024). Su Ürünleri İstatistikleri. www.tuik.gov.tr
- Woo, P. T. K., editor. (1995). Fish Diseases and Disorders, volume 1: protozoan and metazoan infections. CAB International, Wallingford, United Kingdom.

Bölüm 2

MİKROPLASTİKLERİN İZLENMESİ, DEĞERLENDİRİLMESİ VE MODELLENMESİNDE YAPAY ZEKÂ METOTLARI

Adem Yavuz SÖNMEZ¹

Yiğit TAŞTAN²

¹ Doç. Dr., Kastamonu Üniversitesi, İnebolu Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü

² Arş. Gör. Dr.

1. Mikroplastiklerin Tanımı, Kaynakları, Yayılımı ve İzlenme Gereksinimleri

Mikroplastik kirliliği, hem sucul hem de karasal ekosistemlerde neredeyse her ölçekte gözlenen, çok kaynaklı ve çok boyutlu bir çevre sorunu olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Genel kabul gören tanıma göre, en uzun boyutu 1 µm ile 5 mm arasında değişen plastik parçacıklar mikroplastik (MP) olarak adlandırılmakta; doğrudan bu boyut aralığında üretilen endüstriyel granüller, mikroboncuklar ve tekstil lifleri “birincil” mikroplastik, daha büyük plastik malzemelerin UV radyasyonu, oksidatif ve biyotik süreçler ile mekanik aşınma sonucunda parçalanmasıyla oluşanlar ise “ikincil” mikroplastik olarak sınıflandırılmaktadır (Arthur vd., 2009; Guo vd., 2024; Hu vd., 2024). Bu ikili ayırım, sadece kaynakların belirlenmesi açısından değil, aynı zamanda taşınım, bozunma kinetiği ve biyoyararlanabilirlik gibi süreçlerin modellenmesi bakımından da temel bir çerçeve sunmaktadır. Birincil mikroplastikler genellikle daha dar bir boyut dağılımına ve kontrollü morfolojiye sahipken, ikincil mikroplastiklerin şekil, yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal katkı profili daha heterojendir ve bu durum modelleme ve algılama sürecinde belirsizlikleri belirgin biçimde artırmaktadır (Thangagiri ve Sivakumar, 2024).

Küresel plastik üretiminin yıllık 400 milyon tonu aşması ve bu üretimin önemli bir kısmının uygun olmayan atık yönetim uygulamaları nedeniyle çevreye kontrolsüz biçimde yayılması, mikroplastiklerin hemen hemen her ortamda tespit edilmesine yol açmıştır. Okyanus yüzey sularından derin deniz sedimentlerine, nehir, göl ve sulak alanlardan tarım topraklarına ve hatta atmosferik partikül faza kadar geniş bir spektrumda mikroplastik varlığı rapor edilmektedir (Li vd., 2020; Guo vd., 2024).

Sucul ortamlarda yapılan çalışmalar, MP bolluğunun mekânsal ve zamansal olarak birkaç büyüklük mertebesi değişebildiğini; aynı çalışma içinde dahi örnekten örneğe çok yüksek varyasyon gözlemlendiğini göstermektedir (Han vd., 2023; Vitali vd., 2024). Bu yüksek değişkenlik, yalnızca çevresel süreçlerin karmaşıklığının değil, aynı zamanda örnekleme stratejileri ve analitik protokollerdeki farklılıkların da bir yansımasıdır.

Mikroplastiklerin biyolojik ve ekolojik etkilerine ilişkin literatür, bu parçacıkların yalnızca fiziksel bir kirletici olarak değil, aynı zamanda kimyasal ve mikrobiyal kirleticiler için bir taşıyıcı matris olarak işlev gördüğünü ortaya koymaktadır. Yüzey alanı/hacim oranı yüksek olan mikroplastikler, hidrofobik organik kirleticileri ve ağır metalleri adsorbe etme kapasitesine sahiptir; buna bağlı olarak MP-kirletici kompleksleri, su ürünleri ve balıklar üzerinden besin zincirine aktarılabilir.

(Nobre vd., 2015; Selvam vd., 2021). Bunun yanı sıra, MP'lerin yüzeyinde biyofilm oluşturan mikroorganizmalar ve patojenler, yeni tip "plastisfer" habitatlarının ortaya çıkmasına yol açmakta; bu da ekolojik ağların yapısını ve işleyişini değiştirebilmektedir (Barboza vd., 2018; Zhao vd., 2024).

Bu çoklu etki kanalları, mikroplastik kirliliğinin risk değerlendirmesini geleneksel kirlenici kavramının ötesine taşıyarak, çok bileşenli ve çok ölçekli bir sistem problemi hâline getirmektedir.

Buradan hareketle, mikroplastiklerin çevresel davranışlarının ve uzun dönemli kaderlerinin modellenmesi, sadece bilimsel bilgi üretimi için değil, aynı zamanda politika yapıcılar, düzenleyici otoriteler ve atık yönetimi planlayıcıları için de vazgeçilmez bir araç hâline gelmiştir. Ne var ki, mikroplastik dağılımını ve zaman içindeki evrimini modellemek, klasik kütle dengesi ve taşınım denklemlerinin ötesinde bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Geleneksel fiziksel modeller, adveksiyon–difüzyon denklemleri ve Lagrange parçacık izleme algoritmaları ile akıntılar, rüzgâr alanları ve türbülans süreçlerini nispeten iyi temsil ederken, polimer türüne özgü yoğunluk ve şekil özellikleri, biyofilm oluşumu, aglomerasyon ve yüzeyde UV'ye bağlı oksidatif bozunma gibi süreçleri çoğu zaman yalnızca basitleştirilmiş parametreler aracılığıyla dikkate alabilmektedir (Kooi ve Koelmans, 2019; Phan ve Luscombe, 2023; Zhao vd., 2024).

Bu bağlamda MP'lerin ekosisteme verebileceği potansiyel zarar göz önüne alındığında, dağılımını ve davranışını araştırmak ve takip etmek gereklidir. Fakat MP'lerin bu yaygın dağılımları, konsantrasyonlarını, boyutlarını ve küresel yayılımlarını araştırmak ve belirlemek için manuel/klasik yöntemlerin kullanımını pratik olmaktan çıkarmaktadır (Chen vd., 2023). MP kirliliğini araştırmanın ve tespit etmenin geleneksel yöntemleri genellikle nokta örneklemesini, ardından mikroskop altında yapay tanımlama ve belirlemeyi içerir. Bu süreç, bazı farklı canlı veya materyallerin mikroplastik olarak yanlış tanımlanmasına sebep olabilmektedir. Buna ek olarak numunenin kimyasal bileşiminin analiz edilmeye çalışılması da yüksek zaman ve ekonomik maliyetleri beraberinde getirmektedir (Hu vd., 2024). İşte bu noktada araştırmacılar klasik metodların dışında yapay zekâ metodlarının mikroplastik kirliliğinin tespit ve tanımlanmasında kullanılabilme imkanlarını araştırmaya yönelmiştir.

2. Mikroplastiklerin Modellenmesinde Veri, Ölçüm ve Metodolojik Zorluklar

Mikroplastiklerin (MP) modellenmesi, özellikle yüksek kaliteli ve standartlaştırılmış veri eksikliği nedeniyle önemli zorluklar içermektedir. Çeşitli çalışmalar, makine öğrenimi modellerinin eğitimi için gerekli

veri setlerinin hem miktar hem de çeşitlilik açısından yetersiz olduğunu ve bunun model doğruluğunu sınırladığını göstermektedir. Özellikle görüntü ve spektral verilerdeki çeşitlilik eksikliği, farklı çevresel koşullar altında genellenebilirliği azaltmakta ve modellerin yapısal belirsizliklerini artırmaktadır (Guo vd., 2024).

Modellemenin önündeki metodolojik engellerin başında, örnekleme tasarımındaki mekânsal ve zamansal düzensizlik gelmektedir. Çoğu saha çalışması sınırlı istasyonlarda, kısa dönemli örneklemelere dayanmakta; bu da veri setlerinin hem seyrek hem de heterojen olmasına yol açmaktadır. Örnekleme ağının sıklaştırılması ise maliyet, iş gücü ve örnek işleme yükü nedeniyle uygulama olarak sınırlıdır. Buna ek olarak kullanılan ekipman (ağ tipi, göz açıklığı, filtre materyali), numune alma derinliği ve hacim hesaplama yöntemleri arasındaki farklılıklar, çalışmalar arası karşılaştırılabilirliği ciddi biçimde azaltmaktadır (Lavers vd., 2016; Dekiff vd., 2014; Hidalgo-Ruz vd., 2012; Shim vd., 2017).

Spektroskopik ve görüntüleme yöntemlerinin çeşitliliği, modelleme sürecine ek bir heterojenlik katmanı eklemektedir. FTIR, Raman, floresan mikroskopisi ve elektron mikroskopisi gibi tekniklerin algılama sınırları, çözünürlükleri ve hata kaynakları birbirinden oldukça farklıdır. Dolayısıyla bu yöntemlerden elde edilen verilerin bir model altında bütünleştirilmesi; kalibrasyon, veri uyumlaştırma ve hatanın azaltılması açısından ek işlem gerektirmektedir. Bu durum, mikroplastik kirliliği modellemesini tipik bir “büyük veri-belirsizlik yönetimi” problemine dönüştürmektedir (Cowger vd., 2020; Weissner vd., 2022; Liu vd., 2023).

Ölçüm süreçlerinde kullanılan ileri görüntüleme yaklaşımları da teknik sınırlamalar içermektedir. Örneğin Raman mikro-görüntüleme (RMI) yüksek çözünürlük sağlasa da ölçüm aralığı, lazer spot boyutu, odak düzlemi farklılıkları ve düşük sinyal-gürültü oranı gibi faktörler nedeniyle hem tespit hem de boyut tahmininde sistematik sapmalara yol açabilmektedir. RMI’nın yüksek sayıda spektrum gerektirmesi ölçüm süresini uzatırken, kısa pozlama süreleri polimer tanımlamasını güçleştirmektedir. Ayrıca kullanılan analiz yazılımlarındaki kapalı algoritmalar, şeffaflığı ve tekrarlanabilirliği sınırlamaktadır (Yang vd., 2023).

Mikroplastiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki heterojenlik, öngörücü model geliştirme sürecinde ek zorluklar oluşturmaktadır. MP bolluğu ile çevresel değişkenler (pH, tuzluluk, organik karbon, toprak dokusu, vb.) arasındaki ilişkilerin tutarlı olmaması, farklı ortamlarda güvenilir tahmin modellerinin kurulmasını güçleştirmektedir. Bu değişkenlik, geniş ölçekli ve çok-kaynaklı veri gerektiren modelleme çabalarını

zorunlu kılmakta; ancak mevcut veri eksikliği bu tür modellerin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır (Zhao vd., 2024).

Makine öğrenimi ve derin öğrenme tabanlı modeller de veri yetersizliği ve ölçüm heterojenliğinden doğrudan etkilenmektedir. Modeller, laboratuvar koşullarında yüksek doğruluk gösterebilse de doğal ortamlardaki karmaşık arka plan koşullarında performans düşüşü yaşandığı sıkça rapor edilmektedir. Bu düşüşün temel nedeni, eğitilen modellerin sahne ve arka plan çeşitliliği açısından sınırlı veri ile beslenmesidir. Ayrıca derin öğrenme modellerinin yorumlanamaz yapısı, çevresel yönetim açısından güven sorunlarına yol açmaktadır (Guo vd., 2024).

Görüntüleme tabanlı saha uygulamalarında ise sensör çözünürlüğü, arazi koşulları ve ortam karmaşıklığı önemli operasyonel sınırlılıklar oluşturmaktadır. Düşük çözünürlüklü dijital kameraların mikroplastik partiküllerini algılayamaması, yüksek çözünürlüklü sistemlerin ise maliyet ve işlem yükü yaratması kullanımda ek güçlükler doğurmaktadır. Bataklık, yoğun bitki örtüsü ve düzensiz yüzey yapısı gibi alanlar, hem veri toplama süreçlerini hem de model girdilerinin güvenilirliğini azaltmaktadır (Guo vd., 2024).

Nihai olarak mikroplastiklerin modellenmesine ilişkin mevcut literatür, verinin niteliği, ölçüm tekniklerindeki heterojenlik ve çevresel değişkenliğin yüksek olması nedeniyle sürecin çok boyutlu bir belirsizlik alanı içerdiğini göstermektedir. Örnekleme tasarımlarındaki mekânsal ve zamansal sınırlılıklar, veri setlerinin düzensiz ve seyrek yapıda olmasına yol açarken; FTIR, Raman ve mikroskobik görüntüleme gibi yöntemlerden elde edilen spektral ve morfolojik veriler arasındaki teknik farklılıklar, model kalibrasyonunu güçleştirmektedir. Ayrıca mikroplastiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki çeşitlilik ile çevresel parametreler arasındaki tutarsız ilişkiler, öngörücü modellerin farklı ekosistemlerde güvenilir sonuçlar üretmesini sınırlamaktadır. Makine öğrenimi ve derin öğrenme yöntemleri önemli potansiyel sunsa da eğitim verilerinin sınırlı çeşitliliği ve derin modellerin açıklanabilirlik eksikliği bu yaklaşımların pratik uygulamalarını kısıtlamaktadır. Tüm bu unsurlar bir arada değerlendirildiğinde, mikroplastik kirliliğinin doğru ve kapsamlı biçimde modellenmesi için yüksek çözünürlüklü, standartlaştırılmış, çok-kaynaklı veri setlerinin oluşturulması; ölçüm protokollerinin uyumlaştırılması ve hem fiziksel süreçleri hem de veri odaklı yöntemleri bütünlükten hibrit modelleme stratejilerinin geliştirilmesi gerektiği açıktır.

3. Mikroplastik Araştırmalarında Yapay Zekâ Uygulamaları ve Hibrit Modeller

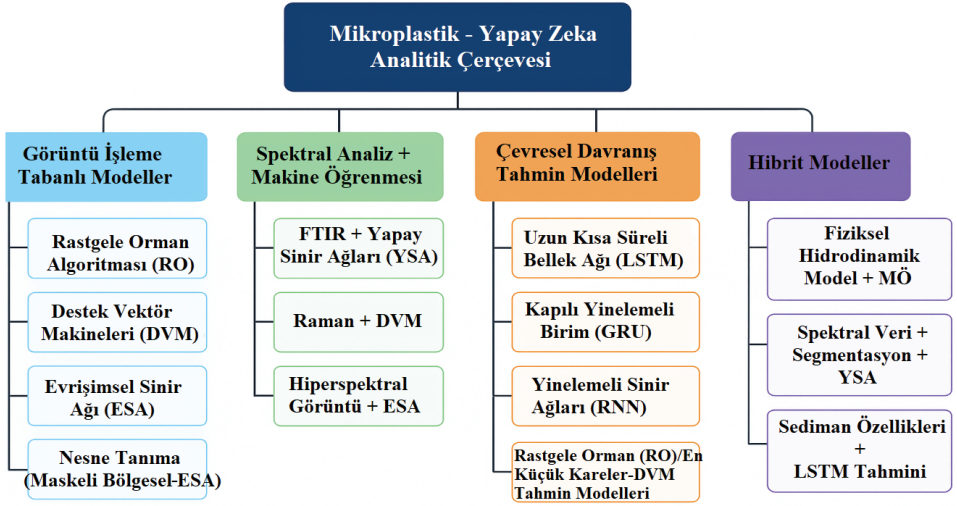
Mikroplastiklerin çevresel ortamlardaki dağılımı, türleri ve toksikolojik etkileri üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda büyük bir hız kazanmıştır. Ancak klasik analiz yöntemlerinin zaman alıcı, uzman bağımlı ve düşük ölçeklenebilirliğe sahip olması, yapay zekâ (YZ) tabanlı yaklaşımların mikroplastik araştırmalarında ön plana çıkmasına neden olmuştur. YZ teknikleri; görüntü işleme, spektral tanımlama, sınıflandırma, çevresel davranış tahmini ve kirletici taşınımının modellenmesi gibi çok sayıda süreçte önemli ilerlemeler sağlamaktadır. Özellikle makine öğrenimi (MÖ), derin öğrenme (DÖ) ve fiziksel modellerle entegre hibrit yaklaşımlar, mikroplastik analizlerinde yeni bir metodolojik paradigma ortaya koymaktadır. Literatürde bu dönüşüm, mikroplastik araştırmalarında hem hız hem doğruluk hem de operatif verimlilik açısından çarpıcı kazanımlar sağlamıştır (Guo vd., 2024; Hu vd., 2024).

Yapay Zekâ Tabanlı Yaklaşımların Mikroplastik Araştırmalarına Getirdiği Yenilikler

YZ tabanlı yöntemlerin en belirgin avantajı, büyük hacimli veriyi kısa sürede işleyebilmesi ve insan gözlemine kıyasla daha tutarlı sonuçlar sunabilmesidir. Özellikle optik, floresan, FTIR ve Raman görüntülerinin MÖ ve DÖ algoritmalarıyla işlenmesi, manuel analizlerde görülen gözlemci yanlılığı ve yanlış sınıflandırma sorunlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Vitali vd., 2024).

Pérez-Beltrán vd. (2024), yaptıkları su kalitesi çalışmalarında YZ algoritmalarının spektral veriyi hızlı işleyerek kirletici tanımlama süreçlerini optimize ettiğini; FTIR/Raman verilerinde ise özellikle yapay sinir ağlarının (YSA) yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuşlardır.

Ayrıca bibliyometrik analizler, MP araştırmalarında görüntü işleme ve DÖ temelli yöntemlere yönelik artan eğilimi açıkça ortaya koymuştur. Thangagiri ve Sivakumar (2024), son 10 yılda mikroplastik çalışmalarında kullanılan YZ yöntemlerinin, özellikle FTIR-MÖ entegrasyonları ve holografik görüntüleme tabanlı sınıflandırmaların öne çıktığını belirtmektedir.



Şekil 1. Mikroplastik tanımlamada kullanılan yapay zekâ yaklaşımlarının genel sınıflandırması [Guo vd. (2024), Hu vd. (2024) ve Han vd. (2023)'den derleme].

Makine Öğrenimi Modelleri ve Mikroplastik Uygulamaları

Makine öğrenimi, özellikle sınıflandırma ve regresyon temelli görevlerde mikroplastik çalışmalarında etkili bir araçtır. Hu vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada MÖ modellerinin mikroplastik tespiti, morfolojik sınıflandırma, polimer türü tahmini ve kirlilik derecesinin belirlenmesinde yüksek performans sunduğunu göstermektedir.

Başlıca MÖ Modelleri:

- **Rastgele Orman (RO):**

Çok sayıda karar ağacı kullanarak MP parçacıklarını morfoloji, renk ve boyut özelliklerine göre sınıflandırmada en yüksek performansı sunan yöntemlerden biridir. Vitali vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada bu model şişelenmiş suda mikroplastik tespiti için başarıyla uygulamıştır.

- **Destek Vektör Makineleri (DVM):**

Spektral verilerde FTIR ve Raman sinyallerini polimer sınıflarına ayırmada sıkça kullanılmıştır. Özellikle küçük veri setlerinde oldukça etkili olduğu ortaya koyulmuştur (Pérez-Beltrán vd., 2024).

- **En Küçük Kareler- Destek Vektör Makineleri (EKK-DVM):**

Tran vd. (2023), yaptıkları çalışmada sediman parametrelerini (pH, Toplam organik karbon, tuzluluk, vb.) kullanarak mikroplastik miktarlarını tahmin etmede EKK-DVM'nin yüksek doğruluk sunduğunu göstermişlerdir.

Tablo 1. *Makine öğrenimi modellerinin mikroplastik çalışmalarındaki kullanım alanları.*

MÖ Metodu	Kullanım Alanı	Performans	Kaynak
RO	Görüntü tabanlı sınıflandırma	Yüksek doğruluk	Vitali vd. (2024)
DVM	FTIR/Raman spektrumu sınıflandırması	Orta-yüksek doğruluk	Pérez-Beltrán vd. (2024)
EKK-DVM	Sediman-temelli MP tahmini	Yüksek doğruluk	Tran vd. (2023)
K-En Yakın Komşu	Renk/morfoloji analizi	Orta düzey	Hu vd. (2024)

Derin Öğrenme Modelleri ve Görüntü İşleme Uygulamaları

DÖ modelleri, manuel özellik çıkarımına gerek duymadan görüntüler üzerinden mikroplastik tespitinde önemli başarı göstermektedir. Han vd. (2023) tarafından geliştirilen Maskeli Bölgesel-Evrişimsel Sinir Ağları modeli; fiber, fragman, pelet ve çubuk gibi mikroplastik formlarını %93 üzeri doğrulukla sınıflandırmıştır.

Başlıca DÖ Modelleri:

- **Evrişimsel Sinir Ağları (ESA):**

Renk, doku ve şekil özelliklerini otomatik ayıklayarak mikroplastik parçacıklarını segment eder.

- **U-Ağı:**

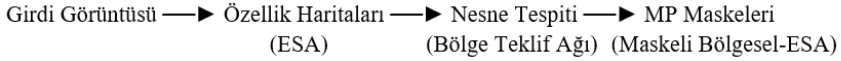
Özellikle düşük kontrastlı mikroplastik görüntülerinde başarılı segmentasyon sağlar.

- **Nesne Tanıma (Maskeli Bölgesel-ESA):**

Öznitelik çıkarımı + nesne tespiti + maske segmentasyonunu birleştirerek en gelişmiş sonuçları sunmaktadır.

- **Uzun Kısa Süreli Bellek Ağı (LSTM):**

Tran vd. (2023) tarafından mikroplastik miktarı tahmininde kullanılmış ve sezonluk çevresel değişimleri başarıyla modellemiştir.



Şekil 2. Derin öğrenme tabanlı mikroplastik segmentasyon ağı (Han vd., 2023).

Hibrit Modeller: Fiziksel Süreçler ve Yapay Zekânın Birleşimi

Yeni nesil hibrit modeller, hem veriye dayalı YZ algoritmalarını hem de fiziksel süreç modellerini bir araya getirerek daha bütüncül analizler sunmaktadır.

Örnek Hibrit Yaklaşımlar:

- **Yinelemeli Sinir Ağları + Fiziksel Adsorpsiyon Modeli:**

Godasiaei (2025), yaptığı çalışmada pH, sıcaklık, polarizasyon gibi çevresel değişkenlerle MP yüzey adsorpsiyon süreçlerini yinelemeli sinir ağı modelleriyle birleştirerek yüksek doğrulukta tahminler üretmiştir.

- **Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) + Makine Öğrenmesi:**

Aghadadashi vd. (2024), CBS tabanlı mekânsal analizleri MÖ modelleriyle birleştirerek MP-ftalat ilişkilerini mekânsal boyutta incelemiştir.

- **Spektral Veri + Derin Öğrenme Segmentasyonu:**

FTIR/Raman spektrumları ile hyperspektral görüntülerin DÖ modelleriyle birlikte kullanılması gerçek zamanlı çevresel izleme kapasitesini artırdığı bildirilmiştir (Jin vd., 2024).

Tablo 2. Hibrit modellerin çevresel uygulamaları.

Hibrit Model	Bileşenler	Uygulama	Kaynak
Yinelemeli Sinir Ağı + Fiziksel Model	Zaman serisi + Adsorpsiyon dinamikleri	MP-kirletici etkileşimi	G o d a s i a e i (2025)
CBS + MÖ	Mekânsal analiz + RO/DVM	Dağılım tahmini	Aghadadashi vd. (2024)
Hiperspektral görüntüleme + DÖ	Spektral veri + ESA	Polimer türü tespiti	Jin vd. (2024)

Mevcut çalışmalar, YZ teknolojilerinin mikroplastik araştırmalarında veri işleme, tespit, sınıflandırma ve çevresel davranış tahmininde klasik yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte modellerin performansı, veri kalitesi, spektral çeşitlilik ve eğitim setlerinin kapsamı gibi faktörlere yüksek derecede bağlıdır. Güncel eğilimler, hibrit modelleme stratejilerinin hem fiziksel hem istatistiksel bileşenleri harmanlayarak daha doğru ve genellenebilir sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Bu nedenle YZ tabanlı çözümlerin standartlaştırılması, geniş ve açık veri tabanlarının oluşturulması ve modellerin açıklanabilirliğinin artırılması, gelecekte MP araştırmalarının temel odak alanları olacaktır.

4. Gelecek Perspektifleri, Araştırma İhtiyaçları ve Sonuç

Mikroplastiklerin izlenmesi ve modellenmesinde YZ'nin katkısı yalnızca tespit ve tahmin adımlarıyla sınırlı değildir; aynı zamanda veri altyapısının tasarımından robotik toplama sistemlerinin optimizasyonuna kadar uzanmaktadır. Guo vd. (2024)'nin kapsamlı literatür çalışmasında, robotik platformlar, otonom su üstü ve su altı araçları, yüksek çözünürlüklü kameralar ve çoklu sensör sistemleri ile yapay zekâ tabanlı analiz süreçlerinin nasıl entegre edilebileceği ayrıntılı biçimde tartışılmakta; teknoloji hazırlık düzeyleri, ekonomik ve çevresel değerlendirmeler ve etik/düzenleyici boyutlar da dikkate alınmaktadır. Benzer biçimde, Jin vd. (2024), hiperspektral görüntüleme, FTIR ve Raman spektroskopisi gibi tekniklerin YZ ile birleşmesinin, mikroplastik tespitinde gerçek zamanlı izleme, izlenebilirlik ve kirlilik sıcak noktalarının belirlenmesi açısından dönüştürücü bir kapasiteye sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Bu metodolojik gelişmelere rağmen, yapay zekâ tabanlı mikroplastik çalışmalarının henüz erken bir gelişim aşamasında olduğunu unutmamak gerekir. Veri kıtlığı, özellikle iyi etiketlenmiş büyük ölçekli görüntü

ve spektral veri setlerinin yokluğu, modellerin genellenebilirliğini sınırlandırmaktadır. Ayrıca, bazı derin öğrenme modellerinin “kara kutu” niteliği, model çıktılarının fiziksel süreçlerle ilişkilendirilmesini ve kararların açıklanabilirliğini güçleştirmektedir (Guo vd., 2024; Zhao vd., 2024). Bu nedenle son dönemde, alan bilgisini modele entegre eden “bilgi rehberliğinde” yaklaşımlar ve sentetik veri üretimi için generatif YZ tekniklerinin kullanımına yönelik öneriler artmaktadır. Generatif modellerin, gerçekçi fakat yapay spektral veya görüntü verileri üretmek eğitim veri tabanlarını zenginleştirmesi; böylece nadir görülen polimer türleri, partikül morfolojileri veya ortam koşulları için model performansını artırması beklenmektedir (Guo vd., 2024).

Önümüzdeki dönemde, mikroplastik kirliliğinin izlenmesi, değerlendirilmesi ve modellenmesinde YZ’nin rolünün daha da güçleneceği öngörülebilir. “Multimodal” yapay zekâ yaklaşımları, görüntü, spektrum, sensör ve metin tabanlı bilgiyi birlikte kullanarak daha bütüncül analizler yapma imkânı sunarken; dijital ikiz kavramının mikroplastik yayılımına uyarlanması, senaryo temelli politika analizlerini ve gerçek zamanlı risk yönetimini mümkün kılacaktır (Zhao vd., 2024).

Ancak bu vizyonun hayata geçirilebilmesi, yüksek kaliteli ve standardize edilmiş veri setlerinin oluşturulmasını, şeffaf ve tekrarlanabilir model geliştirme süreçlerini ve yapay zekâ çıktılarının düzenleyici çerçevelerle uyumlu hâle getirilmesini gerektirmektedir. Son kertede, veri kalitesi ile model performansı arasındaki güçlü ilişki göz önüne alındığında, mikroplastik araştırmalarında daha bütüncül, disiplinlerarası ve veri odaklı bir yaklaşım, hem bilimsel hem de politik karar süreçleri açısından vazgeçilmez görünmektedir.

Kaynakça

- Aghadadashi, V., Mehdinia, A., Rezaei, M., Molaei, S., Hashtroudi, M. S., Ahmadian, F., ... & Rahnama, R. (2024). Basin scale monitoring of microplastics and phthalates in sediments from the Persian Gulf and the Gulf of Makran using GIS-based algorithms: Insights towards spatial variation and potential risk assessment. *Science of The Total Environment*, 927, 171950. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171950>
- Arthur, C., Baker, J., & Bamford, H. (2009). *Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris*. NOAA.
- Barboza, L. G. A., Vethaak, A. D., Lavorante, B. R. B. O., Lundebye, A.-K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>
- Chen, B., Zhang, Z., Wang, T., Hu, H., Qin, G., Lu, T., ... & Qian, H. (2023). Global distribution of marine microplastics and potential for biodegradation. *Journal of Hazardous Materials*, 451, 131198. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131198>
- Cowger, W., Gray, A., Christiansen, S. H., et al. (2020). Critical review of processing and classification techniques for images and spectra in microplastic research. *Applied Spectroscopy*, 74, 989–1010. <https://doi.org/10.1177/0003702820929064>
- Dekiff, J. H., Remy, D., Klasmeier, J., & Fries, E. (2014). Occurrence and spatial distribution of microplastics in sediments from Norderney. *Environmental Pollution*, 186, 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.11.019>
- Godasiaei, S. H. (2025). Predictive modeling of microplastic adsorption in aquatic environments using advanced machine learning models. *Science of the Total Environment*, 958, 178015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178015>
- Guo, P., Wang, Y., Moghaddamfard, P., Meng, W., Wu, S., & Bao, Y. (2024). Artificial intelligence-empowered collection and characterization of microplastics: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 471, 134405. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134405>
- Han, X.-L., Jiang, N.-J., Hata, T., Choi, J., Du, Y.-J., & Wang, Y.-J. (2023). Deep learning based approach for automated characterization of large marine microplastic particles. *Marine Environmental Research*, 183, 105829. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105829>
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46, 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Hu, B., Dai, Y., Zhou, H., Sun, Y., Yu, H., Dai, Y., Wang, M., Ergu, D., & Zhou, P. (2024). Using artificial intelligence to rapidly identify microplastics pollution and predict microplastics environmental behaviors. *Journal*

- of Hazardous Materials*, 474, 134865. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134865>
- Jin, H., Kong, F., Li, X., & Shen, J. (2024). Artificial intelligence in microplastic detection and pollution control. *Environmental Research*, 262, 119812. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119812>
- Kooi, M., & Koelmans, A. A. (2019). Simplifying microplastic via continuous probability distributions for size, shape, and density. *Environmental Science & Technology Letters*, 6, 551–557. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00379>
- Lavers, J. L., Oppel, S., & Bond, A. L. (2016). Factors influencing the detection of beach plastic debris. *Marine Environmental Research*, 119, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.06.009>
- Li, C., Busquets, R., & Campos, L. C. (2020). Assessment of microplastics in freshwater systems: A review. *Science of the Total Environment*, 707, 135578. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135578>
- Liu, Z., Wang, W., & Liu, X. (2023). Spectral classification of large-scale blended (micro)plastics using FT-IR raw spectra and image-based machine learning. *Environmental Science & Technology*, 57, 6656–6663. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08952>
- Nobre, C. R., Santana, M. F. M., Maluf, A., Cortez, F. S., Cesar, A., Pereira, C. D. S., & Turra, A. (2015). Assessment of microplastic toxicity to embryonic development of the sea urchin *Echinometra lucunter*. *Marine Pollution Bulletin*, 92, 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.050>
- Pérez-Beltrán, C. H., Robles, A. D., Rodríguez, N. A., Ortega-Gavilán, F., & Jiménez-Carvelo, A. M. (2024). Artificial intelligence and water quality: From drinking water to wastewater. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 172, 117597. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117597>
- Phan, S., & Luscombe, C. K. (2023). Recent trends in marine microplastic modeling and machine learning tools: Potential for long-term microplastic monitoring. *Journal of Applied Physics*, 133, 020901. <https://doi.org/10.1063/5.0126358>
- Selvam, S., Jesuraja, K., Venkatramanan, S., Roy, P. D., & Kumari, V. J. (2021). Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123786. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123786>
- Shim, W. J., Hong, S. H., & Eo, S. E. (2017). Identification methods in microplastic analysis: A review. *Analytical Methods*, 9, 1384–1391. <https://doi.org/10.1039/C6AY02558G>
- Thangagiri, B., & Sivakumar, R. (2024). Prospective application of artificial intelligence towards the detection, and classifications of microplastics with bibliometric analysis. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235, 362. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07151-z>

- Tran, H.-T., Hadi, M., Nguyen, T. T. H., Hoang, H. G., Nguyen, M. K., Nguyen, K. N., & Vo, D.-V. N. (2023). Machine learning approaches for predicting microplastic pollution in peatland areas. *Marine Pollution Bulletin*, 194, 115417. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115417>
- Vitali, C., Peters, R. J. B., Janssen, H.-G., Undas, A. K., Munniks, S., Ruggeri, F. S., & Nielen, M. W. F. (2024). Quantitative image analysis of microplastics in bottled water using artificial intelligence. *Talanta*, 266, 124965. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124965>
- Weisser, J., Pohl, T., Heinzinger, M., et al. (2022). The identification of microplastics based on vibrational spectroscopy data: A critical review of data analysis routines. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 148, 116535. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116535>
- Yang, Z., Nagashima, H., & Arakawa, H. (2023). Development of automated microplastic identification workflow for Raman micro-imaging and evaluation of the uncertainties during micro-imaging. *Marine Pollution Bulletin*, 193, 115200. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115200>
- Zhao, B., Richardson, R. E., & You, F. (2024). Advancing microplastic analysis in the era of artificial intelligence: From current applications to the promise of generative AI. *Nexus*, 1, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.ynexs.2024.100043>

Bölüm 3

ALG TEMELLİ KARBON GİDERİMİ: BİLİMSEL TEMELLER, ÖLÇÜM YAKLAŞIMLARI VE POLİTİKA BAĞLANTILARI

Betül GÜROY¹

¹ Gıda İşleme Bölümü, Armutlu Meslek Yüksekokulu, Yalova Üniversitesi, Yalova,
Türkiye ORCID ID: 0000-0002-4298-6256

1. GİRİŞ

İklim Politikalarında Alg Temelli Karbon Gideriminin Önemi

İklim değişikliği artık çevre başlığıyla sınırlı değildir; enerji güvenliği, gıda sistemleri, sağlık, altyapı ve jeopolitik istikrarı aynı anda şekillendiren bir risk yönetimi meselesidir. Gözlenen ısınma, insan etkisinin baskın olduğunu ve 1.5–2°C bandında geri beslemelerle kırılma noktası zincirlerinin olası hâle geldiğini göstermektedir (IPCC, 2021; IPCC, 2023; Armstrong McKay ve diğ., 2022). Bu nedenle etkili iklim politikası; hızlı azaltım, yerel uyum yatırımları, erken uyarı–afet hazırlığı, doğa temelli çözümler ve adil geçişi aynı çerçevede birleştirmelidir. Başarı ölçütü, yalnız hedefler değil; izlenebilir göstergeler, şeffaf raporlama ve riskleri düşüren somut uygulama kapasitesidir. Bilim, finans ve yönetim aynı masada bulunduğu toplumun dayanıklılığı kalıcı biçimde artar, belirginleşir.

2015 tarihli Paris Anlaşması, iklim yönetiminde önemli bir paradigma değişimi yaratmış; taraf ülkelerin kendi ulusal katkı beyanlarıyla emisyon azaltım hedeflerini belirlediği ve uzun vadede küresel sıcaklık artışını 1,5–2 °C aralığında sınırlamayı amaçlayan bir çerçeve sunmuştur (IPCC, 2023). Paris Anlaşması (2015), iklim yönetimini “her ülkeye tek tip zorunluluk” yaklaşımından çıkarıp **ülkelerin kendi iklim planlarını** tanımladığı bir sisteme taşıdı. Bu planlara **Ulusal Katkı Beyanı** denir; İngilizce adı **Nationally Determined Contribution (NDC)**. NDC, bir ülkenin belirli bir dönem için **sera gazı emisyonlarını nasıl azaltacağını** (azaltım; İngilizce **mitigation**) ve çoğu zaman **iklim etkilerine nasıl uyum sağlayacağını** (uyum; **adaptation**) anlatan resmî beyanıdır. UNFCCC’ye göre taraflar **her beş yılda bir** yeni veya güncellenmiş NDC sunar; amaç, her döngüde hedeflerin “daha iddialı” hâle gelmesidir (IPCC, 2023; UNFCCC).

Bununla birlikte, mevcut küresel emisyon eğilimleri ve sektörlerin dönüşüm hızları, yalnızca azaltım (mitigation) stratejileriyle hedeflerin tutturulmasının zorlaştığını göstermektedir. Bu noktada “net sıfır” hedeflerinin gerçekçi biçimde ele alınabilmesi için, kalan kaçınılmaz emisyonların (özellikle bazı sanayi kolları ve tarım gibi alanlarda) dengelenmesini sağlayacak karbon giderim yaklaşımlarının devreye girmesi gerekmektedir.

Karbon giderimi ve **Negatif Emisyon Teknolojileri (NETs)**, atmosferden CO₂’yi uzaklaştırıp kalıcı biçimde depolayan yöntemler bütünüdür. **Biyokütle-enerjiyle yakalama ve depolama (BECCS)**, **doğrudan havadan yakalama (DAC)**, doğa temelli çözümler ve biyoteknolojik seçenekler bu ailenin parçalarıdır. Fakat politika için kritik soru “ne kadar

mümkün?”dür: ölçeklenebilirlik, maliyet, enerji-su gereksinimi, arazi/ekosistem etkileri ve toplumsal kabul her yaklaşımı sınırlar. Bu yüzden karbon giderimi, emisyon azaltımının yerine değil, zor azaltılan sektörlerde kalan emisyonları dengeleyen tamamlayıcı bir araç olarak tasarlanmalıdır. Başarı; bütüncül yaşam döngüsü muhasebesi, sızıntı risklerinin yönetimi, adil fayda-yük paylaşımı ve güçlü **Ölçüm-Raporlama-Doğrulama (MRV)** sistemleriyle gerçek giderimin kanıtlanmasına bağlıdır. Aksi hâlde net-sıfır söylemi kolayca güven kaybı üretir (Fuss ve diğ. 2018; Minx ve diğ. 2018; Smith ve diğ. 2016; IPCC, 2022).

Alg temelli karbon giderimi, “net-sıfır” söylemini ölçülebilir iklim faydasına dönüştürme potansiyeli nedeniyle stratejik bir alan hâline gelmiştir. Mikroalgler, açık havuz ve fotobiyoreaktörlerde hızla büyüyerek CO₂’yi biyokütleyle bağlayabilir; özellikle endüstriyel baca gazı kullanımı, yakalama-kullanım entegrasyonunu mümkün kılar (Chisti, 2007; Chisti, 2013). Makroalg yetiştiriciliği ise kıyasal üretim, ekosistem hizmetleri ve mavi karbon tartışmalarıyla birlikte değerlendirilir (Duarte ve diğ., 2017; Howard ve diğ., 2017). Ancak politika tasarımı belirleyici olan, yaşam döngüsü muhasebesiyle kalıcılığın ve yan etkilerin doğrulanmasıdır (Fuss ve diğ., 2018; Smith ve diğ., 2016).

Alg temelli karbon giderimini iklim politikaları açısından özgün kılan, **karbonu “maliyet” olmaktan çıkarıp döngüsel ekonomi içinde değer zincirine** bağlayabilmesidir. Mikroalg ve makroalg biyokütlesi; yem-gıda bileşenleri, biyomalzeme ve kimyasal girdiler gibi ürünlere dönüştürüldüğünde, azaltım ve giderim hedefleriyle uyumlu **yerel istihdam ve sanayi dönüşümü** için kaldıraç işlevi görebilir. Ancak iklim etkisi, biyokütlenin **hangi son kullanımda** değerlendirildiğine bağlıdır: yakıt gibi kısa ömürlü kullanımlar karbonu hızla geri salabilirken, dayanıklı malzemeler veya güvenli depolama rotaları **kalıcılığı (permanence)** güçlendirebilir (Fuss ve diğ., 2018; Smith ve diğ., 2016).

“Okyanus ağaçlandırması/afforestation” ve açık okyanusta yetiştirip batırma gibi iddialı yaklaşımlar ise potansiyel sunsa da çevresel bütünlük, yönetim ve **izleme-raporlama-doğrulama (MRV)** açısından yüksek belirsizlik taşır (N’Yeurt ve diğ., 2012; Troell ve diğ., 2024; European Marine Board, 2025). Bu nedenle politika tasarımı, **LCA + MRV** temelli kanıt standardı olmadan ölçek tartışmasına girmemelidir.

Karbon fiyatlandırma, iklim politikalarının uygulamaya dönük en güçlü araçlarından biri hâline gelmiştir. **Emisyon Ticaret Sistemleri (ETS)**, kapsama alınan sektörlerde toplam sera gazı salımına bir **üst sınıır (cap)** koyar; bu sınır, ilgili dönemde ekonomi genelinde izin verilen **azami emisyon miktarını** ifade eder. Sistem kapsamında her bir emis-

yon izni (allowance) genellikle **1 ton CO₂ eşdeğeri (CO₂e)** salma hakkını temsil eder ve bu izinler piyasa koşullarında alınıp satılabilir (European Commission, n.d.; World Bank, 2025). Böylece emisyon azaltımı, firmalar için maliyet-etkin bir karar sürecine dönüşür.

Ancak ETS'ler esas olarak **mevcut tesislerden kaynaklanan emisyonların azaltılmasını** hedefler. Buna karşılık **karbon giderimi (carbon removals)**, atmosfere salınmış CO₂'nin sonradan yakalanması ve tutulması anlamına geldiğinden, aynı mantıkla “emisyon izni”ne çevrilmez. Bu nedenle giderim faaliyetleri, ETS içinde genellikle **karbon kredisi (offset)** olarak ele alınır. Bu yaklaşımda üç temel çevresel bütünlük ilkesi belirleyicidir: **ilave edilebilirlik (additionality)**, giderimin mevcut politikalar veya piyasa koşulları olmadan gerçekleşmeyecek olması; **kalıcılık (permanence)**, tutulan karbonun uzun vadede atmosfere geri dönmemesi; **çift sayımın önlenmesi** ise aynı giderimin birden fazla aktör veya ülke tarafından eşzamanlı olarak beyan edilmemesidir (Schneider ve diğ., 2019; ICVCM, 2024). Bu bağlamda ilave edilebilirlik, “erken hareket edenleri cezalandıran” bir ilke değil; karbon kredilerinin gerçek iklim faydasını korumayı amaçlayan bir bütünlük kriteridir. Kısa vadede alg üretimine daha önce başlamış firmalar krediye erişimde dezavantajlı görünse de, ölçek artışı, yeni CO₂ kaynaklarıyla entegrasyon ve daha kalıcı ürün rotalarına geçiş gibi **ilave etkiler** yaratıldığında bu dezavantaj avantaja dönüşebilir. Dolayısıyla iklim politikaları açısından belirleyici olan, faaliyetin geçmişi değil; **bugün ve gelecekte kanıtlanabilir biçimde ne kadar ek ve kalıcı karbon giderimi sağladığıdır**. Dolayısıyla alg temelli karbon giderim projelerinin ETS ile ilişkilendirilmesi, ancak güçlü **ölçüm-raporlama-doğrulama (MRV)** sistemleri ve şeffaf muhasebe kurallarıyla mümkündür (World Bank, 2025).

Tam da bu noktada **ölçüm-raporlama-doğrulama (Measurement-Reporting-Verification, MRV)** ile **yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA)**, alg temelli karbon gideriminin bilimsel ve politik meşruiyetini belirleyen temel çerçeveler hâline gelir. MRV, giderilen karbon miktarının **şeffaf, izlenebilir ve bağımsız olarak doğrulanabilir** biçimde ortaya konulmasını sağlayarak iklim iddialarını güvence altına alır. LCA ise enerji, su ve besin girdileri ile yan emisyonları sistematik biçimde hesaba katarak “brüt yakalama” yerine **net iklim faydasını** ortaya koyar (Fuss ve diğ., 2018; IPCC, 2022). Alg üretim sistemlerinde bu iki yaklaşımın birlikte uygulanması, karbon gideriminin yalnız muhasebe düzeyinde değil, **gerçek atmosferik etki** üzerinden değerlendirilmesine imkân tanır. Ayrıca MRV-LCA entegrasyonu, kalıcılık, ilave edilebilirlik ve çift sayımın önlenmesi gibi çevresel bütünlük ilkelerinin pratikte uygulanmasını destekleyerek, alg temelli çözümlerin karbon pi-

yasaları ve iklim politikaları içinde güvenilir biçimde ölçeklenmesinin ön koşulunu oluşturur (Schneider ve diğ., 2019).

Türkiye bağlamında küresel iklim rejimi, aynı anda **uyum zorunluluğu** ve **rekabetçi dönüşüm fırsatı** üretmektedir. 2053 net sıfır hedefinin resmî düzeyde sahiplenilmesi (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023) ve Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) altyapısına yönelik hazırlıkların hızlanması (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025), iklim politikasını “niyet beyanı”ndan “ölçülebilir uygulama” aşamasına taşımaktadır. Avrupa Birliği’nin **Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM)**, ihracata dayalı sektörlerde karbon yoğun üretimin maliyetini görünür kılarak düşük karbonlu üretimi ve raporlama kapasitesini ekonomik bir zorunluluğa dönüştürmektedir (European Commission, 2021). Bu yeni dönemde alg biyoteknolojisi; sanayide baca gazı CO₂’sinin değerlendirilmesi ve atık kaynakların biyoprodukt değer zincirlerine aktarılmasıyla döngüsel ekonomiye dayalı iklim çözümleri geliştirmek için stratejik bir kaldıraç olabilir (Chisti, 2013). Kritik olan, bu potansiyelin MRV–LCA temelli kanıt standardıyla güvenilirliğe dönüştürülmesidir.

Türkiye’nin alg temelli karbon giderimi potansiyeli, **yüksek güneşlenme süresi, uzun kıyı şeridi, jeotermal kaynaklar** ve **sanayi bölgelerinde yoğun CO₂ akışları** gibi özgün avantajların bileşiminden beslenmektedir. Endüstriyel CO₂’nin alg üretim sistemleriyle entegrasyonu, emisyonların **yakalanıp kullanılması (CCU)** yoluyla hem karbon maliyetlerini düşürmekte hem de biyokütle verimini artırarak ekonomik ölçeklenebilirliği güçlendirmektedir (Chisti, 2007; Chisti, 2013). Kıyısız makroalg üretimi ise mavi karbon, ekosistem hizmetleri ve yerel istihdam boyutlarıyla doğa temelli çözümlerin iklim politikalarına entegre edilmesi için stratejik bir zemin sunar (Duarte ve diğ., 2017; Howard ve diğ., 2017). Bununla birlikte kalıcı iklim faydası, yalnız biyolojik potansiyelle değil; **MRV ve LCA temelli kanıt, sürdürülebilir besin tuzu ve su yönetimi, enerji verimliliği ve çevresel bütünlük** ilkelerinin eş zamanlı uygulanmasıyla mümkündür (Fuss ve diğ., 2018; Schneider ve diğ., 2019). Bu bütüncül yaklaşım, Türkiye’yi alg biyoteknolojisinde bölgesel bir iklim-innovasyon merkezine dönüştürebilir.

Bu kitap bölümü, alg temelli karbon giderimini (i) biyofiziksel ve mühendislik temelleri, (ii) ölçüm–raporlama–doğrulama (MRV) ile yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) gerekleri ve (iii) politika–piyasa tasarımı bağlamında bütüncül bir çerçevede ele almaktadır. Hedefimiz, algleri ne “mucize çözüm” olarak idealleştirmek ne de “uygulanamaz” diye dışlamak; potansiyel ile sınırları, kanıt temelli ve ölçülebilir göstergelerle tartışmaktır (IPCC, 2022; Fuss ve diğ., 2018). Bu yaklaşım, alg biyotekno-

lojisini karbon giderimi ile döngüsel ekonomi hedeflerini birlikte ilerletebilecek bir inovasyon alanı olarak konumlandırır (UNEP, 2021; World Bank, 2023). Emisyon azaltımına ek olarak karbon giderimini de içeren çok bileşenli stratejiler, iklim mücadelesinin yeni evresini tanımlamaktadır (IPCC, 2023). Alg sistemlerinin değeri; yüksek fotosentetik kapasite, üretim esnekliği ve çoklu biyoprodukt rotalarında yatmaktadır (Chisti, 2007; Duarte ve diğ., 2017). Ancak ölçeklenebilirlik, MRV/LCA bütünlüğü ve çevresel bütünlük ilkelerine bağlıdır (Schneider ve diğ., 2019; Fuss ve diğ., 2018).

2. ALG TEMELLİ KARBON GİDERİMİNİN BİLİMSSEL TEMELLERİ

Alg temelli karbon gideriminin iklim politikaları ve karbon piyasaları bağlamında sağlıklı değerlendirilebilmesi, bu yaklaşımın dayandığı biyolojik-fizyolojik mekanizmaların açıkça tanımlanmasına bağlıdır. Algler fotosentez yoluyla atmosferik veya suda çözünmüş CO_2 'yi organik karbon bileşiklerine dönüştürerek biyokütle üretir; böylece karbon, en azından biyokütlenin kullanım ömrü boyunca geçici olarak tutulur (Chisti, 2007). Bu sürecin iklim açısından anlamlılığını belirleyen temel değişkenler, fotosentetik verimlilik, büyüme hızı, karbonun hücre bileşenlerine (lipit, protein, karbonhidrat) dağılımı ve üretim sisteminin kaynak girdileridir (Chisti, 2013). Bununla birlikte, “yüksek potansiyel” her zaman “yüksek net fayda” anlamına gelmez: enerji, su ve besin tuzu gereksinimleri ile süreç kaynaklı emisyonlar, net iklim etkisini sınırlayabilir (Smith ve diğ., 2016). Bu nedenle bilimsel temel, yalnız biyolojik kapasiteyi değil, sistem sınırlarını ve net etkiyi birlikte ele alan bir değerlendirme mantığına dayanmalıdır.

2.1 Fotosentetik Karbon Sabitleme Mekanizması

Alglerde fotosentetik karbon sabitleme, kara bitkilerinde olduğu gibi **Calvin-Benson-Bassham (CBB) döngüsü** üzerinden yürür ve temel enzim **RuBisCO**'dur (Giordano ve diğ., 2005). Ancak özellikle mikroalgler ve siyanobakteriler, suda CO_2 'nin sınırlı bulunabilirliği ve RuBisCO'nun O_2 ile rekabeti nedeniyle, **karbon yoğunlaştırma mekanizmaları (Carbon Concentrating Mechanisms, CCMs)** geliştirmiştir (Badger & Price, 2003; Burnap, 2015). CCM'ler; bikarbonat (HCO_3^-) taşınımı, karbonik anhidrazlar ve RuBisCO'nun çevresinde CO_2 'yi yükselten mikro-bölmeleler (siyanobakterilerde **karboksizom**, birçok mikroalgde **pirenoid**) aracılığıyla, karboksilasyon lehine bir ortam kurar ve fotorespirasyon kayıplarını azaltır (Burnap, 2015; Giordano ve diğ., 2005). Bu biyofiziksel “ CO_2 avantajı”, uygun ışık-besin ve reaktör tasarımıyla birleştiğinde, birim alan/zaman başına yüksek üretkenliği mümkün kılabilir; fakat gerçek

iklim katkısı, net enerji ve kaynak girdileriyle birlikte değerlendirilmelidir (Raven, 2017).

Fotosentetik süreçte atmosferden, sudan veya endüstriyel akışlardan sağlanan CO₂, alg hücresinde önce CBB döngüsü aracılığıyla organik karbon iskeletlerine bağlanır; ardından bu karbon **karbonhidrat, protein ve lipit** gibi fraksiyonlara dağıtılarak biyokütleye dönüşür (Chisti, 2007). Bu özellik, alg temelli karbon giderimini yalnızca “CO₂’yi uzaklaştırma” yaklaşımından ayırır; çünkü aynı anda **biyoprodukt üretimi ve değer zinciri** oluşturma potansiyeli taşır (Chisti, 2013). Bununla birlikte iklim politikaları açısından belirleyici metrik “brüt yakalanan CO₂” değil, biyokütlenin kullanım rotasıyla şekillenen **net iklim etkisidir**. Biyokütle kısa ömürlü yakıt/enerji amaçlı kullanıldığında karbon hızla atmosfere geri dönebilir; buna karşılık uzun ömürlü malzemeler, güvenli depolama veya kalıcılığı yüksek ürün rotaları daha güçlü bir iklim faydası üretebilir (Fuss ve diğ., 2018). Bu nedenle her proje, kullanım senaryosu ve yaşam döngüsü muhasebesiyle birlikte tasarlanmalı ve doğrulanmalıdır.

2.2 Mikroalg ve Makroalg Sistemlerinin Temel Farkları

Alg temelli karbon giderimi, uygulama ölçeği ve yönetim gereksinimleri bakımından **mikroalg** ve **makroalg (deniz yosunları)** sistemleri olarak iki ana yaklaşımda ele alınır. **Mikroalgler**, tek hücreli ya da koloni oluşturan organizmalar olup fotobiyoreaktörler ve açık havuzlarda **yüksek derecede kontrollü** koşullarda yetiştirilebilir; ışık, sıcaklık, besin tuzu ve CO₂ akışının hassas ayarı sayesinde **yüksek hacimsel verim** ve endüstriyel baca gazı CO₂’siyle entegrasyon mümkündür (Chisti, 2013). Bu özellikler, ölçülebilirlik ve süreç optimizasyonu açısından güçlü avantajlar sağlarken, enerji ve altyapı gereksinimleri **dolaylı emisyon** ve maliyet risklerini beraberinde getirebilir (Smith ve diğ., 2016).

Makroalgler ise çok hücreli yapılarıyla çoğunlukla denizel ortamda, geniş alanlarda ve görece düşük teknolojiyle üretilebilir; karbon sabitlemeye ek olarak **habitat oluşturma, besin tuzu tutma ve kıyasal dayanıklılık** gibi ekosistem hizmetleri sunar (Duarte ve diğ., 2017; Howard ve diğ., 2017). Bu yönüyle “**mavi karbon**” ve doğa temelli çözümlerle güçlü bir bağ kurar. Ancak açık sistemler; büyüme dalgalanmaları, hasat sonrası kullanım rotaları ve **kalıcılık** belirsizlikleri nedeniyle iklim faydasının kanıtlanmasında ek yönetim gerektirir (Fuss ve diğ., 2018). Sonuçta politika tasarımı, tek bir “en iyi” seçenekten ziyade **bağlama özgü hibrit portföyleri** teşvik etmelidir.

2.3 Karbon Giderimi Potansiyeli ve Sayısal Aralıklar

Alg temelli karbon gideriminin nicel değerlendirilmesinde ilk adım, **biyokütlerdeki karbon içeriğinin** hesaplanmasıdır. Literatürde mikroalg ve makroalg biyokütlesinin **kuru ağırlıkça yaklaşık %45–55 karbon** içerdiği kabul edilmektedir (Smith ve diğ., 2016; Minx ve diğ., 2018). Stokiyometrik olarak 1 ton elementel karbon, 3.67 ton CO₂'ye karşılık gelirken, **1 ton kuru alg biyokütlesi ≈1.6–2.0 ton CO₂ eşdeğeri** brüt sabitlemeyi mümkün kılabilir. Küresel ölçekte CO₂ emisyonlarının ölçeği, karbon gideriminin neden artık “tamamlayıcı” değil “zorunlu” bir bileşen olarak tartışıldığını netleştirir: Fosil yakıt ve sanayiden kaynaklanan küresel CO₂ emisyonları 2000 yılında yaklaşık **25,7 GtCO₂/yıl** düzeyindeydi. Toplam antropojenik CO₂ emisyonları (fosil + arazi kullanımı değişikliği) 2024 için yaklaşık **41,6 GtCO₂/yıl** olarak raporlanmıştır (Friedlingstein ve diğ., 2024). Enerji kaynaklı CO₂ emisyonları da 2024'te **37,8 GtCO₂** ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşmıştır (International Energy Agency, 2025). Bu büyüklükler karşısında alg temelli giderim “tek başına çözüm” olamaz; ancak makul ölçeklerde bile fark yaratabilir: **1 milyon ton/yıl kuru alg biyokütlesi**, biyokütlenin %45–55 karbon içeriği varsayımıyla **≈1,6–2,0 milyon ton CO₂** brüt sabitlemeye karşılık gelir (Minx ve diğ., 2018; Smith ve diğ., 2016). İklim etkisi brüt değil **net** olduğundan, politika hedefi ve kredi üretimi MRV–LCA ile doğrulanan net giderim üzerinden tanımlanmalıdır (Fuss ve diğ., 2018). Örneğin, yıllık 30 ton kuru mikroalg üreten bir fotobiyoreaktör hattı, teorik olarak **48–60 ton CO₂e** brüt karbon bağlayabilir. Benzer şekilde, hektar başına yılda 10–20 ton kuru makroalg biyokütlesi üreten bir kıyısız çiftlik, **16–40 ton CO₂e** brüt sabitleme potansiyeline sahiptir (Duarte ve diğ., 2017).

Ancak politika açısından belirleyici olan **net karbon giderimidir**. Net değer; enerji tüketimi (karıştırma, hasat), besin tuzu girdileri ve CO₂ temininde oluşan dolaylı emisyonlar düşüldükten sonra hesaplanır (Fuss ve diğ., 2018). Yaşam döngüsü değerlendirmeleri, bazı mikroalg sistemlerinde brüt değer %30–60'ının girdilerle dengelenebileceğini; düşük girdili makroalg sistemlerinde ise net giderimin brüt değere daha yakın olabildiğini göstermektedir (Smith ve diğ., 2016). Bu nedenle alg temelli giderimin iklim katkısı, **tür–sistem–kullanım rotası** temelinde ve LCA ile doğrulanmalıdır.

2.4 Biyokütlenin Kullanım Yolları ve Karbonun Kalıcılığı

Alg temelli karbon gideriminin iklim etkisi, büyük ölçüde üretilen biyokütlenin **hangi kullanım rotasına** yönlendirildiğine ve karbonun **ne kadar süreyle sistem dışında kaldığına** bağlıdır. Biyokütle **biyoyakıt** olarak değerlendirildiğinde karbon, yanma ile kısa sürede atmosfere geri

döner; bu durumda etki çoğunlukla “karbon giderimi”nden ziyade fosil yakıtların yerini alma üzerinden bir **emisyona ikamesi** olarak yorumlanır (Chisti, 2013). Buna karşılık biyokütlenin **biyoplastikler, kompozitler, yapı malzemeleri** veya daha uzun ömürlü biyoproduklere dönüştürülmesi, karbonun kullanım ömrü boyunca tutulmasını sağlayarak **kalıcılık (permanence)** niteliğini güçlendirebilir; ancak gerçek fayda, yaşam döngüsü boyunca enerji ve proses emisyonları düşüldükten sonra ortaya çıkan net etkiye bağlıdır (Fuss ve diğ., 2018).

Akuakültür ve yem uygulamaları ise farklı bir iklim yolu sunar: Alg katkılı yemlerin yem dönüşüm oranını (FCR) iyileştirmesi, birim balık üretimi başına daha az yem tüketimi ve dolayısıyla daha düşük “gömülü emisyon” anlamına gelebilir. Bu etki doğrudan karbon giderimi değildir; ancak net iklim faydasına katkı sağlayan **dolaylı emisyon azaltımı** olarak politika tasarımı dikkate alınmalıdır (Smith ve diğ., 2016).

2.5 Ölçeklenebilirlik, Kaynak Gereksinimleri ve Sınırlılıklar

Alg temelli karbon gideriminin biyolojik temeli güçlü olsa da, iklim politikaları açısından belirleyici eşik **ölçeklenebilirliktir**. Büyük ölçekli üretimde su, enerji ve özellikle azot-fosfor gibi besin tuzu gereksinimleri hızla artabilir; bu girdiler hem maliyeti yükseltir hem de yanlış tasarlandığında “net” iklim faydasını azaltabilecek dolaylı emisyonlar doğurur (Fuss ve diğ., 2018; IPCC, 2022). Bu nedenle en rasyonel büyüme stratejisi, alg üretimini **atıksu arıtımı, endüstriyel yan akımların geri kazanımı ve yenilenebilir enerji** ile eşleştiren entegre tasarımlardır; amaç, aynı biyokütleyi üretirken kaynak baskısını düşürmek ve MRV-LCA ile doğrulanmış net giderimi artırmaktır (IPCC, 2022). Bununla birlikte çevresel bütünlük, ölçek kadar kritiktir: açık denizde “ocean afforestation” gibi daha iddialı yaklaşımlar teorik potansiyel sunsa da ekosistem etkileri, yönetim ve izlenebilirlik belirsizlikleri nedeniyle ihtiyatlı bir değerlendirmeye gerektirir (N’Yeurt ve diğ., 2012; Schneider ve diğ., 2019). Sonuç olarak, alg projelerinin iklim katkısı “ne kadar biyokütle üretildiğiyle” değil, **hangi girdilerle, hangi kalıcılıkla ve hangi doğrulama standardıyla** üretildiğiyle belirlenir.

2.6 Bilimsel Temelden Politika Tartışmasına Geçiş

Alg temelli karbon gideriminin biyolojik ve mühendislik temelleri, bu yaklaşımın iklim politikalarında **nasıl ve hangi koşullarda** konumlandırılacağına ilişkin tartışmaların başlangıç noktasını oluşturur. Fotosentetik kapasite, biyokütle üretim hızları ve kullanım rotaları; politika düzeyinde **kalıcılık, ilave edilebilirlik ve ölçülebilirlik** gibi temel kriterlerle doğrudan bağlantılıdır (Schneider ve diğ., 2019). Bu nedenle

alg temelli çözümler, yalnızca bir biyoteknoloji uygulaması olarak değil; **ölçüm-raporlama-doğrulama (MRV)** standartları ve karbon piyasalarıyla etkileşimi üzerinden değerlendirilmelidir. Bilimsel veriler, alg sistemlerinin belirli bağlamlarda anlamlı bir katkı sunabileceğini gösterirken, aynı veriler **sınırların** da açık biçimde tanımlanmasını gerektirir; bu denge, politika tasarımıyla “aşırı iyimserlik” ile “aşırı ihtiyat” arasındaki çizgiyi belirler (IPCC, 2022). Bu bölümde sunulan çerçeve, alg temelli karbon gideriminin potansiyelini ve sınırlılıklarını birlikte ele alarak, izleyen bölümlerde tartışılacak **MRV, LCA ve politika/piyasa entegrasyonu** başlıkları için analitik bir temel sağlar. Türkiye’de bu bilim-politika geçişinin yasal zemini, **7552 sayılı İklim Kanunu** ile açık biçimde tanımlanmıştır. Kanun, amacını “**yeşil büyüme vizyonu ve net sıfır emisyon hedefi** doğrultusunda iklim değişikliğiyle mücadele” olarak koyarken, mücadelenin esasını **sera gazı emisyonlarının azaltımı ve iklim değişikliğine uyum** faaliyetleri olarak çerçeveler (T.C. Resmî Gazete, 2025). Bu yaklaşım, emisyon azaltımının yalnızca teknik bir konu değil; planlama, uygulama araçları, izin-denetim ve piyasa temelli mekanizmalarla desteklenen bir yönetim alanı olduğunu vurgular (T.C. Resmî Gazete, 2025). Ayrıca azaltım ve uyum faaliyetlerindeki ilerlemenin **yıllık bazda izlenmesi** ve karbon fiyatlandırmasına ilişkin mekanizmaların düzenlenmesine yönelik kurumsal yetki tanımı, MRV ve şeffaf raporlamayı fiilen politika tasarımının merkezine taşır (T.C. Resmî Gazete, 2025). Bu çerçevede alg temelli çözümler, ancak net iklim faydasını kanıtlayan MRV-LCA altyapısı kurulduğunda, yeşil büyüme hedefiyle uyumlu biçimde karbon piyasaları ve sektörel dönüşüm gündemine eklenilebilir (T.C. Resmî Gazete, 2025). Sonuç olarak algler, iklim mücadelesinde güçlü fakat **koşullu** bir araçtır; gerçek katkıları ancak bilimsel gerçekçilik, şeffaf ölçüm ve bütüncül değerlendirme yaklaşımlarıyla ortaya konulabilir (Fuss ve diğ., 2018).

3. Alg Temelli Karbon Gideriminde Ölçüm, Raporlama ve Doğrulama (MRV) ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

Alg temelli karbon gideriminin iklim politikaları ve karbon piyasalarında güvenilir bir araç olarak kabul edilebilmesi, yalnızca fotosentetik kapasiteye veya üretilen biyokütle miktarına değil; bu süreçlerin ölçülebilir, raporlanabilir ve doğrulanabilir olmasına bağlıdır. Bilimsel ve politik düzlemde meşruiyet, giderim iddialarının sayısallaştırılabilir kanıtlar ve şeffaf muhasebe ile desteklenmesini gerektirir (IPCC, 2022). Bu bağlamda MRV, giderilen karbon miktarının izlenmesini, standartlara uygun raporlanmasını ve bağımsız doğrulamasını sağlayarak çevresel bütünlüğü güvence altına alır. LCA ise enerji, su ve besin girdileri ile proses kaynaklı

emisyonları kapsayan sistem sınırları içinde net iklim etkisini ortaya koyar; brüt yakalamanın ötesinde gerçek faydayı belirler (Fuss ve diğ., 2018).

Alg sistemlerinde MRV-LCA entegrasyonu, kalıcılık, ilave edilebilirlik ve çift sayımın önlenmesi gibi piyasa kriterlerinin uygulanabilirliğini güçlendirir (Schneider ve diğ., 2019). Bu entegrasyon olmadan, alg temelli projeler yeşil yıkama riskine açık kalır; buna karşılık güçlü MRV-LCA çerçevesi, alg biyoteknolojisini politika hedefleriyle uyumlu, ölçeklenebilir ve yatırım çekici bir iklim çözümüne dönüştürür.

3.1 MRV Kavramının Karbon Giderimindeki Rolü

Karbon gideriminde **MRV**, yalnızca sonuçların raporlandığı bir idari prosedür değil; **bilimsel belirsizliği yöneten** ve politika riskini azaltan bir karar altyapısıdır. Alg temelli projelerde MRV'nin özgün değeri, biyolojik süreçlerin zamansal ve mekânsal değişkenliğini **operasyonel metriklere** dönüştürmesinde ortaya çıkar. Örneğin ölçüm, yalnızca biyokütle miktarını değil; **elementel karbon fraksiyonu**, **karbonun ürün havuzlarına dağılımı** ve **hasat aralıklarının** etkisini kapsamalıdır. Raporlama, bu ölçümlerin **baz senaryo** (counterfactual) ile karşılaştırılmasını ve belirsizlik aralıklarının açıkça beyanını gerektirir. Doğrulama ise, sensör kalibrasyonu, kütle-denge denetimleri ve bağımsız saha kontrolleriyle **çift sayımı** ve metodolojik kaymaları önler (Schneider ve diğ., 2019).

Alg sistemlerinde **ilave edilebilirlik**, çoğu zaman kapasite artışı, yeni CO₂ entegrasyonu veya daha kalıcı ürün rotasına geçiş gibi **marjinal değişimler** üzerinden kanıtlanır. **Kalıcılık** ise biyokütlenin yakıt, yem veya uzun ömürlü malzeme olarak kullanımına göre farklı süreler için izlenir; MRV bu farklılıkları **zaman-ağırlıklı muhasebe** ile yakalamalıdır (Fuss ve diğ., 2018). Sonuçta MRV, alg projelerini “iyi niyetli” iddialardan ayırarak **yatırım yapılabilir** ve **politika-uyumlu** çözümlere dönüştürür (Smith ve diğ., 2016).

3.2 Alg Temelli Sistemlerde Ölçüm Zorlukları

Alg temelli karbon gideriminde en zor adım çoğu zaman “ne kadar biyokütle üretildiği” değil, **hangi karbonun gerçekten atmosferden uzaklaştırıldığını** ayırtırmaktır. Mikroalg fotobiyoreaktörlerinde veya açık havuzlarda ölçüm, yalnız kuru ağırlıkla sınırlı kalmaz; gaz-sıvı kütle transferi, pH'a bağlı **çözünmüş inorganik karbon (DIC)** dengesi ve CO₂'nin yeniden atmosfere kaçışı, brüt fotosentez sinyalini kolayca “şişirebilir” (Quinn & Davis, 2014; Lardon ve diğ., 2009). Bu nedenle iyi MRV, kütle-denge yaklaşımıyla **CO₂ giriş/çıkış akıları**, DIC havuzu ve biyokütle karbon fraksiyonunu birlikte izlemeli; belirsizliği nicel raporlamalıdır (ISO, 2006a, 2006b). Makroalg çiftliklerinde ise açık sistem dinamikleri

baskındır: akıntı, ışık ve besin dalgalanmaları kadar, hasat dışı biyokütle kaybı ve karbonun sedimente mi yoksa tekrar dolaşıma mı gittiği sorusu ölçümü zorlaştırır (Duarte ve diğ., 2017). Ayrıca endüstriyel CO₂ kullanılan projelerde “aynı karbonun iki kez sayılması” riski, muhasebe sınırlarının titizlikle tanımlanmasını gerektirir (Schneider ve diğ., 2019). Bu bağlamda deniz yosunu temelli giderim için geliştirilen metodoloji çerçevelerinin aradığı ayrıntılı izleme adımları, ölçüm zorluklarının politika tasarımına nasıl yansındığını somutlaştırır (Verra, 2024).

3.3 Raporlama ve Şeffaflık Gereklilikleri

Alg temelli karbon gideriminde raporlama, yalnız “sonuç bildirme” değil; projenin iklim iddiasını **denetlenebilir bir kanıt zincirine** dönüştüren tasarım unsurudur. Güçlü raporlama, önce **sistem sınırlarını** (hangi akışlar dâhil/hariç), **referans senaryoyu** ve “çıktı metriklerini” (brüt yakalama, net giderim, ürün-havuzu kalıcılığı) açıkça tanımlar; ardından bu tanımların hangi veri kaynaklarıyla ve hangi sıklıkta üretildiğini beyan eder (IPCC, 2022; GHG Protocol, 2005). Alg projelerinde şeffaflık, özellikle CO₂ kaynağı (atmosfer mi, baca gazı mı), DIC dinamikleri ve yan süreç emisyonları gibi parametrelerin **izlenebilir kayıtlarla** sunulmasını gerektirir; aksi hâlde aynı tonun farklı aktörlerce iddia edilmesi (çift sayım) veya yanlış sınıflandırma riski artar (Schneider ve diğ., 2019). Raporlar ayrıca **belirsizlik bütçesi** (ölçüm hatası, temsil edilebilirlik, model varsayımları) içermeli ve doğrulama için izlenebilir iz (audit trail) sağlamalıdır (ISO, 2019). Gönüllü piyasalarda ise iddiaların güvenilirliği, kredi kalitesine ek olarak, şirketlerin “nasıl iddia kurduğu”nu da şeffaflaştıran çerçevelerle güçlenmektedir (ICVCM, 2024; VCMİ, 2025). Gönüllü piyasalarda bu nedenle yalnız “kredi satın almak” yeterli kabul edilmez; şirketlerin bu kredileri **hangi amaçla** kullandığını ve **kendi emisyon azaltımlarına kıyasla** nasıl konumlandığını açıkça beyan etmesi beklenir (VCMİ, 2025). ICVCM’nin Core Carbon Principles yaklaşımı, kredinin **temel kalite şartlarını** (ör. ilave edilebilirlik, kalıcılık, sağlam MRV) tanımlarken, VCMİ Claims Code şirketlerin pazarlama ve raporlama dilini disipline ederek **hangi tür iklim iddialarının hangi koşullarda yapılabileceğini** sınırlar (ICVCM, 2024; VCMİ, 2025). Böylece “net-sıfır” gibi güçlü ifadeler, yalnız kredi alımına değil; şeffaf metodolojiye, izlenebilir raporlamaya ve azaltım–giderim dengesinin kanıtlanmasına dayandırılır (VCMİ, 2025).

3.4 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) ve Net Karbon Etkisi

Alg temelli karbon gideriminin iklim açısından **gerçek katkısını** belirleyen temel araç, yaşam döngüsü değerlendirmesidir (Life Cycle Assessment, LCA). LCA, bir alg sisteminin hammadde ve girdi temininden

(su, enerji, besin tuzu), üretim ve hasada, biyokütlenin işlenmesi, kullanımı ve bertarafına kadar uzanan tüm aşamalardaki emisyonları bütüncül biçimde hesaplar (ISO, 2006; IPCC, 2022). Bu yaklaşım, yüksek fotosentetik kapasitenin her zaman yüksek **net karbon giderimi** anlamına gelmediğini açıkça ortaya koymaktadır. Nitekim bazı mikroalg sistemlerinde karıştırma, kurutma ve CO₂ saflaştırma için harcanan enerji, brüt karbon sabitlemenin önemli bir kısmını dengeleyebilmektedir (Lardon ve diğ., 2009; Smith ve diğ., 2016). Buna karşılık atıksu entegrasyonu, endüstriyel atık ısı kullanımı veya yenilenebilir enerjiyle çalışan sistemler, net CO₂e bilançosunu belirgin biçimde iyileştirebilir (Quinn & Davis, 2014).

LCA'nın bir diğer kritik katkısı, **kullanım yolları arasında karşılaştırma** yapabilesidir. Aynı alg biyokütlesinin biyoyakıt, yem katkısı veya biyoplastik olarak değerlendirilmesi, karbonun atmosfer dışında kalma süresini ve dolayısıyla giderim niteliğini kökten değiştirir (Fuss ve diğ., 2018). Bu nedenle politika ve piyasa mekanizmaları, alg temelli projeleri LCA ile doğrulanmış **net etki sınıflarına** göre ele almak zorundadır.

3.5 MRV ve LCA'nın Birlikte Kullanımı

Alg temelli karbon gideriminde **MRV** ve **LCA**'nın birlikte kullanımı, niceliği "kanıtlanan" bir giderimin çevresel olarak da **anlamlı** olup olmadığını ayırt eden kritik bir sentez sunar. MRV, belirli bir dönem ve sistem sınırı içinde giderilen karbonun **ne kadar** olduğunu, hangi belirsizliklerle ölçüldüğünü ve nasıl doğrulandığını ortaya koyar. LCA ise aynı faaliyet için **neden ve hangi bedelle** bu sonuca ulaşıldığını; enerji, su, besin girdileri ve yan emisyonlar dâhil olmak üzere **net CO₂e** bilançosunu hesaplar (ISO, 2019; IPCC, 2022). Bu entegrasyon olmadan, yüksek brüt yakalama değerleri yanlış yönlendirici olabilir.

Uygulamada iyi tasarlanmış bir çerçeve, MRV çıktılarının LCA envanterine **doğrudan girdi** olmasını ve zaman-ağırlıklı kalıcılığın (ör. ürün-havuzu ömürleri) LCA etki kategorilerine yansıtılmasını gerektirir. Örneğin endüstriyel CO₂ ile beslenen bir mikroalg tesisinde MRV, net biyokütle karbonunu doğrularken; LCA, CO₂ saflaştırma ve enerji kullanımının krediyi **ne ölçüde erozyona uğrattığını** gösterir (Quinn & Davis, 2014). Gönüllü piyasalar ve Paris Anlaşması Madde 6 bağlamında bu eşgüdüm, **çift sayımı önleyen muhasebe, ilave edilebilirliği kanıtlayan baz senaryo ve kalıcılığı sınıflayan raporlama** ile güveni tesis eder (Schneider ve diğ., 2019; ICVCM, 2024). Sonuçta MRV-LCA birlikteliği, alg projelerini iddiadan **yatırım yapılabilirliğe** taşır.

3.6 Politika ve Piyasa Açısından Çıkarımlar

MRV ve LCA birlikte ele alındığında, alg temelli karbon gideriminin iklim politikaları ve karbon piyasalarında **hangi rolde ve hangi koşullarla** yer alabileceğine dair net çıkarımlar üretir. Mevcut **Emisyon Ticaret Sistemleri (ETS)**, ağırlıklı olarak tesis-bazlı emisyonları azaltmayı hedeflediğinden, biyolojik karbon giderimi çoğu yargı alanında **izin (allowance)** yerine **kredi/offset** mantığıyla konumlandırılmaktadır (World Bank, 2023). Bu ayrım, alg projelerinin politika mimarisinde “tamamlayıcı” bir işlev üstlenmesini; özellikle zor azaltılan sektörler için **geçiş aracı** olarak tasarlanmasını mümkün kılar (IEA, 2023). Ancak bu entegrasyon, ancak MRV-LCA ile kanıtlanmış **çevresel bütünlük, ilave edilebilirlik** ve **kalıcılık sınıflandırması** sağlandığında meşruiyet kazanır (Schneider ve diğ., 2019).

Piyasa tarafında standartlaşmış MRV-LCA, yatırımcılar için **öngörülebilirlik** ve **risk fiyatlaması** sağlar; düşük bütünlüklü kredilerin elenmesiyle piyasa güvenini artırır (ICVCM, 2024). Politika yapıcılar açısından ise temel denge, bir yandan **yeşil yıkamayı** önlerken diğer yandan **öğrenme eğrilerini** ve erken dönem yatırımları desteklemektir. Bu nedenle aşamalı standartlar, zamanla sıkılaştıran kalıcılık eşikleri ve performansla bağlı teşvikler, alg temelli çözümlerin uzun vadeli iklim stratejilerine **ölçeklenebilir** biçimde eklenmesini sağlayabilir (IPCC, 2022; World Bank, 2023).

4. Alg Temelli Karbon Gideriminin Uygulama Alanları ve Entegrasyon Modelleri

Alg temelli karbon giderimi, yalnız biyolojik bir süreç değil; **sektörler arası entegrasyon** yoluyla ölçek kazanan bir uygulama setidir. En olgun modellerden biri, **endüstriyel CO₂ kullanımına (CCU)** dayalı entegrasyondur: çimento, demir-çelik ve enerji tesislerinden çıkan baca gazı CO₂'sinin mikroalg üretiminde kullanılması, hem noktasal emisyonları değerlendirir hem de ölçülebilir karbon akışları yaratır (Chisti, 2013; IEA, 2023). **Atıksu arıtımıyla eşleştirme**, besin tuzu geri kazanımı ve enerji tasarrufu sayesinde net iklim etkisini güçlendirirken, belediye ve tarım altyapılarıyla yerel ölçekte ölçeklenebilirlik sunar (Quinn & Davis, 2014). **Kıyasal makroalg çiftlikleri**, mavi ekonomi kapsamında karbon sabitlemeye ek olarak besin tuzu tutma ve habitat hizmetleri üretir; ancak açık sistem dinamikleri nedeniyle yönetim ve izleme gereksinimleri yüksektir (Duarte ve diğ., 2017). **Akuakültür-yem entegrasyonu** ise doğrudan giderimden ziyade dolaylı emisyon azaltımı yoluyla etki üretir ve yaşam döngüsü muhasebesiyle değerlendirilmelidir (Smith ve diğ., 2016). Bu çeşitlilik, politika açısından tekil bir çözüm yerine **bağlama özgü portföy**

yaklaşımını gerekli kılar; entegrasyon modeli, MRV-LCA ile doğrulanan net etki üzerinden seçilmelidir (IPCC, 2022; Fuss ve diğ., 2018).

4.1 Biyokütle Üretimi ve Biyoprodukt Entegrasyonu

Alg temelli karbon gideriminde biyokütle üretimi, iklim etkisini belirleyen **ürün portföyü** ve **karbonun tutulma süresi** ile birlikte düşünülmelidir. Mikroalg biyokütlesi; lipit, protein ve karbonhidrat fraksiyonları sayesinde biyoyakıt, yem/katkı, kimyasal ara ürünler ve biyomalzemelere yönlendirilebilir (Chisti, 2007; Chisti, 2013). Ancak politika açısından kritik ayrım, aynı biyokütlenin “**ikame**” mi yoksa “**giderim**” mi ürettiğidir: biyoyakıtı giden karbon, kısa döngüde atmosfere döner ve etkisi çoğunlukla fosil yakıt ikamesiyle sınırlı kalır (Fuss ve diğ., 2018). Buna karşılık biyokütlenin biyoplastik/kompozit gibi **uzun ömürlü ürünlere** aktarılması, karbonu ürün havuzunda yıllarca tutarak kalıcılık bileşenini güçlendirebilir (Smith ve diğ., 2016; Cherubini, 2010).

Bu nedenle “en iyi ürün” tek değildir; **kademeli kullanım (cascading use)** ve LCA’da **sistem genişletme/ikame kredisi** gibi yaklaşımlar, hem ekonomik değer hem net CO₂e açısından rasyonel seçenekleri ortaya çıkarır (ISO, 2006). Karbon piyasaları bakımından ise ürünün ömrü, geri dönüşüm/bertaraf yolu ve muhasebe sınırları açıkça raporlanmadıkça, kredilendirme çevresel bütünlük testini geçemez (Schneider ve diğ., 2019).

4.2 Endüstriyel CO₂ Kullanımı ve Entegre Sistemler

Alg temelli yaklaşımların en uygulanabilir entegrasyon modellerinden biri, **noktasal endüstriyel CO₂ akışlarının** (çimento, demir-çelik, rafineri, enerji ve kimya) alg üretiminde karbon kaynağı olarak kullanılmasıdır. Bu model, **karbon yakalama ve kullanımı (CCU)** mantığıyla, sürekli ve ölçülebilir bir CO₂ beslemesi sağlayarak üretim kararlılığını artırır; aynı zamanda baca gazı arıtımı, atık ısı kullanımı ve atıksu-besin geri kazanımıyla bir **endüstriyel simbiyoz** kurgusuna dönüşebilir (IPCC, 2022; Chisti, 2013). Ancak politika açısından kritik ayrım şudur: Noktasal bir kaynaktan (ör. çimento bacası) alınan CO₂’nin alg biyokütlesine aktarılması, karbonun **yalnızca geçici olarak** biyolojik bir havuzda tutulduğu anlamına gelebilir ve bu nedenle otomatik olarak “kalıcı karbon giderimi” sayılmaz. Kalıcılık; biyokütlenin **hangi ürün rotasına** gittiğine (biyoyakıt, yem, gübre, biyoplastik, kompozit vb.), bu ürünün **kullanım ömrüne** ve ömür sonunda karbonun **yakılarak atmosfere geri dönüp dönmediğine**, depolanıp depolanmadığına ya da uzun ömürlü bir malzeme havuzunda kalıp kalmadığına göre belirlenir. Örneğin biyoyakıt senaryosunda karbon haftalar-aylar ölçeğinde geri dönerken, biyomalzeme/kompozit kullanımında yıllar-on yıllar ölçeğinde ürün havuzunda

kalabilir; bu fark, kredilendirme mantığında “giderim” ile “ikame” ayrımını belirleyebilir (Quinn & Davis, 2014). Ayrıca CO₂ saflaştırma, karıştırma, hasat/kurutma ve kimyasal girdiler gibi süreçlerin enerji ayak izi yüksekse, brüt yakalama değerinin önemli kısmı dolaylı emisyonlarla dengelenebilir. Bu nedenle karbonun gerçekten net olarak uzaklaştırılıp uzaklaştırılmadığı, sistem sınırları açık tanımlanmış bir LCA içinde **net CO₂e bilançosu** üzerinden değerlendirilmelidir (ISO, 2006).

Muhasebe boyutunda en kritik risk, **attribution** (karbon azaltımının veya gideriminin hangi aktöre atfedileceği) ve **çift sayımın önlenmesidir**. ETS kapsamındaki bir tesisten çıkan CO₂, tesis tarafından hâlihazırda raporlanan ve izinlere tabi bir emisyon olduğundan, bu akışın alg sisteminde kullanılması durumunda aynı karbon hem tesisin azaltımı hem de alg projesinin karbon kredisi olarak beyan edilemez. Bu nedenle MRV tasarımı, **proje sınırlarını** (hangi karbon akışlarının projeye ait olduğu), **baz senaryoyu** (alg entegrasyonu olmasaydı CO₂'nin nasıl raporlanacağı) ve **veri zincirini** (ölçüm noktaları, sahiplik ve raporlama sorumluluğu) açık biçimde tanımlamalı ve bağımsız doğrulamayla güvence altına almalıdır (GHG Protocol, 2005; Schneider ve diğ., 2019). Aksi hâlde entegrasyon, iklim faydasını olduğundan büyük gösteren muhasebe sonuçları doğurabilir. Buna karşılık doğru tasarlanmış muhasebe ve MRV çerçevesi, alg temelli CCU uygulamalarını deneysel girişimler olmaktan çıkarak, **düzenlenebilir, karşılaştırılabilir ve politika uyumlu** iklim araçları hâline getirir.

4.3 Akuakültür ve Yem Entegrasyonu

Alg temelli biyokütlenin akuakültür ve yem sektörüne entegrasyonu, karbon gideriminden ziyade **sistem verimliliği yoluyla dolaylı emisyon azaltımı** üreten bir uygulama alanı sunar. Mikroalg ve makroalgler; yüksek kaliteli **protein, omega-3 yağ asitleri (EPA/DHA), pigmentler** ve **biyoaktifler** bakımından zengin olup, balık yemlerinde fonksiyonel katkı olarak kullanılabilmektedir (Naylor ve diğ., 2021; Sprague ve diğ., 2017). Alg katkılı yemlerin **yem dönüşüm oranını (FCR)** iyileştirmesi, birim balık üretimi için daha az yem tüketimi ve buna bağlı **gömülü emisyonların** azalması anlamına gelir; bu etki LCA çerçevesinde ürün bazlı karbon ayak izine yansıtılabilir (Smith ve diğ., 2016).

İklim muhasebesi açısından bu yaklaşım “giderim” olarak sınıflandırılmasa da, **ikame etkisi** (balık unu/yağı gibi yüksek emisyonlu girdilerin azaltılması) ve **performans artışı** yoluyla net CO₂e tasarrufu sağlayabilir (IPCC, 2022). Piyasa tarafında ise değer, karbon kredilerinden ziyade **ürün karbon ayak izi (PCF)** beyanları, düşük karbonlu tedarik zinciri sertifikaları ve sürdürülebilirlik etiketleri üzerinden oluşur (ISO,

2018). Bu nedenle akuakültür entegrasyonu, alg biyokütlesini yüksek katma değerli bir **iklim-verimlilik kaldıraçına** dönüştürür.

4.4 Atıksu Arıtımı ve Besin Tuzu Geri Kazanımı

Atıksu arıtımıyla entegre alg sistemleri, alg temelli iklim çözümlerinin “ölçek bariyerini” aşması için en gerçekçi güzergâhlardan biridir; çünkü en pahalı girdiler olan **azot (N)**, **fosfor (P)** ve su, zaten mevcut bir atık akışından sağlanabilir. Yüksek oranlı algal havuzlar (high-rate algal ponds) ve benzeri proseslerde alg-bakteri birlikteliği; fotosentezle oksijen üretir, organik madde giderimini destekler ve aynı anda N-P uzaklaştırımı sağlayarak su kalitesini iyileştirir (Craggs ve diğ., 2012; Park ve diğ., 2011). İklim açısından özgün katkı, yalnızca biyokütle üretimi değil, **gübre üretimi ve taşımacılığına bağlı “gömülü emisyonların”** azaltılması ve besin tuzlarının geri kazanımıyla döngüsellüğün güçlenmesidir (UNEP, 2021; IPCC, 2022). Ancak net fayda, proseste oluşabilecek **N₂O** ve **CH₄** gibi güçlü sera gazlarının kontrolüne ve enerji gereksiniminin LCA ile doğru sınırlandırılmasına bağlıdır (Clarens ve diğ., 2010; Fuss ve diğ., 2018). Bu nedenle MRV, besin tuzu kütle dengesi, gaz akıları ve biyokütle karbon fraksiyonunu birlikte izlemelidir; aksi hâlde su arıtımındaki kazanımlar iklim muhasebesinde görünmez kalabilir (Schneider ve diğ., 2019).

4.5 Denizel Makroalg Çiftlikleri ve Mavi Karbon

Denizel makroalg çiftlikleri, alg temelli iklim çözümleri içinde hem en yüksek ölçek vaatlerinden birini hem de en karmaşık muhasebe sorunlarını barındırır. Makroalgler hızlı büyüme ve geniş alanlara yayılabilme kapasitesiyle kıyısız ekonomilerde üretken bir biyokütle kaynağı sunarken, aynı zamanda habitat sağlama ve besin tuzu tutma gibi ekosistem hizmetleri üretebilir (Duarte ve diğ., 2017; Howard ve diğ., 2017). Ancak “mavi karbon” perspektifinde kritik soru şudur: Makroalglerin sabitlediği karbonun ne kadarı gerçekten **uzun süreli depolama havuzlarına** (derin deniz, sediman, uzun ömürlü ürünler) aktarılmakta, ne kadarı ise ayrışma ve solunumla kısa sürede tekrar dolaşıma dönmektedir? Bu belirsizlik, makroalglerin klasik mavi karbon ekosistemleri (mangrov, deniz çayırıları, tuzcul bataklıklar) kadar “otomatik” biçimde kredilendirilemesinin temel nedenidir (Duarte ve diğ., 2013). Nitekim deniz yosunu “karbon giderimi” iddiaları, karbonun kaderini izleyen MRV yaklaşımları ve metodoloji geliştirme çabaları olmadan çevresel bütünlük testini geçemez (Schneider ve diğ., 2019; Verra, 2024). Bu nedenle politika tasarımı, makroalg çiftliklerini erken aşamada **pilot-öğrenme** alanı olarak konumlandırmalı; kredilendirmeyi ancak kalıcılığı kanıtlayan izleme ve muhasebe standartlarıyla aşamalı biçimde açmalıdır (Fuss ve diğ., 2018).

Sonuç

Alg temelli karbon giderimi, tek bir teknoloji değil; **farklı biyolojik mekanizmalar, farklı sistem sınırları ve farklı risk profilleri** taşıyan bir çözüm ailesidir. Bu nedenle iklim faydası, ölçeklenebilirlik, maliyet ve çevresel bütünlük performansı uygulamadan uygulamaya değişir. Kontrollü mikroalg üretim sistemleri (fotobiyoreaktörler/açık havuzlar) yüksek ölçülebilirlik ve süreç kontrolü sayesinde **MRV uyumunu** güçlendirirken; açık su ve denizel makroalg sistemleri **ekosistem hizmetleri** ve kıyasal faydalar sunmakla birlikte, çevresel değişkenlik ve sınır belirleme zorlukları nedeniyle daha yüksek belirsizlik içerir (IPCC, 2022). Bu bulgu, alg temelli giderimin “tek tip” bir çözüm gibi sunulmasının bilimsel ve politik açıdan hatalı olduğunu; tersine **uygulamaya özgü, modüler ve bağlama duyarlı bir portföy yaklaşımının** gerekli olduğunu göstermektedir.

Bu bölüm, alg temelli karbon giderimini bilimsel temellerinden başlayarak MRV/LCA gerekliliklerine ve uygulama alanlarına uzanan bütüncül bir çerçevede ele almıştır. İklim politikalarının geldiği aşamada, yalnızca emisyon azaltımına dayalı stratejilerin hedefleri güvence altına almakta yetersiz kalabileceği; **karbondioksit gideriminin (CDR)** giderek daha merkezi bir rol üstlendiği açıktır (IPCC, 2023). Alg temelli yaklaşımlar, fotosentetik kapasite, üretim esnekliği ve biyokütlenin çoklu kullanım alanları sayesinde bu yeni paradigmanın dikkat çekici bileşenlerinden biridir. Ancak bu seçenek, ancak **bilimsel gerçekçilik ve çevresel bütünlük** sağlandığında iklim politikasına anlamlı katkı sunabilir.

Bu noktada kilit ayrım şudur: Alg temelli sistemlerin “CO₂ tuttuğu” iddiası, tek başına iklim faydası anlamına gelmez. **Net iklim faydası**, (i) karbonun **kalıcılığı** ve geri salım riski, (ii) **ilaveyet (additionality)**, (iii) **ölçülebilirlik** ve belirsizlik yönetimi, (iv) **sızıntı (leakage)** ve (v) **çift sayımın** önlenmesi gibi kriterler sağlandığında güvenilir hâle gelir (Fuss ve diğ., 2018; Schneider ve diğ., 2019). Bu nedenle MRV ve LCA çerçeveleri bir “ek” değil, alg temelli giderimin **meşruiyet altyapısıdır**: MRV, iddianın izlenebilir ve doğrulanabilir şekilde beyanını; LCA ise enerji, su, besin tuzu girdileri ve proses kaynaklı emisyonlar dâhil olmak üzere **sistem sınırları içinde net etkinin** hesaplanmasını sağlar. Bu iki araç olmaksızın ortaya atılan karbon giderimi iddiaları, bilimsel belirsizliği artırır, **yeşil yıkama** riskini büyütür ve karbon piyasalarına duyulan güveni zedeler.

Alg temelli karbon gideriminin ayırt edici gücü, çoğu senaryoda **dönüşel ekonomiyle doğal entegrasyon** potansiyelidir. Endüstriyel CO₂ akımlarının kullanımı, atıksu/yan akımların değerlendirilmesi ve aku-

akültür-biyoprodukt sektörleriyle kurulan bağlantılar; alg biyoteknolojisini yalnızca iklim aracı değil, aynı zamanda **inovasyon, bölgesel kalkınma ve yeni değer zincirleri** üreten bir alan hâline getirebilir (UNEP, 2021). Böylece iklim politikaları “maliyet” ekseninden çıkıp, doğrulanabilir iklim faydasını ekonomik değerle birleştiren bir **dönüşüm yatırımı** çerçevesinde ele alınabilir.

Politika yapıcılar açısından temel görev, alg temelli giderimi emisyon azaltımıyla rekabet eden değil, onu **tamamlayan** bir unsur olarak konumlandırmak ve piyasa entegrasyonunu **çevresel bütünlük** ilkesinden ödün vermeden tasarlamaktır. Emisyon ticaret sistemleri (ETS) çoğunlukla tesis bazlı emisyon yönetimine odaklandığından, alg temelli giderim projeleri için daha gerçekçi yol; **sıkı MRV koşullarına dayalı, metodolojisi açık karbon kredileri ve gönüllü piyasa mekanizmaları**dır (World Bank, 2023). Bu bağlamda standart ve metodoloji geliştirme, veri şeffaflığı, üçüncü taraf doğrulama kapasitesi ve çift sayımı önleyen muhasebe altyapıları, yalnızca çevresel bütünlüğü değil; aynı zamanda yatırım çekiciliğini ve ölçeklenebilirliği de belirleyecektir.

Sonuç olarak alg temelli karbon giderimi, iklim mücadelesinde **yüksek potansiyel-yüksek sorumluluk** dengesini temsil eder. Bilimsel temkin, şeffaf ölçüm ve politika uyumu sağlandığında algler, karbon giderimi portföyünde önemli bir **tamamlayıcı araç** olabilir; sağlanmadığında ise yanlış teşvikler ve güven erozyonu doğurabilir. Bu bölüm, alg temelli çözümlerin potansiyelini ve sınırlarını birlikte ele alarak, araştırmacılar, politika yapıcılar ve uygulayıcılar için **kalıcı bir referans çerçevesi** sunmayı amaçlamaktadır.

Kaynaklar

- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., & Lenton, T. M. (2022). *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*. *Science*, 377(6611), eabn7950. <https://doi.org/10.1126/science.abn7950> science.org
- Badger, M. R., & Price, G. D. (2003). CO₂ concentrating mechanisms in cyanobacteria: Molecular components, their diversity and evolution. *Journal of Experimental Botany*, 54(383), 609–622. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg076>
- Burnap, R. L. (2015). Regulation of CO₂ concentrating mechanism in cyanobacteria. *Life*, 5(1), 348–371. <https://doi.org/10.3390/life5010348>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Chisti, Y. (2013). Constraints to commercialization of algal fuels. *Journal of Biotechnology*, 167(3), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.07.020>
- Clarens, A. F., Resurreccion, E. P., White, M. A., & Colosi, L. M. (2010). Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. *Environmental Science & Technology*, 44(5), 1813–1819. <https://doi.org/10.1021/es902838n>
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
- Craggs, R., Park, J., Heubeck, S & Sutherland, D (2014). High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment, nutrient recovery and energy production, *New Zealand Journal of Botany*, 52:1, 60-73, DOI: 10.1080/0028825X.2013.861855
- Duarte, C. M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2017). Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science*, 4, 100. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>
- European Marine Board. (2025). *Monitoring, reporting and verification for marine carbon dioxide removal* (Future Science Brief No. 13). European Marine Board.
- European Commission. (n.d.). *About the EU Emissions Trading System (EU ETS)*. <https://climate.ec.europa.eu>
- European Commission. (2021). *Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon border adjustment mechanism (COM/2021/564 final)*. EUR-Lex.
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Arneth, A., Arora, V., Bates,

- N. R., Becker, M., Bellouin, N., Berghoff, C. F., Bittig, H. C., Bopp, L., Cadule, P., Campbell, K., Chamberlain, M. A., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Colligan, T., Decayeux, J., Djeutchouang, L. M., Dou, X., Duran Rojas, C., Enyo, K., Evans, W., Fay, A. R., Feely, R. A., Ford, D. J., Foster, A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Heinke, J., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jacobson, A. R., Jain, A. K., Jarníková, T., Jersild, A., Jiang, F., Jin, Z., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Lan, X., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Liu, Z., Liu, J., Ma, L., Maksyutov, S., Marland, G., Mayot, N., McGuire, P. C., Metzl, N., Monacchi, N. M., Morgan, E. J., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Niwa, Y., Nützel, T., Olivier, L., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Qin, Z., Resplandy, L., Roobaert, A., Rosan, T. M., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Smallman, T. L., Smith, S. M., Sospedra-Alfonso, R., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Séférian, R., Takao, S., Tatebe, H., Tian, H., Tilbrook, B., Torres, O., Tourigny, E., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G., Wanninkhof, R., Wang, X., Yang, D., Yang, X., Yu, Z., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, N., and Zeng, J.: Global Carbon Budget 2024, *Earth Syst. Sci. Data*, 17, 965–1039, <https://doi.org/10.18160/GCP-2024>
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. D. O., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., Dominguez, M. D. M. Z., & Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- Giordano, M., Beardall, J., & Raven, J. A. (2005). CO₂ concentrating mechanisms in algae: Mechanisms, environmental modulation, and evolution. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 99–131. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144052>
- GHG Protocol. (2005). *The GHG Protocol for Project Accounting*. World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. GHG Protokolü+1
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., McLeod, E., Pidgeon, E., & Simpson, S. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1–9. <https://doi.org/10.1002/fee.1451>
- International Energy Agency. (2025). *CO₂ emissions – Global Energy Review 2025*. IEA.
- International Energy Agency. (2023). *Emissions trading and carbon pricing: Building markets for net zero*. IEA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis* (Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report). IPCC.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report* (Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report). IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change—Technical summary* (Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report). IPCC.
- Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (ICVCM). (2024). *The Core Carbon Principles*. <https://icvcm.org>
- ISO. (2006a). *ISO 14040:2006—Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006b). *ISO 14044:2006—Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2019). *ISO 14064-3:2019—Greenhouse gases—Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements*. International Organization for Standardization.
- Lardon, L., Helias, A., Sialve, B., Steyer, J.-P., & Bernard, O. (2009). Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environmental Science & Technology*, 43(17), 6475–6481. <https://doi.org/10.1021/es900705j>
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J. L., & Wilcox, J. (2018). *Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis*. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063001.
- Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., Little, D. C., Lubchenco, J., Shumway, S. E., & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591, 551–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>
- N’Yeurt, A. D. R., Chynoweth, D. P., Capron, M. E., Stewart, J. R., & Hasan, M. A. (2012). Negative carbon via ocean afforestation. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6), 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.008>
- Quinn, J. C., & Davis, R. (2014). The potentials and challenges of algae based biofuels: A review of the techno-economic, life cycle, and resource assessment modeling. *Algal Research*, 5, 11–19.
- Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.158>
- Raven, J. A. (2017). The possible evolution and future of CO₂-concentrating mechanisms. *Journal of Experimental Botany*, 68(14), 3701–3716. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx110>

- Sprague, M., Dick, J. R., & Tocher, D. R. (2017). Impact of sustainable feeds on omega-3 fatty acid levels in farmed fish. *Journal of Nutrition*, 147(9), 1788–1796.
- Schneider, L., La Hoz Theuer, S., Broehm, M., Füssler, J., & Kohli, A. (2019). Environmental integrity of international carbon market mechanisms under the Paris Agreement. *Climate Policy*, 19(3), 386–400. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1521332>
- Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R. B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J. G., McCollum, D., Peters, G., Andrew, R., Krey, V., ... Cho, Y. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6, 42–50. <https://doi.org/10.1038/nclimate2870>
- Troell, M., ve diğ. (2024). Seaweeds for carbon dioxide removal (CDR). *PLOS Climate*. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000377>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). “2053 yılı itibarıyla net sıfır emisyon hedefini gerçekleştirmeyi öngörüyoruz” [Haber].
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025, Temmuz 22). *Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi Yönetmeliği taslağı yayımlandı*
- T.C. Resmî Gazete. (2025, 9 Temmuz). **İklim Kanunu (Kanun No. 7552)** (Sayı: 32951). Resmî Gazete.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (n.d.). *Nationally determined contributions (NDCs)*. UNFCCC
- United Nations Environment Programme. (2021). *Making peace with nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies*. UNEP.
- World Bank. (2023). *State and trends of carbon pricing 2023*. World Bank.
- World Bank. (2025). *State and trends of carbon pricing 2025*. World Bank
- Verra. (2024, July 11). *Methodology for carbon removals through seaweed aquaculture (Archived)*. Verra.
- Voluntary Carbon Markets Integrity Initiative (VCMI). (2025). *VCMI Claims Code of Practice (Version 3.0, April 2025)*. VCMI.

//

Bölüm 4

SOUS-VİDE TEKNOLOJİSİ: SU ÜRÜNLERİ

Levent İZCİ¹

¹ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Avlama ve İşleme Teknolojisi Bölümü, Isparta, Türkiye. ORCID ID: 0000-0001-7142-8782, leventizci@isparta.edu.tr

1. GİRİŞ

Su ürünleri, dünyada gerek tatlı su gerekse deniz kaynaklı oldukça geniş yelpazeye sahip kaynakların başında gelir. Su ürünleri besin içeriği ile oldukça değerli bir besin olmasına karşın kalite kaybına uğrayarak çok kolay bozulabilen ürünlerden biridir. Bu nedenle ürünün elde edildiği koşullar ve sonrasında maruz kaldığı uygulamalar ürün kalitesinde oldukça etkilidir. Günümüzde, su ürünleri farklı işleme teknolojileriyle işlenebilmekte, tüketici tercihlerinde de ürün kalitesi ön planda tutulan kriterlerin başında yer almaktadır. Tüketiciler, doğal lezzet, renk, tat ve uzun raf ömrüne sahip, pratik ve sağlıklı su ürünlerine gün geçtikçe daha fazla ilgi duymaktadır (Ahmad ve Traynor, 2022). Sous-vide tekniği ile pişirme, besin kaybını azalttığı gibi ısı kaynaklı kahverengileşmeyi de azaltır. Bu da onu gelecekteki balık eti pişirmede dikkat çeken yöntemlerden biri haline getirir (Sakuyama vd., 2025).

Sous-vide Fransızcada vakum altında anlamına gelmektedir (Ghazala vd., 1995; Misu vd., 2024). Sous-vide, ısıya dayanıklı vakumlu plastik poşetlerde hassas bir şekilde kontrol edilen sıcaklıklarda pişirme yöntemidir (Schellekens 1996; Baldwin, 2012; Singh vd., 2023; Misu vd., 2024). Hassas sıcaklık kontrolü ile geleneksel pişirme yöntemlerine göre daha fazla seçenek sunarak raf ömrü uzun, lezzeti ve besin değeri yüksek ürünler elde edilebilir (Baldvin, 2012). Sous-vide, genellikle geleneksel pişirme yöntemlerinden farklı olarak 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda daha uzun pişirme esasıyla uygulanan bir teknolojidir (Schellekens 1996). Genellikle 50-85 °C sıcaklıklar arasında geleneksel pişirme yöntemine göre uzun süreli (2-48 saat) bir pişirme işlemi uygulanır. Isıl işlem koşulları, etin türüne, etin boyutuna, kas yapısına ve bileşenlerine bağlı olarak değişmektedir (Latoch vd., 2023). Sous-vide sonrasında 3,3 °C'de muhafaza edilen ürünler yaklaşık 3-4 hafta tüketilebilir (Baldvin, 2012).

Bu bölümde, su ürünleri işleme teknolojisi açısından önemli işleme tekniklerinden biri olan “Sous-vide” teknolojinin su ürünlerinde kullanımına ilişkin değerlendirmelere yer verilecektir.

2. DÜNDEN BUGÜNE SOUS-VİDE TEKNOLOJİSİ

Sous-vide teknolojisi Fransız bir şefin kaz ciğerini büzülmeyi önlemek ve raf ömrünü artırmak için vakumlayarak yavaş bir şekilde pişirmeyi denemesi sonucunda ortaya çıkmış bir teknolojidir (Ghazala vd., 1995). Sous-vide 1975'lerde Fransa'da ortaya çıkmış ve sonrasında da farklı ülkelerde uygulama alanı bulmuştur. Yaşam koşulları ve tüketici talepleri de bu süreçte önemli rol oynamıştır (Nyati, 2000).

Sous-vide, son yıllarda hazır ürünlere artan talepler ve ürün bakımından sağladığı avantajlarla ilgi çeken tekniklerden biri olmuştur (Misu vd., 2024). Günümüzde raf ömrünün uzatılması dışında farklı yemek çeşitlerinin oluşturulmasında kullanılan teknolojiler arasında yerini almıştır (Latoch vd., 2023). Basit ekipmanlarla bile artık restoranlarda ve evlerde kolay, kaliteli, lezzetli ve hızlı bir yemek hazırlamak için tercih edilen bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır.

3. SOUS-VİDE UYGULAMA ALANLARI

Sous-vide, meyve, sebze, et, su ürünleri vb. gibi çeşitli gıda ürünleri için uygulama alanı bulmaktadır. Bu gıdalar, besinsel, fonksiyonel ve fitokimyasal özelliklere sahip, iyi bir biyoaktif bileşik kaynağı görevi gören farklı doğal bileşenler içerir (Kathuria vd., 2022). Bu teknik, kontrollü ve düşük sıcaklık uygulamaları ile içeriğin korunmasına yardımcı olmasıyla günümüzde dikkat çeken uygulamalar arasında yerini almıştır.

Günümüzde sous-vide pişirme, besin değeriyle ve duyuusal özellikleriyle sağladığı avantajların yanı sıra depolama stabilitesine sahip gıdaların üretimi için güvenilir ve kullanılabilir teknikler arasında yerini almıştır (Kathuria vd., 2022). Özellikle de restoranlar ve catering işletmelerinde büyük ilgi görmektedir (Stankov vd., 2020).

Sous-vide teknolojisinin, geleneksel pişirme yöntemlerine göre ürün kalitesine olumlu etkilerinin olduğu, ürünün raf ömrünü artırdığı, mikroorganizma üremesini ve kontaminasyon riskini azalttığı, duyuusal özelliklere olumlu etki ettiği kısaca belirtilebilir (Ghazal vd., 1995; Berdighaliuly vd., 2022).

Sous-vide kontrollü pişirme ve ürün kalitesi bakımından ticari mutfaqlarda yaygın kullanımı teşvik edici olsa da endüstriyel üretimde bazı kısıtlayıcı faktörler karşımıza çıkabilmektedir. Bunlar, yüksek sermaye ve enerji gerekliliği, mikrobiyolojik güvenlik, yetkin personel gerekliliği, standartlaşmış küresel düzenlemelerin olmaması şeklinde sıralanabilir (Yadav vd., 2025).

Sous-vide, kontrollü sıcaklık uygulamasıyla geleneksel yöntemlerden farklı olarak raf ömrünü uzun, iyi bir tat, aroma, doku ve besin değerinin oldukça iyi korunduğu, tüketicinin tercihlerini karşılaması yönüyle de hazır yemek sektöründeki yerini günden güne artırmaktadır (İkbal vd., 2021).

4. SOUS-VİDE VE MİKROBİYOLOJİK GIDA GÜVENLİĞİ

Gıda güvenliği günümüzün önemli sorunlarından. Sous-vide uygulanan gıdalarda, spor oluşturan işlem sırasındaki sıcaklık, soğuk depolama ve dağıtım sırasında da hayatta kalabilen *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringes*, *Bacillus cereus* gibi mikroorganizmalarla birlikte *Lactobacillus monocitogenes*, *Yersinia enterocolitica*, *Aeromonas hydrophila*, *Salmonella* spp. *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* gıda güvenliğini etkileyebilecek önemli mikroorganizmalardır. Bu teknolojinin uygulandığı ürünlerde bu risklerin azaltılması için ürün bazında hammadde seçimindeki özen, ön işlemler, kontrollü sıcaklık ve uygulama süresi, ortam pH'sının ayarlanması, hızlı soğutma, uygun sıcaklıklarda depolama vb. tedbirlerle bu riskler azaltılmaya çalışılabilir (Juneja ve Snyder, 2007).

Sous-vide ile işlenmiş balıkların mikrobiyal kalitesinin ve raf ömrünün güvence altına alınması için yeterli sıcaklık/süre kombinasyonlarının oluşturulmasında, ürünün yağ ve yağ asidi içeriğinin dikkate alınması gerektiğine dikkat çekilmiştir (Garcia-Linares vd., 2004). *S. aureus* gıda tedarik zincirinin herhangi bir aşamasında kontamine olmuş gıdaların tüketilmesiyle sıklıkla ilişkilendirilen gastroenteritin başlıca nedenlerinden biridir Bu nedenle sous-vide düşük sıcaklık uygulamalarından dolayı enterotoksinlerin taşınmasında potansiyel olabilir (Dogruyol, 2025).

5. SOUS-VİDE TEKNOLOJİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Sous-vide teknolojisinin uygulanmasında ve sonrasında ortaya çıkabilecek bazı avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır.

Avantajları;

- Ürüne kontrollü (Isı ve zaman) uygulama olanağı sunar (Logsdon, 2010; Jeong vd., 2018; Cui vd., 2021)
- Isı ürüne verimli bir şekilde aktarıldığı için ürün homojen bir şekilde pişer (Jeong vd., 2018)
- Bakterilerin azaltılmasını sağlar (Jeong vd., 2018; Cui vd., 2021),
- Ürüne bulaşmayı önler (Jeong vd., 2018; Cui vd., 2021),
- Ürünün raf ömrünü uzatır (Jeong vd., 2018; Cui vd., 2021; Onyeaka vd., 2022),
- Pişirme sırasında uçucu bileşiklerin ve ısıya duyarlı besin maddelerinin kaybını önler (Jeong vd., 2018; Cui vd., 2021; Onyeaka vd., 2022),

- Dokuyu iyileştirirken nemin korunmasını sağlar (Jeong vd., 2018; Cui vd., 2021; Onyeaka vd., 2022).
- Heterosiklik aminler ve polisiklik aromatik hidrokarbonların oluşumunu en aza indirmek (Kilibarda vd., 2018),
- Üretim yelpazesinin genişletilebilir olması (Onyeaka vd., 2022),
- Kas proteinlerinin sindirilebilirliğini artırabilmesi (Bhat vd., 2021),

şeklinde sıralanabilir.

Dezavantajları;

- Eğitimli personel gerekliliği (Creed ve Reeve, 1998; Onyeaka vd., 2022),
- Ekipman maliyetinin yüksekliği (Creed ve Reeve, 1998; Logsdon, 2010; Onyeaka vd., 2022),
- Patojen riski (Logsdon, 2010; Onyeaka vd., 2022),
- İşlem süresinin uzunluğu (Logsdon, 2010, Haskaraca ve Kolsarıcı, 2013),

şeklinde sıralanabilir.

6. SU ÜRÜNLERİ VE SOUS-VİDE

Sous-vide teknolojisi gıda endüstrisinin birçok alanında kullanım alanı bulduğu gibi su ürünlerinde de kullanım alanı bulmuş ve çalışmalara konu olmuştur. Bu çalışmalar, gerek sadece sous-vide teknolojisinin uygulandığı çalışmalar gerekse sous-vide teknolojisi ile farklı teknolojilerin bir arada uygulandığı çalışmalar olmuştur.

Humaid vd. (2020), herhangi bir katkı olmaksızın yüksek hidrostatik basınç (HPP) ve sous-vide uygulamasının kabukları soyulmuş istakozun (*Homarus americanus*) kalitesine etkisini değerlendirmiş, HPP veya sous-vide uygulamalarının raf ömründe etkili olabileceğini belirtmiştir. Midye (*Mytilus galloprovincialis*) ile sous-vide pişirme ve koruma yöntemleriyle uzun süreli kaliteli bir ürün yaklaşımıyla ilgili yapılan çalışmada, bu kapsamda uygulamaların geliştirilmesi açısından su ürünleri endüstrisine bir öngörü sağlayabileceği ifade edilmiştir (Russo vd., 2023).

Farklı sous-vide uygulama sıcaklıklarının *Listeria monocytogenes* üzerindeki etkinliğinin araştırıldığı bir çalışmada, uygulama sıcaklıklarının

(42, 52, 57 ve 60 ° C) *L. monocytogenes*'i öldürmede etkili olmadığı bu nedenle de sous-vide için seçilen ürünlerde kaliteli ürünlerin seçilmesine vurgu yapılmıştır (Zakrzewski vd., 2023). Farklı tür kafadan bacaklılara, ahtapot (*Octopus vulgaris*), kalamar (*Loligo vulgaris*) ve mürekkep balığı (*Sepia officinalis*) sous-vide uygulanarak kalite değerlendirmesi yapılmış ve sous-vide tekniğinin ahtapot, kalamar ve mürekkep balığı için uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Erdem vd., 2022).

Farklı tekniklerle sous-vide kombinasyonunun uygulandığı Asya yeşil midyesinin (*Perna viridis*), asidik elektroliz su uygulaması ve sous-vide uygulamasının midye kalitesini korurken Vibrioları etkili bir şekilde azalttığı, özellikle de midye, deniz tarağı ve istiridye gibi çift kabuklular için su ürünleri işleme endüstrisinde ticari olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Palamae vd., 2023). Qiu ve Wu (2021) *Larimichthys crocea* filetolarına sous-vide öncesinde tuzlu su ve antioksidant uygulanmış ve 70 °C'de farklı sürelerde (5-10 dakika) sous-vide uygulanmış ürünlerin en az 2 hafta soğuk muhafaza edilebileceğini ifade etmişlerdir. Doğruyol (2025) sous-vide uygulamasında kullanılacak ayva yaprağı özütlerinin *S. aureus* sayısını azaltabileceği bu şekilde de gıda güvenliğinin artırılabilirliğini belirtmiştir. Ayrıca, etkili ısıtma işlem teknikleri ile birlikte ilavelerin bir arada kullanımının patojenlerin inhibisyonunda umut verici olduğunu ifade etmiştir.

Fagan ve Gormley (2005) farklı balık türlerinin (*Hoplostethus atlanticus*, *Thunnus alalunga*, *Epigonus telescopus*, *Sebastes mentella*, *Coryphaenoides rupestris*, *Molva dypterygia* ve *Reinhardtius hippoglossoides*) çeşitli soslarla birlikte sous-vide uygulamasının kabul edilebilirlik seviyesine olumlu etki ettiğini bildirmiştir. Cosansu vd. (2013), *Merlangius merlangus* filetolarını limon suyu ile muamele ederek sous-vide teknolojisi uygulamış ve bu uygulamanın raf ömrünü 7 gün artırdığını saptamıştır. Doğruyol vd. (2020), sous-vide teknolojisinde patojen riskine karşın doğal antibiyotiklerin eklenmesiyle etkili sonuçların alınabileceğine değinmişlerdir. Bongiorno vd. (2018), *Mytilus galloprovincialis*'in sous-vide pişirme yöntemi ile değerlendirilmesinin ürün kalitesinin korunmasında ve raf ömrünün uzatılmasında etkili olduğunu tespit etmiştir. Wu vd. (2022), sous-vide pişirme tekniğinin *Argopecten irradians* kas proteinlerinin ikincil yapılarını, kimyasal yapısını etkilediğini, kesme kuvvetini, sertliğini, esnekliğini, yapışkanlığını, çığnenabilirliğini ve geri kazanılabilirliğini çığ örneklerle göre önemli ölçüde artırdığını saptamıştır.

Asya yeşil midyesine kitoooligosakkarit-kateşin konjugatın birlikte farklı derece ve sürelerde sous-vide uygulamasının patojenik *Vibrio pharaeomolyticus* ve *Shewanella algae* üzerinde etkileri araştırılmış, bu uygulamaların kalitenin korunmasında ve mikrobiyal büyümenin engel-

lenmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir (Palamae vd., 2025b). Palamae vd. (2025a) başka bir çalışmada, kitoooligosakkarit-kateşin konjugat uygulamasının sous vide pişirme ile birleştirilmesinin Asya yeşil midyesinin ürün güvenliği, kalitesi ve raf ömrünü artırma potansiyelini vurgulamıştır. Zhan vd. (2022), işlenmiş ve sous-vide uygulanmış deniz tarağı (*Chlamys farreri*) örneklerinin soğuk muhafaza sürecinde genel olarak kabul edilebilir ve fizikokimyasal ve uçucu aroma özelliklerini koruduğunu, bu şekilde yemeğe hazır ürünler elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Zhang vd. (2025) istiridyelerde (*Crassostrea gigas*) lezzet değişiminde uygulama süresinin etkisini araştırmış, kısa uygulama süresinin istiridyelerin umamisini korurken uygulama süresinin artmasıyla birlikte çimenimsi aromada azalma, yağlı ve pişmiş aromalarda belirgin bir artışa neden olduğu saptanmıştır.

Amerikan istakoz (*Homarus americanus*) kuyruğunun değerlendirilmesinde yüksek hidrostatik basınç ve sous-vide uygulamasının birlikte kullanımının tüketici tarafından kabul edilebilir, katma değerli istakoz ürünleri üretme potansiyeline sahip olduğunu ifade etmiştir (Humaid vd., 2019). Optimize edilmiş sous-vide tekniğinin kullanılmasıyla *Scomberomorus guttatus*'dan elde edilen ürünün iyi pazar koşullarının elde edilmesi yönüyle uzun süre muhafaza edilebileceği belirtilmiştir (Singh vd., 2016).

Bozova ve İzci (2021) sarıağız balığı (*Argyrosomus regius*) filetolarının biberiye ve kekik özütleriyle muamelesiyle birlikte sous-vide uyguladıkları çalışmalarında, muhafaza süresince mikrobiyolojik limit değerlerinin aşılmadığı, kullanılan özütlerin tat ve koku açısından duyu kaliteyi geliştirdiğini ifade etmiştir. Yuan vd. (2025) sarı yüzgeçli orkinos (*Thunnus albacares*) ile yüksek sıcaklıkta pişirme ve sous-vide uygulamasının etkisini incelemişler ve sous-vide pişirme teknolojisinin sarı yüzgeçli orkinosun diğer yüksek sıcaklıkta pişirmeye göre hem dokusunu hem de lezzet profilini olumlu şekilde etkilediğini belirtmişlerdir. Yang vd. (2023) sous-vide teknolojisinin tilapia filetolarında kas liflerinin yapısal stabilitesini, sertliğini ve esnekliğini önemli ölçüde artırdığını, besin kaybını azalttığını, lezzeti zenginleştirdiğini ayrıca tat ve balık kokusu üzerindeki etkileri hafiflettiğini saptamıştır. Pongsetkul ve Benjakul (2022) *Megalaspis cordyla*'dan Tayland'da geleneksel olarak tuzlanarak kurutulmuş balığın sous-vide uygulamasıyla kalitesinin iyileştirildiği ve raf ömrünün uzatılmasındaki potansiyelini ortaya koymuşlardır.

Kurt Kaya (2022) marine kerevitlerin (*Astacus leptodactylus*) farklı işleme teknikleriyle değerlendirildiği çalışmada, sous-vide teknolojisinin marine ürünler için endüstrinin dikkat çekici olduğuna vurgu yapmıştır. Olatunde ve Benjakul (2021) sous-vide pişirmede uygulanacak sıcaklık ve

sürenin yengeç etinin kalitesine ve raf ömrüne etkisini değerlendirmiştir. Çalışmada sous-vide teknolojisinin, yengeç (*Portunus armatus*) etinin raf ömrünün uzatılmasında yüksek sıcaklık gerektirmeden kalitenin korunmasında etkili bir yöntem olduğu ve en uygun sıcaklık-süre ilişkisinin de 80 °C'de 1 saat olduğu sonucuna varmıştır.

Humaid vd. (2023), sous-vide pişirme yöntemi ile pişirilen Amerikan istakozu kuyruklarının geleneksel haşlama yöntemine göre daha yumuşak olduğunu ve sous-vide pişirme yöntemi ile daha kaliteli ürün elde edilebileceğini belirtmiştir. Das vd. (2023) ekonomik değeri yüksek beyaz bacaklı karidesin (*Litopenaeus vannamei*) sous-vide pişirme tekniğinin optimizasyonu için çeşitli zaman-sıcaklık kombinasyonlarının fiziko-kimyasal, dokusal ve duyusal nitelikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Zaman-sıcaklığın karideslerin bu niteliklerinde önemli etkiye sahip olduğu, artan zaman-sıcaklığın pişirme ve nem kaybını artırmasına rağmen azalan sertlikle beraber duyusal olarak daha kabul edilebilir hale geldiği saptanmıştır. Li vd. (2025), önemli karides türlerinden biri olan Pasifik beyaz karideslerin haşlama yerine sous-vide teknolojisi ile pişirilmesinin daha uygun doku özellikleri sağladığını belirtmişlerdir.

7. SONUÇ

Su ürünleri, işleme teknolojisi açısından oldukça geniş ürün yelpazesine sahiptir. Bu da farklı teknolojilerin su ürünlerine uygulanmasını olanaklı hale getirmektedir. Geçmişten günümüze bu ürünlerde, farklı işleme teknolojileri uygulanmış olsa da halen daha farklı ve daha iyi sonuçlar alabilmek için çalışmalar çok yönlü devam etmektedir. Sous-vide teknolojisi diğer gıda endüstrilerinde olduğu gibi günümüzde de tüketicilerin arayışları doğrultusunda ilgi çeken ve kullanım alanı bulan teknolojiler arasındadır. Sous-vide teknolojisinin öne çıkan ilgi çekici yönleri, pratik olması ve ürün kalitesini geleneksel ısı işlem yöntemlerine göre koruyabilmesi olarak söylenebilir. Bu teknolojide önemli olan uygulamada uygun ambalaj kullanımı, ürün bazında optimize edilmiş sıcaklık ve sürelerdir. Sous-vide teknolojisi tek başına uygulandığı gibi farklı teknolojilerle birlikte uygulanarak ürün kalitesi geliştirilebilmekte ve raf ömrü uzatılabilmektedir. Sous-vide teknolojisi, su ürünleri için ilgi çekici ve yenilikçi yaklaşımlarla geliştirilme imkanı olan günümüz tüketici tercihlerine cevap verebilecek teknolojilerden biridir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, I., & Traynor, M. P. (2022). Impact of high-pressure processing and sous vide cooking on the physicochemical, sensorial, and textural properties of fresh whiteleg shrimp (*Litopenaeus setiferus*). *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 31(6), 508-524.
- Baldwin, D. E. (2012). Sous vide cooking: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(1), 15-30.
- Berdigaliuly, S., Baybolova, L., Davydenko, N., Kulazhanov, T., Kulazhanov, Y., Čapla, J., & Zajác, P. (2022). Perspectives for the application of the sous-vide cooking in the development of products for public catering. *Slovak Journal of Food Sciences/Potravinárstvo*, 16(1), 137-148.
- Bhat, Z. F., Morton, J. D., Bekhit, A. E. D. A., Kumar, S., & Bhat, H. F. (2021). Thermal processing implications on the digestibility of meat, fish and seafood proteins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 4511-4548.
- Bongiorno, T., Tulli, F., Comi, G., Sensidoni, A., Andyanto, D., & Iacumin, L. (2018). Sous vide cook-chill mussel (*Mytilus galloprovincialis*): evaluation of chemical, microbiological and sensory quality during chilled storage (3 °C). *LWT - Food Science and Technology*, 91, 117-124.
- Bozova, B., & İzci, L. (2021). Effects of plant extracts on the quality of sous vide meagre (*Argyrosomus regius*) fillets. *Acta Aquatica Turcia*, 17(2), 255-266.
- Cosansu, S., Mol, S., Uçok Alakavuk, D., & Ozturan, S. (2013). The effect of lemon juice on shelf life of sous vide packaged whiting (*Merlangius merlangus euxinus*, Nordmann, 1840). *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 283-289.
- Creed, P. G., & Reeve, W. (1998). Principles and applications of sous vide processed foods. Sous vide and cook-chill processing for the food industry. Gaithersburg, MD., USA.
- Cui, Z., Yan, H., Manoli, T., Mo, H., Bi, J., & Zhang, H. (2021). Advantages and challenges of sous vide cooking. *Food Science and Technology Research*, 27(1), 25-34.
- Das, R., Mehta, N. K., Ngasotter, S., Balange, A. K., Nayak, B. B., Murthy, L. N., & Xavier, K. M. (2023). Process optimization and evaluation of the effects of different time-temperature sous vide cooking on physicochemical, textural, and sensory characteristics of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Heliyon*, 9, e16468.
- Dogruyol, H., Mol, S., & Cosansu, S. (2020). Increased thermal sensitivity of *Listeria monocytogenes* in sous-vide salmon by oregano essential oil and citric acid. *Food Microbiology*, 90, 103496.
- Dogruyol, H. (2025). Thermal survival patterns of *Staphylococcus aureus* in sous vide seabream treated with quince leaf extract. *International Journal of Food Microbiology*, 429, 111024.
- Erdem, N., Karakaya, M., Babaoğlu, A. S., & Unal, K. (2022). Effects of sous vide cooking on physicochemical, structural, and microbiological

- characteristics of cuttlefish, octopus, and squid. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 31(7), 636-648.
- Fagan, J. D., & Gormley, T. R. (2005). Effect of sous vide cooking, with freezing, on selected quality parameters of seven fish species in a range of sauces. *European Food Research and Technology*, 220(3), 299-304.
- Garcia-Linares, M. C., Gonzalez-Fandos, E., García-Fernández, M. C., & Garcia-Arias, M. T. (2004). Microbiological and nutritional quality of sous vide or traditionally processed fish: Influence of fat content. *Journal of Food Quality*, 27(5), 371-387.
- Ghazala, S., Ramaswamy, H. S., Smith, J. P., & Simpson, M. V. (1995). Thermal process simulations for sous vide processing of fish and meat foods. *Food Research International*, 28(2), 117-122.
- Gómez, I., Ibañez, F. C., & Beriain, M. J. (2019). Physicochemical and sensory properties of sous vide meat and meat analog products marinated and cooked at different temperature-time combinations. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1693-1708.
- Haskaraca, G., & Kolsarıcı, N. (2013). Sous vide pişirme ve et teknolojisinde uygulama olanakları. *Akademik Gıda*, 11(2), 94-101.
- Humaid, S., Nayyar, D., Bolton, J., & Skonberg, D. I. (2019). Physicochemical properties and consumer acceptance of high-pressure processed, sous vide-cooked lobster tails. *Journal of Food Science*, 84(12), 3454-3462.
- Humaid, S., Nayyar, D., Bolton, J., Perkins, B., & Skonberg, D. I. (2020). Refrigerated shelf-life evaluation of high pressure processed, raw and sous vide cooked lobster. *High Pressure Research*, 40(3), 444-463.
- Humaid, S., Nayyar, D., Bolton, J., Bayer, R., & Skonberg, D. I. (2023). Physicochemical Properties and Consumer Acceptance of Sous Vide Cooked Lobster Tails. *Journal of Culinary Science & Technology*, 21(6), 932-959.
- Ikbal, A., Chowdhury, S., Roy, S., & Mandal, R. (2021). Cook-chill Technique in seafood packaging. *Biotica Research Today*, 3(7), 566-569.
- Jeong, K., Hyeonbin, O., Shin, S. Y., & Kim, Y. S. (2018). Effects of sous-vide method at different temperatures, times and vacuum degrees on the quality, structural, and microbiological properties of pork ham. *Meat science*, 143, 1-7.
- Juneja, V. K., & Snyder, O. P. (2007). Sous vide and cook-chill processing of foods: Concept development and microbiological safety. *Advances in Thermal and Non- Thermal Food Preservation*. Blackwell Publishing.
- Kathuria, D., Dhiman, A. K., & Attri, S. (2022). Sous vide, a culinary technique for improving quality of food products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 57-68.
- Kilibarda, N., Brdar, I., Baltic, B., Markovic, V., Mahmutovic, H., Karabasil, N., & Stanisic, S. (2018). The safety and quality of sous vide food. *Meat Technology*, 59(1), 38-45.

- Kurt Kaya, G. (2022). The effects of different packaging methods and sous vide cooking on chemical, sensory, and microbiological changes of marinated crayfish (*Astacus leptodactylus* Esch., 1823). *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16919.
- Latoch, A., Głuchowski, A., & Czarniecka-Skubina, E. (2023). Sous-vide as an alternative method of cooking to improve the quality of meat: A review. *Foods*, 12(16), 3110.
- Li, C., Lin, S., Chen, T., Wang, S., Qian, X., Chen, D., Wang, R., & Sun, N. (2025). Sous-vide cooking as a promising approach for developing high-quality salt pan shrimp products. *Food Chemistry*, 481, 144050.
- Logsdon, J. (2010). Beginning sous vide. Primolicious LLC.
- Misu, G. A., Canja, C. M., Lupu, M., & Matei, F. (2024). Advances and Drawbacks of Sous-Vide Technique-A Critical Review. *Foods*, 13(14), 2217.
- Nyati, H. (2000). An evaluation of the effect of storage and processing temperatures on the microbiological status of sous vide extended shelf-life products. *Food Control*, 11(6), 471-476.
- Olatunde, O. O., & Benjakul, S. (2021). Sous-vide cooking as a systematic approach for quality maintenance and shelf-life extension of crab lump meat. *LWT - Food Science and Technology*, 142, 111004.
- Onyeaka, H., Nwabor, O., Jang, S., Obileke, K., Hart, A., Anumudu, C., & Miri, T. (2022). Sous vide processing: a viable approach for the assurance of microbial food safety. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(9), 3503-3512.
- Palamae, S., Temdee, W., Buatong, J., Zhang, B., Hong, H., & Benjakul, S. (2023). Enhancement of safety and quality of ready-to-cook Asian green mussel using acidic electrolyzed water depuration in combination with sous vide cooking. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 87, 103391.
- Palamae, S., Patil, U., Saetang, J., Detcharoen, M., Suyapoh, W., Ma, L., Zhang, B., & Benjakul, S. (2025a). Asian green mussel treated with sous vide and chitooligosaccharide-catechin conjugate: Chemical, physical, microbiological, histological properties and quality changes during refrigerated storage. *Food Control*, 173, 111206.
- Palamae, S., Mittal, A., Saetang, J., Buamard, N., Ma, L., Zhang, B., & Benjakul, S. (2025b). Sous vide and chitooligosaccharide-catechin conjugate for inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* and *Shewanella algae* in refrigerated Asian green mussel. *Food Control*, 168, 110969.
- Pongsetkul, J., & Benjakul, S. (2022). Impact of sous vide cooking on quality and shelf-life of dried sour-salted fish. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(1), e16142.
- Qiu, X., & Wu, Y. (2021). Application of Taguchi method to improve the sous vide processed large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fillet product quality during cold storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6), e15565.

- Russo, G. L., Langellotti, A. L., Buonocunto, G., Puleo, S., Di Monaco, R., Anastasio, A., Vuoso, V., Smaldone, G., Baseliçe, M., Capuano, F., Garofalo, F., & Masi, P. (2023). The sous vide cooking of mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*): Safety and quality assessment. *Foods*, 12(15), 2900.
- Sakuyama, M., Kominami, Y., Hayashi, T., & Ushio, H. (2025). Protein structural and textural characteristics of sous-vide cooked rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) meat. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 42, 101313.
- Schellekens, M. (1996). New research issues in sous-vide cooking. *Trends in Food Science & Technology*, 7(8), 256-262.
- Singh, C. B., Kumari, N., Senapati, S. R., Lekshmi, M., Nagalakshmi, K., Balange, A. K., Chouksey, M.K., Venkateshwarlu, G., & Xavier, K. M. (2016). Sous vide processed ready-to-cook seerfish steaks: Process optimization by response surface methodology and its quality evaluation. *LWT - Food Science and Technology*, 74, 62-69.
- Singh, P., Sultan, Z., Pandey, V. K., & Singh, R. (2023). Sous vide processing for food quality enhancement: A review. *Food and Humanity*, 1, 543-552.
- Stankov, S., Fidan, H., Rusev, R., & Baeva, M. (2020). Low-temperature cooking method “sous vide” in the restaurant industry: A review. *Food Science and Applied Biotechnology*, 3(1), 92-102.
- Wu, Z. X., Li, D. Y., Shen, M., Wang, Z. Y., Wang, Z. W., Liu, Y. X., Bai, Y.H. & Zhou, D. Y. (2022). Effect of different sous-vide cooking conditions on textural properties, protein physiochemical properties and microstructure of scallop (*Argopecten irradians*) adductor muscle. *Food Chemistry*, 394, 133470.
- Yadav, K. K., Mehta, N. K., Sharma, S., Bhajan, S., Kulshrestha, T., Gaurav, K., Ngasotter, S., Singh, K., Vaishnav, A., Nayak , S.S., Debbarma, P., Chaudhury, S., Kumar, P., Mohanty, S., Bhalavey, P., Patel, N.D., Chaturvedi, P. & pal Yadav, R. (2025). Advances in sous-vide technology for meat processing: A comprehensive overview. *Journal of Agriculture and Food Research*, 23, 102257.
- Yang, L., Li, Z., Xie, T., Feng, J., Xu, X., Zhao, Y., & Gao, X. (2023). Effects of sous-vide on quality, structure and flavor characteristics of tilapia fillets. *Molecules*, 28(24), 8075.
- Yuan, X., Li, D., Shi, P., Wu, J., Dai, Z., Dong, X., & Lu, Y. (2025). Effect of sous vide cooking technology on the quality, protein structure, microstructure, and flavor of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Food Chemistry*, 484, 144423.
- Zakrzewski, A., Gajewska, J., Chajęcka-Wierzchowska, W., & Zadernowska, A. (2023). Effect of sous-vide processing of fish on the virulence and antibiotic resistance of *Listeria monocytogenes*. *NFS Journal*, 31, 155-161.
- Zhan, Y., Tu, C., Jiang, H., Benjakul, S., Ni, J., Dong, K., & Zhang, B. (2022). Effects of sous vide cooking on the physicochemical and volatile flavor

properties of half-shell scallop (*Chlamys farreri*) during chilled storage. *Foods*, 11(23), 3928.

Zhang, H., Hou, Z., Jia, Z., Cheng, K., Fan, Z., & Dong, S. Y. (2025). Effect of sous-vide processing duration on flavor and taste variations of oyster (*Crassostrea gigas*). *Food Chemistry*, 465, 142066.

Bölüm 5

**MİKRO VE NANOPLASTİK KİRLENMESİNİN
DEKAPODLARA ETKİLERİ**

**EFFECTS OF MICRO AND NANOPLASTIC
CONTAMINATION ON DECAPODS**

Ayşe Gül HARLIOĞLU¹

¹ Fırat Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Yetiştiricilik ABD, Elazığ/ Türkiye, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9478-6419> aharlioglu@firat.edu.tr

1. Giriş

Plastikler düşük üretim maliyeti, çok yönlü kullanımı ve dayanıklılığı nedeniyle modern toplumda vazgeçilmez malzemeler haline gelmiştir (Wagner vd., 2014). Plastiklerin endüstriyel ölçekte üretimi 1900'lerin başlarında başlamış olup, yüksek dayanıklılık, esneklik ve suya karşı direnç gibi özellikleri nedeniyle tarım, ambalajlama, sağlık ve teknoloji sektörlerinde temel malzemelerden biri haline gelmiştir (Anagnosti vd., 2021). Küresel plastik üretimi 2018'de yaklaşık 350 milyon ton iken, 2021 itibarıyla 390,7 milyon tona yükselmiştir. Öngörüler, mevcut eğilimlerin devam etmesi durumunda bu üretim hacminin 2050 yılına kadar yaklaşık iki katına çıkacağını göstermektedir (PlasticsEurope, 2018; PlasticsEurope, 2022). Öte yandan, düşük geri dönüşüm oranı ve yetersiz atık yönetimi uygulamaları, plastik kullanımından kaynaklanan çevresel baskıyı giderek artırmaktadır. Örneğin, toplam plastik atıkların yaklaşık %30'unun okyanuslara ulaşacağı tahmin edilmektedir, Tatlısu ekosistemleri de yoğun insan faaliyetlerinin etkisiyle ciddi ölçüde plastik kirliliğine maruz kalmaktadır (Yin vd., 2022).

Mikroplastikler (MP'ler), geniş yüzey alanları ve özgün fizikokimyasal özellikleri sayesinde çevresel ortamlarda çeşitli kirleticiler için vektör görevi görmektedir. Plastik kaynaklı katkı maddeleri, monomerler, oligomerler ve çevreden adsorbe edilen kimyasalların taşınmasını kolaylaştırarak bu maddelerin biyolojik sistemlere geçişine aracılık ederler. Bu özellikleri nedeniyle MP'ler; ağır metaller, hidrofobik organik kirleticiler ve patojenik mikroorganizmaları biriktirip taşıyabilir, dolayısıyla yalnızca fiziksel stres faktörleri değil, aynı zamanda kimyasal vektörler olarak da ekosistemlerde toksisiteyi ve ekolojik riski artırabilirler (Rummel vd., 2017; Mülâyim vd. 2022).

Mikroplastikler üzerine yapılan ilk araştırmaların çoğunluğu deniz ortamlarına odaklanmış olsa da, son kanıtlar karasal ve tatlısu sistemlerinin eşit derecede önemli plastik atık rezervuarları olduğunu göstermektedir (Pastorino vd. 2023; Amelia vd., 2021). Plastik malçlama, atık suyla sulama ve biyolojik katılarla gübreleme gibi tarımsal uygulamalar, toprak ve tortulardaki MP kirliliğine katkıda bulunur (Guo vd., 2020). Nehirler, göller ve rezervuarlar dahil olmak üzere tatlısu sistemleri, mikroplastikler için hem taşıma yolları hem de uzun vadeli havuzlar olarak hizmet eder (Dusaucy vd., 2021). İzleme çalışmaları, MP'lerin tatlısu ekosistemlerinin hem biyotik hem de abiyotik bileşenlerinde her yerde bulunduğunu ve burada birden fazla trofik düzeyde su organizmaları tarafından kolayca yutulduğunu ortaya koymuştur (Talbot ve Chang, 2022; Pastorino vd. 2023). Yutulduğunda, MP'ler sindirim sisteminde birikebilmekte ve dokulara taşınarak oksidatif strese, iltihaplanmaya ve metabolik süreç-

lerin bozulmasına neden olabilmektedir (Ferreira vd., 2019; Impellitteri vd., 2022; Li vd., 2022). Ekolojik önemlerine rağmen, tatlısu ekosistemleri küresel MP araştırmalarında yeterince temsil edilmemektedir ve bu kirleticilerin kaynakları, taşıma mekanizmaları ve ekolojik sonuçları hakkında önemli bilgi boşlukları bırakmaktadır (Mülayim vd., 2022). Diğer taraftan, su ortamlarında farklı boyut aralıklarında plastik partiküllerin varlığı birçok çalışmada rapor edilmiştir.

2. Mikroplastiklerin Sınıflandırılması ve Kaynakları

Mikroplastikler, kökenlerine bağlı olarak genellikle birincil ve ikincil olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Birincil mikroplastikler, plastik peletler gibi endüstriyel süreçler sonucu doğrudan üretilen ve çevreye salınan partiküllerdir. Buna karşılık, ikincil mikroplastikler; makroplastik atıkların parçalanması veya tekstil ürünlerinin mekanik aşınma, biyolojik bozunma, termal ya da foto-oksidatif süreçlerle degradasyona uğraması sonucunda oluşmaktadır. Boyutlarına göre ise plastik atıklar genellikle dört sınıfta değerlendirilmektedir: makroplastikler (>5 mm), büyük mikroplastikler (5–1 mm), mikroplastikler (1 mm–1 µm) ve nanoplastikler (1 µm–100 nm). Ayrıca, denize ulaşan plastikler, güneş ışığından gelen ultraviyole (UV) radyasyonu, rüzgâr ve dalga etkisi gibi çevresel faktörlerin etkisiyle zamanla daha küçük parçalara ayrılmaktadır (Mülayim vd., 2022; Pastorino vd., 2023; Cesarini vd., 2025).

Literatürde en sık bildirilen plastik türleri arasında polistiren (PS), polipropilen (PP), polietilen (PE), polietilen tereftalat (PET), polivinil klorür (PVC) ve poliamid (PA, naylon) yer almakta olup, bu materyaller genellikle parçacık, lif, film veya küre formunda bulunmaktadır. Bu plastiklerin kökeni; halatlar ve ağlar gibi balıkçılık ekipmanları, polietilen torbalar, plastik şişeler, sert plastik materyaller, sentetik tekstil ürünleri ve kişisel bakım ürünleri gibi farklı kaynaklara dayanmaktadır (D’Costa, 2022).

3. Mikro ve Nanopartiküllerin Su Sistemlerinde Dağılımı

Mikroplastik (MP) ve nanoplastiklerin (NP) sucul sistemlere girdikten sonra yüzey özelliklerinde değişim, agregasyon ve çevresel koşullara bağlı yeniden dağılım gibi süreçlere uğradıkları bilinmektedir (Alimi vd., 2018). Bu partiküllerin agregasyon davranışı temel olarak homoagregasyon ve heteroagregasyon mekanizmalarıyla şekillenmekte olup, çevresel kalıcılıkları nedeniyle uzun süreli kirlilik oluşturma potansiyeline sahiptirler (Timilsina vd., 2023). MP ve NP’lerin su kolonundaki taşınımı hem partikül özellikleri hem de ortamın hidrodinamik yapısı tarafından belirlenir. Çapı 2–3 µm’den büyük partiküller genellikle advektif süreçlerle

taşınırken, daha küçük boyutlardakiler Brown hareketine bağlı difüzyon taşınım gösterir. Parçacık yüzey pürüzlülüğü yüzey alanını artırarak yapışma etkinliğini yükseltir ve boyut heterojenliği flokülasyonu teşvik ederek partiküller arası bağlanmayı güçlendirir (Besseling vd., 2017; Timilsina vd., 2023).

Kimyasal yapıya bağlı hidrofobik veya hidrofilik özellikler de dağılım üzerinde belirleyici rol oynar; hidrofilik plastikler suda daha kararlı süspansiyon halinde kalırken, hidrofobik partiküller birleşerek belirli bölgelerde yoğunlaşma eğilimindedir. Plastik partiküllerin çevresel davranışı yoğunluklarına bağlı olarak değişmekte; düşük yoğunluklu olanlar yüzey sularında, yüksek yoğunluklu olanlar ise dip sedimanlarında birikim göstermektedir. Boyut artışı çökme hızını önemli ölçüde artırmakta ve partikül hareketi için gerekli kesme kuvvetini %50–80 oranında yükseltmektedir. Ayrıca MP'ler, askıda veya çözünmüş halde bulunan diğer partikülleri nötralize ederek veya köprüleme yoluyla destabilize edip çökelmeye neden olabilir (He vd., 2022; Zhou vd., 2021; Timilsina vd., 2023; Bappy vd., 2025).

Su akış hızı ve sıcaklık gibi çevresel faktörler de taşınım süreçlerinde belirleyicidir. Artan akış hızı parçacıkların uzun mesafeli taşınımını kolaylaştırırken, sıcaklığın yükselmesi suyun viskozitesini azaltarak taşınım hızını artırır. Çökelen MP ve NP'ler, hidrodinamik değişimlerle yeniden süspansiyona geçerek farklı su kütlelerine taşınabilir ve yayılmalarını sürdürebilir (Timilsina vd., 2023).

Sonuç olarak, MP ve NP'lerin sucul sistemlerdeki davranışları; fiziksel (boyut, şekil, yoğunluk), kimyasal (yüzey yükü, hidrofiliklik/hidrofobiklik) ve çevresel (pH, sıcaklık, iyonik güç, akış rejimi) faktörlerin etkileşimiyle şekillenen karmaşık bir süreçtir. Bu faktörlerin anlaşılması, mikro ve nanoplastik kirliliğinin ekolojik etkilerini değerlendirmek ve yönetmek açısından kritik öneme sahiptir (Timilsina vd., 2023; Bappy vd., 2025; Hasan ve Khatun, 2025).

4. Kirleticiler ve Patojenler İçin Vektör Olarak Mikroplastikler

Mikroplastikler, yüzeylerinde “plastisphere” olarak bilinen mikrobiyal toplulukların gelişmesine olanak sağlayarak sucul ekosistemlerde kirleticilerin ve patojenlerin taşınmasında önemli bir rol üstlenmektedir (Jeong vd., 2017; Wu vd., 2024; Gündoğdu vd., 2024). Güneş ışığıyla bozunma, mekanik aşınma, hidroliz ve mikrobiyal parçalanma (Timilsina vd., 2023) gibi yaşlanma süreçleri, MP'lerin yüzey özelliklerinde değişime yol açarak sekonder mikroplastik oluşumunu ve bu partiküllerin patojen ve kirleticileri adsorbe etme kapasitesini artırmaktadır. Bu fiziksel

ve kimyasal dönüşümler, MP'lerin sucul sistemlerde kirletici ve mikroorganizma taşınımını kolaylaştırmakta ve taşınan maddelerin kalıcılığını artırmaktadır (Alimi vd., 2018). Bu durum, su kolonunda yaşayan karides ve kerevit gibi dekapod türlerinin maruz kaldıkları kirletici yükünün artmasına zemin hazırlamaktadır (Tumwesigye vd., 2023; Wu vd., 2024).

MP'ler yüzeylerinde adsorbe ettikleri kirleticileri ve mikroorganizmaları farklı su kütlelerine taşıyabilir ve düşük konsantrasyon bölgelerinde bu maddeleri difüzyon yoluyla çevreye yeniden bırakabilir. Serbest kalan kirleticiler ve patojenler sedimente çökerek bentik bölgelerde birikebilir, yeniden su kolonuna karışabilir veya sucul organizmalar tarafından tüketilebilir (Booth ve Sørensen, 2020; Timilsina vd., 2023). Sedimentle yakın ilişkisi olan dekapodlar, beslenme ve yaşam davranışları gereği bu partikülleri doğrudan veya dolaylı yoldan alarak kirleticilerin biyolojik dokularında birikimine yol açabilir.

MP'ler ağır metaller (Pb, Cd, Hg, As) ve organik kirleticilerle elektros-tatik etkileşimler ve kompleksleşme yoluyla bağlanabilmekte, Atrazin gibi çok yüklü organik bileşikler ise MP'lerin floklaşmasını kolaylaştırarak çökme ve yeniden askıya geçme döngülerini artırabilmektedir (Bullard vd., 2022). Bunun yanında Cd, As ve Pb gibi metallerin de MP yüzeylerine bağlanabildiği gösterilmiştir (Dong vd., 2020). Bu durum, MP'ler ile birlikte alınan kirleticilerin dekapodlarda toksisiteyi artırarak, oksidatif stres, bağışıklık baskılanması ve fizyolojik bozulmalara yol açma riskini yükseltmektedir (Verla vd., 2019).

Mikroplastik yüzeylerinin pürüzlü ve gözenekli yapısı, bakteri, virüs ve mantarların kısa veya uzun süreli kolonizasyonuna elverişlidir. Bu nedenle MP'ler, sucul sistemde patojenlerin yeni bölgelere taşınmasında vektör görevi görebilir. Son çalışmalar, patojen ve kirletici taşıyan MP'lerin, yalnız mikroplastiklere göre organizmalar üzerinde daha yüksek toksik etki oluşturduğunu göstermektedir (Bhagat vd., 2021; Sun vd., 2023). Dekapodların MP'leri birbirine bağlı besin ağları aracılığıyla tüketmesi, çevresel patojen ve kimyasal kirleticilerin bu türlerde biyobirikim ve biyobüyütme yoluyla artması riskini önemli ölçüde yükseltmektedir (Timilsina vd., 2023).

5. Mikroplastiklerin Dekapodlar Üzerindeki Etkileri

Karides, yengeç ve istakoz gibi on ayaklı kabuklular, sucul besin ağlarının ekolojik ve ekonomik açıdan hayati bileşenleridir. Besin döngüsünde, bentik biyotürbasyonda ve trofik transferde kritik roller üstlenirler ve küresel balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliğine önemli katkılarda bulunurlar (D'Costa, 2022; Yin vd., 2022). Beslenme alışkanlıkları ve bentik

yaşam tarzları, onları tortu yutma ve trofik etkileşimler yoluyla MP ve NP maruziyetine karşı özellikle savunmasız hale getirir (Fu vd., 2020; Doyle vd., 2022). Son çalışmalar, on ayaklıların yalnızca MP biriktirmekle kalmayıp aynı zamanda mekanik sindirim yoluyla nanoplastiklere daha fazla parçalanmalarına da katkıda bulunabileceğini göstermektedir (Capanni vd., 2021; Pastorino vd., 2023). Bu parçacıklar, hayatta kalma, büyüme, beslenme verimliliği, bağışıklık fonksiyonu, antioksidan tepkiler ve enerji metabolizmasında değişiklikler de dahil olmak üzere dekapodlar üzerinde öldürücü olmayan etkilere neden olabilir (Xing vd., 2023; Timilsina vd., 2023). Dahası, MP'lerin ve NP'lerin ağır metaller ve patojenler gibi diğer stres faktörleriyle etkileşime girerek fizyolojik ve biyokimyasal bozuklukları şiddetlendirdiği gösterilmiştir (Singh vd., 2019; Duan vd., 2021; Timilsina vd., 2023; Sun vd., 2023).

Plastik kirliliğinin artan ekolojik önemi ve tatlısu ve deniz dekapodları üzerindeki etkilerine dair sınırlı bilgi göz önüne alındığında, bu inceleme, mikroplastik kirliliğinin dekapod kabuklular üzerindeki oluşumu, biyoakümülyasyonu ve toksikolojik etkileri hakkındaki mevcut bilgileri sentezlemeyi amaçlamaktadır. Bu inceleme, MP ve NP maruziyetine verdikleri fizyolojik, biyokimyasal ve ekolojik tepkileri inceleyerek, dekapodların mikro ve nanoplastik kirliliğini izlemede bekçi türler olarak potansiyelini vurgulamayı ve bu yeni ortaya çıkan çevresel tehdidi azaltmak için ele alınması gereken kritik araştırma boşluklarını karides, yengeç ve istakozlar üzerinden örnekler vererek belirlemeyi amaçlamaktadır.

5.1. Mikroplastiklerin Karidesler Üzerindeki Etkileri

Hem sucul hem de karasal ortamlarda, polietilenin (PE), diğer polimerlerle birlikte küresel üretimin yaklaşık %45'ini oluşturduğu ve mikroplastiklerin (MP'ler) önemli bir kaynağı olduğu belirlenmiştir (Harahan vd., 2022). Plastikler, fotolitik ve biyomekanik ayrışma süreçleri sonucunda kırılgan hale gelerek mikro/nano plastiklere parçalanmaktadır. Detritus, sediment tüketicisi, süzerek beslenen veya yırtıcı beslenme stratejilerine sahip dekapodların beslenme biçimleri, onların mikroplastik tüketimine daha duyarlı olmalarına neden olmaktadır (Saborowski vd., 2022). Ayrıca, karides türü *Crangon crangon* örneğinde, mikroplastiklerin kazara değil, gıda ile karıştırılarak aktif olarak tüketildiği gösterilmiştir (Schmidt vd., 2021).

Nanoplastiklerin, daha geniş yüzey alanları ve nanometrik boyutları nedeniyle biyolojik bariyerleri kolaylıkla geçebilmeleri sonucu, MP'lere kıyasla daha toksik olduğu bildirilmiştir. Daha küçük partikül boyutları, organizmalar tarafından alınma ihtimalini ve buna bağlı toksisiteyi artırmaktadır (Martínez-Álvarez vd., 2022). Karideslerde orta bağırsak bezi

(midgut gland), besin emiliminde görevli epitel hücrelerinden oluşmakta olup, çok küçük plastik partikülleri ($<0.1 \mu\text{m}$) besinlerle birlikte emilirken, daha büyük partiküller (ör. $9 \mu\text{m}$) bağırsaktan dışkı ile atılmaktadır. *Palaemon varians* üzerinde yapılan bir çalışmada, $9.9 \mu\text{m}$ ve $2.1 \mu\text{m}$ boyutlarındaki MP'lerin mide bölgesinde baskın olduğu, buna karşın $0.1 \mu\text{m}$ boyutundaki partiküllerin midgut bezinde yoğunlaştığı tespit edilmiş ve daha küçük boyutlu partiküllerin daha yüksek toksisiteye sahip olduğu belirlenmiştir (Saborowski vd., 2022; Timilsina vd., 2023).

Karideslerin sindirim sistemi ön bağırsak, orta bağırsak ve arka bağırsaktan oluşmaktadır. Ön ve arka bağırsak ektoderm kökenliken, orta bağırsak endoderm kökenlidir. Kitin tabakası, ön bağırsak (özofagus ve mide) ile arka bağırsak (anus) bölgelerini mekanik ve kimyasal zararlara karşı koruyarak, partiküllerin çevre dokulara pasif veya aktif olarak geçişini engeller. Öğütülmüş ve ön sindirimi gerçekleşmiş besin kitlesi, besin emiliminin ve sindirim enzimlerinin sentezinin merkezi olan hepatopankreasa. Hepatopankreas; resorpsiyon hücreleri (R-hücreleri), fibriler hücreler (F-hücreleri) ve veziküler hücreler (B-hücreleri) içerir. Mikroplastiklerin bu hücrelerle etkileşime girdiği düşünülmektedir. R-hücreleri besin depolama ve yeniden emilimden sorumluyken, B-hücrelerinin mikroplastiklerin taşınmasında görev aldığı bildirilmektedir. B-hücrelerinde bulunan vakuoller, hücre olgunlaştıkça büyür ve denatüre olmuş enzimler veya hücre kalıntıları gibi sindirilmesi, yeniden emilmesi veya uzaklaştırılması gereken maddeleri depoladıkları düşünülmektedir (Strus vd., 2019; Timilsina vd., 2023). Bunlarla birlikte, MP'lerin hepatopankreas epiteline lokalize olabildiği ve burada oksidatif stres, sitotoksik reaksiyonlar, enzim aktivitesinde azalma ve immünotoksikite artışı gibi biyokimyasal ve fizyolojik bozulmalara neden olabildiği rapor edilmiştir (Jeong vd., 2017; Huang vd., 2021; Saborowski vd., 2022; Timilsina vd., 2023).

Mohan ve Raja (2024) "Küçük istilacıların ortaya çıkarılması: Karideslerdeki Mikroplastiklere Derin Bir Bakış-Oluşumu, Tespiti ve Dalga Etkilerinin Çözülmesi" başlıklı çalışmalarında; son yıllarda, karideslerde MP birikiminin gözlemlendiği birçok çalışmanın yayınlanmış olduğunu, bu durumun yaygın ve ekolojik açıdan önemli bir sorun haline geldiğini savunmuşlardır. Araştırmacılar çalışmalarında; karideslerde MP'lerin varlığı, birikim dinamikleri ve oluşum süreçlerini ayrıntılı biçimde ele alarak, söz konusu kirleticilerin sucul ekosistemler ve insan sağlığı üzerindeki geniş kapsamlı etkilerine ışık tutmaktadır. Araştırmacılar tarafından, karideslerin beslenme stratejileri, mikroplastiklerin su kolonunda askıda kalma eğilimleri ve çevresel plastik yoğunluğundaki artışlar, MP'lerin solungaç, sindirim sistemi ve kas dokularında yaygın olarak birikmesine zemin hazırladığı çalışma sonucunda ifade edilmiş-

tir. Özellikle PE ve polietilen tereftalat gibi polimerlere ait mikro-liflerin ekosistemlerde baskın olarak bulunması, plastik atık kaynaklarının ve parçalanma süreçlerinin etkisini açıkça göstermektedir (Mohan ve Raja, 2024).

Mikroplastiklere maruz kalan karideslerde büyüme geriliği, oksidatif stres ve davranışsal bozulmaların rapor edilmesi, bu partiküllerin yalnızca fiziksel bir çevresel kirlilik unsuru olmadığını, aynı zamanda biyolojik işlevleri de etkileyen bir stres faktörü olduğunu ortaya koymaktadır. Karides dokularında biriken MP'lerin zamanla hücresel düzeyde taşınması ve farklı organlara yayılımı, trofik transfer yoluyla besin ağının üst basamaklarındaki türlere, nihayetinde insanlara ulaşabilme potansiyeline işaret etmektedir. Bu durum, özellikle deniz ürünlerinin düzenli tüketildiği bölgelerde halk sağlığı açısından dikkate alınması gereken bir risk boyutu oluşturmaktadır (Mohan ve Raja, 2024). Ayrıca, MP'lerin toksik kimyasalları adsorbe ve desorbe etme süreçlerinin henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamış olması, çevresel koşullar, plastiklerin kimyasal yapısı ve yaşlanma süreçleri gibi değişkenlerin toksisiteyi nasıl şekillendirdiğinin anlaşılması bakımından ileri araştırmaları gerekli kıldığı Mohan ve Raja (2024) tarafından ileri sürülmüştür. Bu bağlamda, mikroplastiklerin karideslerde ve genel olarak denizel canlılarda biyokimyasal stres yanıtlarını, bağışıklık etkilerini ve üreme başarısını nasıl etkilediğine yönelik çalışmaların artırılması önem taşımaktadır.

Nanoplastik maruziyetinin yavru tatlısu karidesi *Macrobrachium nipponense*'de hepatopankreas mikroyapısı, sindirim enzimi aktiviteleri ve büyüme ile ilişkili genlerin ekspresyonu üzerindeki etkileri Li vd. (2022) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla, yavru bireyler 75 nm çapında polistiren nanoplastiklere 0, 5, 10, 20 ve 40 mg/L konsantrasyonlarında 28 gün süreyle maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, (1) hepatopankreastaki olumsuz etkilerin nanoplastik konsantrasyonu ile pozitif korelasyon gösterdiğini; (2) lipaz, tripsin ve pepsin aktivitelerinin düşük konsantrasyonlarda artış, yüksek konsantrasyonlarda ise inhibisyon eğilimi gösterdiğini, buna karşın amilaz aktivitesinin anlamlı bir şekilde değişmediğini; (3) kabuk değiştirme ile ilişkili genlerin düşük konsantrasyonlarda uyarıldığını, ancak yüksek konsantrasyonlarda baskılandığını ortaya koymuştur. Ayrıca (4) CDK2 geni ilk kez klonlanmış ve moleküler özellikleri analiz edilmiştir. (5) Polistiren nanoplastiklerin 10 mg/L üzerindeki konsantrasyonlarının CDK2 gen ekspresyonunu baskıladığı belirlenmiştir. Elde edilen bulguların; nanoplastiklerin büyüme performansı, sindirim enzimi aktivitesi, hepatopankreas fonksiyonu ve büyüme ile ilişkili genlerin ekspresyonu üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu Li vd. (2022) tarafından gözlemlenmiştir.

5.2. Mikroplastiklerin Yengeçler Üzerindeki Etkileri

Dünyanın en yüksek at nalı yengeci popülasyonuna sahip olan Çin'in Beibu Körfezi'nde yürütülen bir çalışmada üç dikenli at nalı yengeci *Tachypleus tridentatus*'un yavrularında mikroplastik kirliliği araştırılmıştır. (Wang vd., 2022). Bu çalışmada, yavru *T. tridentatus* bireylerinin tamamının sindirim sistemi örneklerinde (GIT) mikroplastikler tespit edilmiştir. Saptanan MP'lerin büyük çoğunluğu mikrolif formundadır. Mikroplastik konsantrasyonları (4–53 parça/birey), Çin sularında rapor edilen çoğu denizel bentik omurgasız türündeki değerlerden (<15 parça/birey) daha yüksek bulunmuştur; buna karşın yaşadıkları habitatlardaki tortul ortamlarda ölçülen MP seviyeleri nispeten düşük (9–1818 parça/kg) değerlerdedir. Yavru bireylerde MP miktarı ile tortul ortamdaki MP yoğunluğu arasında belirgin bir korelasyon gözlenmemiştir. Ancak, at nalı yengeçlerinin yaş ilerledikçe sindirim sistemlerindeki MP bolluğunun azaldığı belirlenmiştir. Bu bulgu, türün sınırlı yayılma yeteneği, dokuz yıl veya daha uzun süre boyunca mangrov bataklıklarında düşük gelgit dönemlerinde yaşaması ve ontogenetik diyet değişimleriyle ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, çalışmada mikroplastiklerin %99'unun lif formunda olduğu ve en bol bulunan polimerin selofan olduğu belirlenmiştir (Wang vd., 2022). Elde edilen bu temel veriler, bentik makroomurgasızlarda mikroplastik biyoyararlanımının ve bu organizmaların yaşadığı ekosistemlerdeki potansiyel ekolojik risklerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak, MP'ler hem tortullarda hem de kuzey Beibu Körfezi kıyılarındaki yavru *T. tridentatus*'ta yaygın olarak tespit edilmiştir.

Bir başka çalışmada, Bengal körfezinin kuzeydoğu bölgesindeki deniz ve tatlısu yengeçlerinin hepatopankreasında mikroplastik birikiminin değerlendirilmesi Bar vd. (2025) tarafından araştırılmıştır. Bu araştırma, iki denizel tür *Scylla serrata* ve *Portunus sanguinolentus* ile bir tatlısu türünün (*Parathelphusa convexa*) hepatopankreas dokularında mikroplastik kontaminasyonunun karşılaştırılması amaçlanılmıştır. Araştırmacılar tarafından bu türlerin yerel balıkçılık ve beslenme açısından önemli bir ekonomik değere sahip oldukları belirtilmiştir. Bu çalışmada, Bengal körfezinin kuzeydoğusuna kıyı bölgeleri ve yakın tatlısu göletlerinden toplam otuz erişkin yengeç toplanmıştır. Hepatopankreas analizleri, *S. serrata* için ortalama 0.97, *P. sanguinolentus* için 0.93 ve *P. convexa* için 3.84 adet/örnek mikroplastik varlığını ortaya koymuştur. Konfokal Raman spektroskopisi, polifenilen sülfid (PPS), poliüretan (PUR), polietilen tereftalat (PET), polipropilen (PP), politetrafloroetilen (PTFE), polieteterketon (PEEK), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS) ve poli(2,6-dimetil-1,4-fenilen oksit) (PPO) dahil olmak üzere dokuz farklı mikroplastik polimer türünü tanımlamıştır. Bu çevresel olarak ka-

lıcı kirleticiler, sucul yaşam üzerinde toksik etkiler oluşturabilmekte ve insan tüketimi yoluyla bağışıklık sistemi hasarı ile kronik hastalık riskini artırabilmektedir. Kirlilik Yük İndeksi (PLI), *S. serrata* yengecinin mikropplastik kirliliğine en yüksek düzeyde maruz kaldığını ve 2.31'lik değeriyle 1 eşik değerinin üzerinde önemli bir kirlilik seviyesine işaret ettiğini göstermiştir. Bu çalışma, mikropplastik kirliliğini azaltmaya yönelik stratejilerin acil gerekliliğinin altını çizmektedir (Bar vd., 2025).

Çin'de üç önemli balıkçılık sahasında yabancı yengeçlerin farklı dokularında mikropplastikler Zhang vd. (2020) tarafından belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, dört yabancı yengeç türünde (*Portunus trituberculatus*, *Charybdis japonica*, *Dorippe japonica* ve *Matuta planipes*) farklı dokulardaki MP bolluğunu ve özelliklerini, Çin'in üç önemli balıkçılık sahasında (Haizhou körfezi, Lvsı ve Yangtze nehri halici) yer alan dokuz istasyonda incelemiştir. Örneklenen tüm bölgelerde yengeçlerde mikropplastik tespit edilmiştir ve toplam tespit oranı %89.34 olarak kaydedilmiştir. Mikropplastik bolluğu birey başına 2.00 ± 2.00 'dan 9.81 ± 8.08 'e ve yaş ağırlık başına gramda 0.80 ± 1.09 'dan 22.71 ± 24.56 'ya kadar değişmiştir. Mikropplastik bolluğu, partikül boyutu küçüldükçe belirgin olarak artmıştır. Lif formundaki mikropplastikler şekil açısından baskın olup, renk olarak siyah-gri ve mavi-yeşil, bileşim olarak ise selofan tipi malzemeler öne çıkmıştır. Mikropplastikler yengeçlerin solungaç ve bağırsak dokularında tespit edilirken, kas dokusunda bulunmamıştır. Bağırsak dokusundaki MP miktarı ve boyutu, solungaçlara kıyasla anlamlı derecede daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, türlerin beslenme biçimleri, mikropplastik birikim düzeylerini belirgin şekilde etkilemiş; çürükçül türlerde MP miktarı predatör türlere göre daha yüksek bulunmuştur. Çalışma sonucunda araştırmacılar tarafından yengeçlerdeki mikropplastik kirliliğinin, hem insan sağlığı hem de deniz ekosistemlerinin sürdürülebilirliği açısından dikkatle izlenilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Zhang vd., 2020).

Tayland'ın doğu körfezindeki küçük ölçekli balıkçılıktan elde edilen mavi yüzücü yengeç *Portunus pelagicus*'ta mikropplastik kirliliği ise Jendanklang vd. (2025) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla, Jendanklang vd. (2025) , Ocak, Nisan ve Ağustos 2024 dönemlerinde Tayland'ın Rayong Eyaleti kıyı şeridinden *P. pelagicus* örneklerini toplamışlardır. Bulgular, tüm örneklem noktalarında mikropplastik varlığını doğrulamış olup dış dokularda %62.5 ve iç organlarda %72.2 tespit oranı kaydedilmiştir. En yüksek kontaminasyon gastrointestinal kanalda, ardından solungaçlarda gözlenmiş, hepatopankreas ve kas dokularında ise mikropplastik saptanmamıştır. Mevsimler arasında mikropplastik bolluğu açısından anlamlı farklılıklar belirlenmiş olup ($p < 0.05$), en yüksek düzeyler Ağustos ayında kaydedilmiştir. En yaygın polimer türünün polietilen tereftalat glikol olduğu, bunu naylon, polipropilen, polietilen, polistiren

ve polyeşterin izlediği belirlenmiştir. Evsel kaynaklı çamaşır atıkları ve balıkçılık ekipmanlarının hasarı, mikroplastik kirliliğinin başlıca nedenleri arasında olduğu Jendanklang vd. (2025) tarafından savunulmuş balıkçılık ekipmanlarının dayanıklılığının artırılması ve denizde kaybolan/atılan ekipmanların doğru şekilde toplanmasının, mikroplastik kirliliğinin azaltılmasında kritik öneme sahip olduğu araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir (Jendanklang vd., 2025).

5.3. Mikro ve Nanoplastik Kirlenmesinin Istakozlar Üzerindeki Etkileri

Pastorino vd. (2023) tarafından *Procambarus clarkii*'nin sindirim sisteminin tatlısu organizmalarında MP birikiminin araştırılması açısından uygun bir hedef olabileceği dūřünölmüřtür. Bu amaçla, temel hipotez olarak su ve sediment gibi abiyotik evre bileşenlerinde bulunan mikropplastik türlerinin *P. clarkii* bireylerinde de tespit edilebileceği ve böylece bu türün tatlısu ekosistemlerinde MP kirliliğinin izlenmesinde ideal bir aday olabileceği ele alınmıştır. Su, sediment ve *P. clarkii* rnekleri Candia Gölü'nde (Kuzeybatı İtalya) dört farklı istasyondan, iki yıl boyunca (2021–2022) toplanmıştır. Su örneklerinde ortalama MP bolluğu 2021'de 1.75 ± 0.95 adet/m³ ve 2022'de 2 ± 0.81 adet/m³; sediment örneklerinde ise sırasıyla 6.75 ± 1.5 adet/kg ve 8 ± 0.81 adet/kg olarak saptanmıştır. 2021 yılında erkek bireylerde ortalama 0.06 ± 0.07 adet/g, diři bireylerde 0.05 ± 0.05 adet/g; 2022 yılında ise sırasıyla 0.04 ± 0.05 adet/g ve 0.05 ± 0.06 adet/g değerleri kaydedilmiştir. Hem biyotik hem abiyotik örneklerde polipropilen ve polietilen tereftalat esaslı siyah, beyaz, mavi ve açık mavi renkli lif ve parçacıklar belirlenmiştir. Genelleřtirilmiř lineer karma model sonuçları, bireylerin toplam ağırlılığının MP birikimi üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu, en dūřük MP yoğunluğunun en yüksek ağırlılığa sahip bireylerde göröldüğünü göstermiştir. Özellikle daha küçük bireylerde olmak üzere, *P. clarkii*'nin MP kirliliğinin belirlenmesinde uygun bir biyoindikatör olabileceği sonucuna yazarlar tarafından varılmıştır (Pastorino vd. (2023).

Cesarini vd. (2025), yoğun antropojenik baskı altında bulunan büyük bir Alp altı gölü olan Maggiore Gölü'nde birlikte yaşayan üç istilacı kerevit türünde (*Faxonius limosus*, *Pacifastacus leniusculus* ve *P. clarkii*) MP birikimini ilk olarak karşılaştırmalı analizini yapmışlardır. Çalışmada, toplam 90 birey biyometrik özellikler ve bağırsak içeriklerindeki MP varlığı açısından analiz edilmiş, tür kimlikleri moleküler yöntemlerle doğrulanmıştır. Türler arası MP birikiminde anlamlı bir fark bulunmamasına rağmen, *F. limosus*'ta ortalama MP düzeylerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tespit edilen MP'lerin büyük çoğunluğu 1 mm'den küçük polyeşter veya poliakrilat liflerdir ve bu durum baskın bir evsel kaynaklı

kirlilik kaynağına işaret etmektedir. Ayrıca, bu çalışma *F. limosus*'ta MP alımının ilk kez belgelenmesini sağlayarak önemli bir bilgi açığını doldurmaktadır. Bulgular, istilacı kerevitlerin yalnızca MP absorbe etmekle kalmayıp, aynı zamanda bunları ortamdan uzaklaştırma potansiyeline sahip olabileceğini ve böylece ekosistem süreçlerinde beklenmedik roller oynayabileceklerini göstermektedir. Bununla birlikte, Cesarini vd. (2025) trofik transfer süreçleri ve MP'lerin organ düzeyinde birikimi konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, İstanbul ve Marmara Bölgesi için önemli bir içme suyu kaynağı olan Durusu (Terkos) Gölü'nde sedimentte ve tatlısu ıstakozu *Astacus leptodactylus*'un mide ve solungaç MP birikiminin belirlenmesi Mülâyim vd. (2022) tarafından amaçlanmıştır. Böylece hem göl sedimentinin hem de biyotanın mikropplastik kirliliğine ilişkin Türkiye'deki ilk veri seti ortaya konmuştur. Sedimentte MP miktarı 32.26–396.71 adet/kg kuru sediment; kerevitlerin mide içeriğinde 0.89–15.67 adet/birey ve solungaç dokusunda 0.5–19.67 adet/birey olarak kaydedilmiştir. Sedimentte baskın MP formu parçacıklar iken, kerevit dokularında baskın form liflerdir. Polipropilen (%78), poliifenilen sülfid (%11) ve polietilen (%11) kerevit örneklerinde en sık karşılaşılan polimerlerdir; sedimentte ise polipropilen (%47), polivinil alkol (%20), polietilen (%20) ve poliamid (%13) belirlenmiştir. Kıyı alanlarındaki insan faaliyetleri gölün MP kirliliğinin ana kaynağı olarak değerlendirilmiş ve balıkçılığa bağlı kirliliğin kontrol edilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır (Mülâyim vd., 2022).

Yücel ve Kılıç (2022) tarafından *A. leptodactylus*'ta solungaç ve sindirim sistemi dokularında MP varlığı araştırılmıştır. İncelenen tüm bireylerin (N= 37) sindirim sisteminde MP tespit edilmiş olup, birey başına ortalama miktar 11.9 ± 9.7 MP olarak belirlenmiştir. Dişi bireylerin MP alımının erkeklere kıyasla daha düşük olduğu ve bunun üreme dönemlerindeki beslenme kesintisi ile daha durağan davranışla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Lif formundaki MP'ler %97 oranla baskındır ve ağırlıklı olarak siyah renkli olup 1–2.5 mm boy aralığında toplanmıştır. Yücel ve Kılıç (2022), çalışma sonucunda, bulguların ticari türlerin tüketimi yoluyla insan sağlığına yönelik potansiyel risklere işaret ettiğini savunmuşlardır.

LeBlanc vd. (2025), Kanada'nın Nova Scotia bölgesindeki dört ticari balıkçılık alanından toplanan Amerikan ıstakozu (*Homarus americanus*) bireylerinin yenilebilir kas dokusunda MP miktarı, boyutu ve polimer bileşimini incelemiştir. Ortalama MP birikimi 6.65 ± 5.36 MP/g yaş doku olarak saptanmış ve tüm bireylerde MP bulunmuştur. MP yoğunluğu ıstakoz boyutuyla ters orantılı olup, en yüksek MP düzeyi güneybatı bölgesinden toplanan bireylerde kaydedilmiştir. En yaygın polimerler polietilen

vinil asetat (%25), polyester (%25) ve polisülfon (%19) olmuştur. Bulgular, ıstakoz kas dokusunda özellikle 4 µm'den küçük MP'lerin trans-lokasyon potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (LeBlanc vd., 2025).

Woods vd. (2020), farklı mikroplastik lif (MPF) yoğunluklarının H. americanus larval ve post-larval evrelerinde hayatta kalma, kabuk değiştirme ve oksijen tüketim oranları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. En yüksek MPF konsantrasyonu erken larva evrelerinde hayatta kalmayı azaltmıştır; ancak kabuk değiştirme oranları tüm deney grupları arasında farklılık göstermemiştir. MPF birikimi tüm evrelerde gözlenmiş olup en yüksek birikim larva evresi II'de, en düşük birikim post-larva evresi IV'te tespit edilmiştir. Yüksek MPF düzeylerinde geç larva evrelerinde oksijen tüketiminde düşüş meydana gelmiştir. Sonuçlar, MPF etkilerinin larva gelişim evresi, MPF yoğunluğu ve besin mevcudiyetine bağlı olduğunu göstermiştir (Woods vd., 2020).

Amerikan ıstakozunu konu edinen başka bir araştırmada da Potocka vd. (2018) ıstakozların mide içeriğinde plastik parçacıklarının varlığını belirlemişlerdir. Laboratuvar koşullarında tutulan 17 bireyin üçünde küçük esaslı plastik parçaları tespit edilmiştir.

6. Sonuç

Mikro ve nanoplastik kirliliği, artan plastik üretimi, yetersiz geri dönüşüm uygulamaları ve çevresel atık yönetimindeki eksiklikler nedeniyle hem denizel hem de tatlısu ekosistemlerinde hızla yaygınlaşan küresel bir çevresel tehdit haline gelmiştir. Söz konusu plastik partiküller, yalnızca fiziksel stres faktörleri olarak değil, aynı zamanda çevresel kirleticiler, ağır metaller ve patojenler için taşıyıcı vektörler olarak işlev görerek ekosistemlerde bileşik ve çoğul toksik etkiler oluşturabilmektedir. Su ekosistemlerinde önemli trofik roller üstlenen karides, yengeç ve ıstakoz gibi dekapod kabuklular, bentik yaşam biçimleri, sediment ilişkili beslenme davranışları ve filtreleme aktiviteleri nedeniyle bu kirleticilere karşı özellikle savunmasızdır. Literatürde biriken kanıtlar, mikro ve nanoplastiklerin dekapodların sindirim sistemi, hepatopankreas, solungaç ve kas dokularında birikebildiğini; bu birikimin hücresel yapıda bozulma, oksidatif stres artışı, immün yanıtların baskılanması, sindirim enzim aktivitelerinde değişiklik ve büyüme ile üreme performansında azalmaya yol açabileceğini göstermektedir. Ayrıca, küçük boyutlu nanoplastiklerin biyolojik bariyerleri daha kolay aşarak dokular arası taşınma ve sistemik toksisite oluşturma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

Yengeçler ve ıstakozlarda yapılan çalışmalar, mikroplastik birikiminin türlerin beslenme stratejileri, habitat tipi ve yaş gibi biyolojik fak-

törlerle yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, ticari değeri yüksek türlerde mikroplastik birikiminin insan tüketimi yoluyla potansiyel bir gıda güvenliği sorunu oluşturabileceği açıkça ortaya konmuştur. Bu durum, mikro ve nanoplastik kirliliğinin yalnızca ekolojik açıdan değil, aynı zamanda halk sağlığı bağlamında da acil ve bütüncül müdahaleler gerektiren bir konu olduğunu göstermektedir.

Mevcut bulgular, dekapodların mikro ve nanoplastik kirliliğinin hem yerel hem de bölgesel ölçekte izlenmesinde uygun biyoindikatör türler olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, özellikle nanoplastiklerin organizma içi taşınma mekanizmaları, uzun dönemli fizyolojik etkiler ve trofik transfer dinamikleri gibi kritik alanlarda önemli bilgi boşlukları bulunmaktadır. Gelecek araştırmaların; parçacık boyutu, polimer türü, yaşlanma süreçleri ve çevresel koşullar gibi parametreleri dikkate alan deneysel tasarımlara odaklanması, bu kirleticilerin ekosistem ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin bütüncül biçimde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, plastik kirliliğinin kaynağında azaltılması, atık yönetimi politikalarının güçlendirilmesi ve balıkçılık faaliyetlerinde sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesi, hem dekapod popülasyonlarının hem de sucul ekosistemlerin bütünlüğünün korunması açısından kritik önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Alimi, O.S., Farner Budarz, J., Hernandez, L.M., Tufenkji, N. 2018. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. *Environ. Sci. Technol.* 52 (4), 1704–1724.
- Amelia, T.S.M., Khalik, W.M.A.W.M., Ong, M.C., Shao, Y.T., Pan, H.J., Bhubalan, K. 2021. Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *Prog. Earth Planet. Sci.* 8 (1), 1–26.
- Anagnosti, L., Varvaresou, A., Pavlou, P., Protopapa, E., Carayanni, V., 2021. Worldwide actions against plastic pollution from microbeads and microplastics in cosmetics focusing on European policies. Has the issue been handled effectively? *Mar. Pollut. Bull.* 162, 111883.
- Bappy, M.M.M., Rahman M.M., Hossain M.K., Moniruzzaman M., Yu, J., Arai, T., Hossain M.B. 2025. Distribution and retention efficiency of micro-and mesoplastics and heavy metals in mangrove, saltmarsh and cordgrass habitats along a subtropical coast, *Environmental Pollution* 370: 125908. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125908>.
- Bar, S., Das, S., Bera, S., Bera, S. K., Sahu, R., Ghorai, S.K. 2025. Assessing microplastic accumulation in the hepatopancreas of marine and freshwater crabs from the north-east part of bay of bengal. *Environmental Research Communications*. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/adf499>
- Besseling, E., Quik, J.T., Sun, M., Koelmans, A.A. 2017. Fate of nano-and microplastic in freshwater systems: a modeling study. *Environ. Pollut.* 220, 540–548.
- Bhagat, J., Nishimura, N., Shimada, Y. 2021. Toxicological interactions of microplastics/ nanoplastics and environmental contaminants: current knowledge and future perspectives. *J. Hazard. Mater.* 405, 123913.
- Booth, A.M., Sørensen, L. 2020. Microplastic fate and impacts in the environment. *Handbook of Microplastics in the Environment*, pp. 1–24.
- Bullard, J.E., Zhou, Z., Davis, S., Fowler, S. 2022. Breakdown and modification of microplastic beads by aeolian abrasion. *Environ. Sci. Technol.* 57 (1), 76–84.
- Capanni, F., Greco, S., Tomasi, N., Giulianini, P.G., Manfrin, C. 2021. Orally administered nano-polystyrene caused vitellogenin alteration and oxidative stress in the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*). *Sci. Total Environ.* 791, 147984.
- Cesarini, G., Orlandi, M., Sbarberi, R., Sabatino, R., Magni, S., Binelli, A., Santi, N., Schiavetta, D., Kamburska, L., Zanini, M., Zaupa, S., Boggero, A. 2025. Microplastics and invasive crayfish: emerging interactions and ecological implications from three coexisting species in a subalpine lake. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18595-6>
- D’Costa, A.H. 2022. Microplastics in decapod crustaceans: Accumulation, toxicity and impacts, a review. *Science of the Total Environment*, 832, 154963.

- Dong, Y., Gao, M., Song, Z., Qiu, W. 2020. As (III) adsorption onto different-sized polystyrene microplastic particles and its mechanism. *Chemosphere* 239, 124792.
- Doyle, D., Sundh, H., Almroth, B.C. 2022. Microplastic exposure in aquatic invertebrates can cause significant negative effects compared to natural particles-A meta-analysis. *Environ. Pollut.* 120434.
- Duan, Y., Xiong, D., Wang, Y., Zhang, Z., Li, H., Dong, H., Zhang, J. 2021. Toxicological effects of microplastics in *Litopenaeus vannamei* as indicated by an integrated microbiome, proteomic and metabolomic approach. *Sci. Total Environ.* 761, 143311.
- Dusaucy, J., Gateuille, D., Perrette, Y., Naffrechoux, E. 2021. Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environ. Pollut.* 284, 117075.
- Ferreira, I., Venancio, C., Lopes, I., Oliveira, M. 2019. Nanoplastics and marine organisms: what has been studied? *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 67, 1–7.
- Fu, Z., Chen, G., Wang, W., Wang, J. 2020. Microplastic pollution research methodologies, abundance, characteristics and risk assessments for aquatic biota in China. *Environ. Pollut.* 266, 115098.
- Guo, J.J., Huang, X.P., Xiang, L., Wang, Y.Z., Li, Y.W., Li, H., Cai, Q.Y., Mo, C.H., Wong, M.H. 2020. Source, migration and toxicology of microplastics in soils. *Environ. Int.* 137, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105263>.
- Gündoğdu, S., Yeşilyurt, İ.N., Abbas, Z., Baylan, M. 2024. Effects of microplastics on aquatic organisms: a comprehensive review. *Turkish Journal of Zoology*, 48(5), 248–285. <https://doi.org/10.55730/1300-0179.3182>
- Hasan, M.M., Khatun, M.M. 2025. Overview of the ecotoxicological impacts of micro and nanoplastics in aquatic environments. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 60(3), 183–202. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v60i3.81780>
- Hariharan, G., Purvaja, R., Anandavelu, I., Robin, R., Ramesh, R. 2022. Ingestion and toxic impacts of weathered polyethylene (wPE) microplastics and stress defensive responses in whiteleg shrimp (*Penaeus vannamei*). *Chemosphere* 300, 134487.
- He, W., Chen, X., Xu, C., Zhou, C., Wang, C. 2022. Internal interaction between chemically pretreated polypropylene microplastics and floc growth during flocculation: Critical effect on floc properties and flocculation mechanisms. *Sep. Purif. Technol.* 122710.
- Huang, W., Wang, X., Chen, D., Xu, E.G., Luo, X., Zeng, J., Wang, Y. 2021. Toxicity mechanisms of polystyrene microplastics in marine mussels revealed by high-coverage quantitative metabolomics using chemical isotope labeling liquid chromatography mass spectrometry. *J. Hazard. Mater.* 417, 126003.
- Impellitteri, F., Curpan, A.S., Plavan, G., Ciobica, A., Faggio, C. 2022. Hemocytes: a useful tool for assessing the toxicity of microplastics, heavy metals, and

- pesticides on aquatic invertebrates. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19 (24), 16830.
- Jendanklang, P., Ruengsorn, C., Meksumpun, S., Kasamesiri, P. 2025. The Contamination of Microplastic Debris in Blue Swimming Crab *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) from Artisanal Fisheries in the Eastern Gulf of Thailand. *Toxics*, 13(10), 813. <https://doi.org/10.3390/toxics13100813>
- Jeong, C.B., Kang, H.M., Lee, M.C., Kim, D.H., Han, J., Hwang, D.S., Souissi, S., Lee, S.J., Shin, K.H., Park, H.G., Lee, J.S. 2017. Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod *Paracyclopina nana*. *Sci. Rep.* 7 (1), 1. <https://doi.org/10.1038/srep41323>.
- LeBlanc, A., Castle, D., Merschrod, E.F., Ammendolia, J., Kelly, N.E., Maselli, V., Walker, T.R. 2025. Microplastic contamination in edible American lobster (*Homarus americanus*) muscle tissue. *Regional Studies in Marine Science*, 104587. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104587>
- Li, Y., Du, X., Jiang, Q., Huang, Y., Zhao, Y. 2022. Effects of nanoplastic exposure on the growth performance and molecular characterization of growth-associated genes in juvenile *Macrobrachium nipponense*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C Toxicology and Pharmacology*, 254, 109278. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109278>
- Martínez-Álvarez, I., Le Menach, K., Devier, M.-H., Cajaraville, M.P., Budzinski, H., Orbea, A. 2022. Screening of the toxicity of polystyrene nano- and microplastics alone and in combination with benzo (a) pyrene in brine shrimp larvae and zebrafish embryos. *Nanomaterials* 12 (6), 941.
- Mohan, A. V., Raja, S. 2024. Unveiling the Tiny Invaders: A deep dive into microplastics in shrimp-Occurrence, detection and unraveling the ripple effects. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 31(5), 103981. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2024.103981>
- Mülayim, A., Bat, L., Öztekin, A., Gündüz, S. K., Yücedağ, E., Bıçak, B. 2022. Microplastic Accumulation in Crayfish *Astacus leptodactylus* (Eschscholtz 1823) and Sediments of Durusu (Terkos) Lake (Turkey). *Water Air & Soil Pollution*, 233(11). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05908-y>
- Pastorino, P., Anselmi, S., Zanolli, A., Esposito, G., Bondavalli, F., Dondo, A., Pucci, A., Pizzul, E., Faggio, C., Barceló, D., Renzi, M., Prearo, M. 2023. The invasive red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) as a bioindicator of microplastic pollution: Insights from Lake Candia (Northwestern Italy). *Ecological Indicators*, 150, 110200. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110200>
- PlasticsEurope, 2018. *Plastics e the Facts 2018: an Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. <http://www.plasticseurope.org>.
- PlasticsEurope, 2022. *Plastics-The Facts 2022. An Analysis of European Plastics Production, Demand And Waste Data*. PlasticsEurope AISBL, Association of Plastics Manufacturers, Bruxelles, Belgium. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>.

- Potocka, M., Bayer, R.C., Potocki, M. 2018. Plastic pollution affects American lobsters, *Homarus americanus*. Marine Pollution Bulletin, 138, 545–548. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.017>
- Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kuhnel, D., Schmitt-Jansen, M. 2017. Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment. Environmental Science and Technol Ogy Letters, 4(7), 258–267. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00164>
- Saborowski, R., Korez, S., Riesbeck, S., Weidung, M., Bickmeyer, U., Gutow, L. 2022. Shrimp and microplastics: a case study with the Atlantic ditch shrimp *Palaemon varians*. Ecotoxicol. Environ. Saf. 234, 113394.
- Schmidt, N., Korez, S., Saborowski, R., Gutow, L. 2021. Sand grains in the stomach of brown shrimp, *Crangon crangon*: crunchy garnish, supportive macerator, or simply dirt? J. Sea Res. 170, 102020.
- Singh, N., Tiwari, E., Khandelwal, N., Darbha, G.K. 2019. Understanding the stability of nanoplastics in aqueous environments: effect of ionic strength, temperature, dissolved organic matter, clay, and heavy metals. Environ. Sci.: Nano 6 (10), 2968–2976.
- Strus, J., Znidarsic, N., Mrak, P., Bogataj, U., Vogt, G. 2019. Structure, function and development of the digestive system in malacostracan crustaceans and adaptation to different lifestyles. Cell Tissue Res. 377, 415–443.
- Sun, C., Teng, J., Wang, D., Zhao, J., Shan, E., Wang, Q. 2023. The adverse impact of microplastics and their attached pathogen on hemocyte function and antioxidative response in the mussel *Mytilus galloprovincialis*. Chemosphere 325, 138381.
- Talbot, R., Chang, H. 2022. Microplastics in freshwater: a global review of factors affecting spatial and temporal variations. Environ. Pollut. 292, 118393.
- Tumwesigye, E., Nnadozie, C.F., Akamagwuna, F.C., Noundou, X.S., Nyakairu, G.W., Odume, O.N. 2023. Microplastics as vectors of chemical contaminants and biological agents in freshwater ecosystems: Current knowledge status and future perspectives. Environmental Pollution, 330, 121829. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121829>
- Timilsina, A., Adhikari, K., Yadav, A.K., Joshi, P., Ramena, G., Bohara, K. 2023. Effects of microplastics and nanoplastics in shrimp: Mechanisms of plastic particle and contaminant distribution and subsequent effects after uptake. The Science of the Total Environment, 894, 164999. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164999>
- Verla, A.W., Enyoh, C.E., Verla, E.N., Nwornorh, K.O. 2019. Microplastic–toxic chemical interaction: a review study on quantified levels, mechanism and implication. SN Appl. Sci. 1 (11), 1–30.
- Wagner, M., Scherer, C., Alvarez-Munoz, D., Brennholt, N., Bourrain, X., Buchinger, S., Fries, E., Grosbois, C., Klasmeier, J., Marti, T., Rodriguez-Mozaz, S., Urbatzka, R., Vethaak, A. D., Winther-Nielsen, M., Reifferscheid, G. 2014. Microplastics in freshwater ecosystems: What we know and what we need to know. Environmental Sciences Europe, 26, 12.

- Wang, X., Lo, H. S., Fu, Y., Wu, Z., Qin, D., Huang, X., Zhu, J., Cheung S., Kwan, K.Y. 2022. High microplastic contamination in juvenile tri-spine horseshoe crabs: a baseline study of nursery habitats in Northern Beibu Gulf, China. *Journal of Ocean University of China*, 21(3), 521-530. <https://doi.org/10.1007/s11802-022-5163-3>
- Woods, M.N., Hong, T.J., Baughman, D., Andrews, G., Fields, D.M., Matrai, P.A. 2020. Accumulation and effects of microplastic fibers in American lobster larvae (*Homarus americanus*). *Marine Pollution Bulletin*, 157, 111280. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111280>
- Wu, L., Dong, J., Shen, Z., Zhou, Y. 2024. Microplastics as vectors for antibiotic resistance: Role of pathogens, heavy metals, and pharmaceuticals and personal care products. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106124. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106124>
- Xing, Y., Zhu, X., Duan, Y., Huang, J., Nan, Y., Zhang, J. 2023. Toxic effects of nitrite and microplastics stress on histology, oxidative stress, and metabolic function in the gills of Pacific White shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Mar. Pollut. Bull.* 187, 114531.
- Yin, J., Li, J.Y., Craig, N.J., Su, L. 2022. Microplastic pollution in wild populations of decapod crustaceans: A review. *Chemosphere*, 291, 132985.
- Yücel, N., Kılıç, E. 2022. Microplastic contamination in the freshwater crayfish *Pontastacus leptodactylus* (Eschscholtz, 1823). *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114337. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114337>
- Zhang, T., Sun, Y., Song, K., Du, W., Huang, W., Gu, Z., Feng, Z. 2020. Microplastics in different tissues of wild crabs at three important fishing grounds in China. *Chemosphere*, 271, 129479. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129479>
- Zhou, G., Wang, Q., Li, J., Li, Q., Xu, H., Ye, Q., Zhang, J. 2021. Removal of polystyrene and polyethylene microplastics using PAC and FeCl₃ coagulation: performance and mechanism. *Sci. Total Environ.* 752, 141837.

//

Bölüm 6

BALIK YAKALAMA ALETLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Fahrettin YÜKSEL¹

¹ Fahrettin YÜKSEL, Prof. Dr., Munzur Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, fahret-
tinyuksel@munzur.edu.tr, Orcid: 0000-0001-7015-4564

GİRİŞ

Balık yakalama aletlerinin bilimsel olarak incelenebilmesi ve istatistiki olarak değerlendirilebilmeleri için sınıflandırılmaları zorunluluğu vardır. Avcılık düzenlemelerinde kastedilen aletin anlaşılması bakımından da sınıflandırmanın önemi büyüktür. Özellikle uluslar arası sularda yapılan balıkçılıkta bu sınıflandırma anlaşma kolaylığı sağlar. Bütün ülkeler balıkçılık konusunda istatistiki bilgilerini toparlar ve bunu Dünya Tarım Örgütüne bildirir. Bu sebeple hangi balığı hangi av aletiyle yakalandığını bildirirken bölgesel isimlendirmeleri değil bilimsel isimlendirmeleri kullanmak zorundadır (Mengi, 1996).

Hareketsiz olarak avını bekleyen av aletleri pasif av aracı, hareketli olanlar ise aktif av aracı olarak isimlendirilebilir. Ancak aletlerin aktif ya da pasif olması balık yakalama aletlerinin sınıflandırılmasında kullanılamaz. Çünkü birçok av aleti hiçbir değişikliğe uğramadan hem aktif hem de pasif olarak kullanılabilir. Bu bakımdan balık yakalama aletlerinin, balık avlama prensiplerine göre sınıflandırılması en uygun olanıdır. Mengi (1996, 1997, 1998), balık yakalama aletlerini, Dünya Tarım Örgütü (FAO)'nın de kabul ettiği bir sınıflandırmayla 16 ana başlık altında toplamıştır.

1. ALETSİZ BALIKÇILIK

Herhangi bir alet kullanmadan yapılan balık avcılığıdır. Dört farklı şekilde aletsiz balıkçılık yapılmaktadır.

El ile toplama: Akarsularda, denizlerin ve göllerin kıyı kesimlerinde hareketsiz olan canlıların el ile toplanması bu gruba girer. Med-cezir olayının meydana geldiği veya akarsuların taşkın aktığı yerlerde suların çekilmesiyle karada kalan balıklar el ile toplanırlar. Akarsularda taşların altına ya da oyuklara saklanan balıklar da el ile yakalanabilmektedir.

Suya dalarak toplama: Tüplü ya da tüpsüz olarak suya dalmak suretiyle kaçamayacak durumdaki veya hareketsiz av objelerinin toplanmasıdır. Özellikle bu yöntemle sünger, midye, istiridye, deniz salyangozu ve eklembacaklılar gibi canlılar avlanmaktadır. Suya dalarak yapılan avcılıkta, dalgıcın kullandığı oksijen tüpü, balıkçı elbisesi, topladığı objeyi bıraktığı file gibi malzemeler balık yakalama aleti olarak kabul edilmez.

Toplama yeri oluşturma: Genellikle akarsularda kullanılan bir yöntemdir. Balık sürü halinde akarsuya girdiğinde akarsuyun akıntısı bir tarlaya yönlendirilir ve tarlada kalan balıklar toplanır. Ayrıca akarsuyun önünün taşlarla kapatılarak yönünün değiştirilmesi ve tekrar eski yatağına alınmasıyla su dışında kalan balıklar toplanabilmektedir.

Hayvanlar yardımıyla toplama: Özellikle uzak doğuda balık yakalamak amacıyla henüz yavru iken eğitilen cormorant kuşları kullanılmaktadır. Bazı balıkçıl ve karabatak kuş türlerinin de aynı amaçla kullanıldığı bilinmektedir. Avcılık esnasında kuşların avladıkları balıkları yutmamaları için boğazları ip ile bağlanmaktadır. Av sonunda kuşlar küçük balıklarla ödüllendirilmektedirler.

2. SIKIŞTIRAN VE YARALAYAN ALETLER

Bu gruba giren balık yakalama aletleri sıkıştırıcı aletler ve yaralayan aletler olmak üzere ikiye ayrılır. Sıkıştırıcı ve yaralayan aletlerin kullanımını çoğunlukla yasaktır. Sıkıştırarak yakalayan aletler av esnasında avı yarayabilir. Ancak avcılık prensibi sıkıştırarak yakalamadır. Bu yüzden yaralayan aletler grubunda değerlendirilmezler.

2.1. Sıkıştırıcı Aletler

2.1.1. Sıkıştırıcı Yabalar

2.1.2. Kerpetenler

2.1.3. Tırmıklar

2.2. Yaralayan Aletler

2.2.1. Fırlatılan Aletler

2.2.1.1. Kargılar

2.2.1.2. Üfleme Boruları

2.2.1.3. Yay ve Ok

2.2.1.4. Zıpkınlar

2.2.2. Taraklar

2.2.3. Balık İskandilleri

2.2.3.1. Üsten Batanlar

2.2.3.2. Alttan Batanlar

2.2.4. Dolanan İpli Kancalar

2.2.5. Tüfekler

Sıkıştırıcı aletler: Sıkıştırıcı yabalar ve kerpetenler ile su zeminindeki hareketsiz canlılar avlanırlar. Tırmıklar ise av objesinin bol bulunduğu yerlerde avın bir araya toplanmasında kullanılır. Tırmıklar kabuklu ve yosun avcılığında kullanılmaktadırlar.

Fırlatılan aletler: Zıpkınlar genellikle sportif avcılıkta kullanıldığı gibi gemilere sabitlenmiş büyük zıpkınlar da vardır. Bu büyük zıpkınlar ile yüzeye bağımlı yaşayan balina, köpek balığı, orkinos gibi büyük cüsseli türlerin yanında mayıs-haziran aylarında yüzeyde hareketsiz bekleyen kılıç balıkları avlanmaktadır. Zıpkın ucu ile avcı arasında mutlaka irtibat ipi vardır. Bu ip zıpkınlanan balığın alınması içindir. Kargılar zıpkınların daha ilkel olanıdır. Kargılarda zıpkınlarda bulunan ve balığa

saplandıktan sonra çıkmasını zorlaştıran çene yoktur. Ayrıca yine zip-kınlarda bulunan uç ile avcı arasındaki bağlantı ipi de yoktur.

Taraklar: Taraklar, sivri çıkıntıları olan tarak şeklinde bir uç ve 1-2 m uzunluğunda bir gönderden oluşmaktadır. Balıklarla yandan saplanarak av yapan aletlerdir.

Balık iskandilleri, çarpma ve kamoka: Balık iskandilleri alttan batanlar ve üstten batanlar olmak üzere ikiye ayrılır. Alttan batanlar genellikle “çarpma” olarak isimlendirilir. Çarpmalar yüzen canlıların avcılığında kullanılır. Genel olarak av su içerisinde görüldüğü durumlarda avcılık yapılır. Balığın yoğun olduğu yerlerde çarpma el hareketiyle tesadüfi çekilerek de avcılık yapılabilir. Ahtapot çarpmasında cezp edici renkler, canlı yem ve şekillendirilmiş kancalar da kullanılabilir. Üstten batanlar ise su zemininde bulunan canlıların avcılığında kullanılır. Sünger avcılığında kullanılan “kamoka” buna bir örnektir. Kamokanın su dibindeki süngerin üzerine kendi ağırlığı ile bırakılarak saplanması sağlanır ve bu şekilde avcılığı yapılır.

Dolanan ipli kancalar (Karmak): Dolanan ipli kancalardan bilinen tek alet karmaktır. Karmak denizlerin kıyı kesimlerinde ve akarsularda sadece mersin balığı avcılığında kullanılan bir balık yakalama aletidir. Balık zemine yakın olarak yüzerken kancaları görmeyerek takılmakta, kurtulmak isterken diğer kancalara da dolanarak yakalanmaktadır. Mersin balığının koruma altına alınmış olması sebebiyle günümüzde kullanılmamaktadır. 16 metreye kadar olan yerlerde kazıklarla daha derin kısımlarda taşlarla kurulurlar. 50 metre derinliğe kadar kullanılırlar. Karmak “mana” ismi verilen beden, “kol” ismi verilen köstekler ve kancalardan oluşmaktadır.

3. BAYILTMA YOLUYLA AVCILIK

Bayıltma yoluyla avcılığın prensibi; balığa bayılmasını sağlayacak bir etki uygulayarak kaçamayacak hale getirmektir. Bayıltmak amacıyla uygulanan güç balığa fazla gelirse balık ölür. Doz düşük tutulursa büyük balıklar kaçır. Balığın etkilenmesi; uygulanan etkinin türüne, uygulanan doza, uygulama süresine, balığın türüne, büyüklüğüne, etki odağından uzaklığına ve ortam koşullarına bağlıdır. Mekanik bayıltıcılar, kimyasal bayıltıcılar ve elektrikle bayıltma gibi farklı şekillerde uygulanır.

3.1. Mekanik bayıltıcılar

3.1.1. Vurma ile bayıltma

3.1.2. Patlayıcılarla bayıltma

3.2. Kimyasal bayıltıcılar

1.1.1. İhtiyotoksik Bitkiler

- 1.1.2. İhtiyotoksik Hayvansal Maddeler
- 1.1.3. Kimyasal Maddeler
- 3.2.4. Oksijensiz Bırakma
- 3.3. Elektrikle bayılma

Mekanik bayıltıcılar: Balığa sopa, taş gibi sert bir cisimle vurularak bayıltmak ve avlamak mümkündür. Bu yolla yüzeye çıkan balıklar alınmaktadır. Mekanik bayıltıcıların bir diğer uygulama şekli bombadır. Özel olarak balık avcılığı için hazırlanan bombalar vardır. Bu bombalar genellikle dinamitten yapılır. Farklı şekil ve tipteki bombaların da bu amaçla kullanıldığı olmaktadır. Sönmemiş kirecin ağzı kapalı bir şişede patlatılması da benzer etkiyi sağlar. Bombanın suda oluşturduğu basınç yakındaki balıkların bayılmasına sebep olur. Yüzeye çıkanlar el ile toplanır. Sığ olan sularda zeminde kalan balıklar dalınarak da toplanabilir.

Kimyasal bayıltıcılar: İhtiyotoksik bitkiler ve hayvansal maddeler, balıklarda zehirlenme etkisi yaparak bayılmalarına sebep olan maddelerdir. İhtiyotoksik bitkilerin etken maddesi “saponin” ve “lakton” dur. Bu maddeler merkezi sinir sistemini ve kasları etkileyerek balıkları hareketsiz bırakırlar. Bu amaçla kullanılan bitkilere “balık otu” da denmektedir. Bunlar, bitkilerin gövde, yaprak, yumru veya tohumlarından elde edilirler. Ezilerek suya atılabildikleri gibi herhangi bir yem maddesine de karıştırılıp balıkların bunları yemesi sağlanabilir. Hayvanlardan elde edilen ihtiyotoksik maddeler ise bazı balıkların safra suyu veya kanıdır. Özellikle yılan balığının kanının zehirli olduğu bilinmektedir.

Kimyasal bayıltıcılardan en yaygın kullanılanı sönmemiş kireçtir. Suyun Ph’sını aniden yükseltir ve balıkların solungaçlarında yanma yapar. Birçok kimyasal madde balığı bayılabilir ancak, avlanacak balık insan gıdası olarak tüketileceğinden kullanılan maddeye dikkat edilir.

Oksijensiz bırakılarak da balık avcılığı yapılabilir. Akarsularda veya sığ sularda zemin su ile karıştırılırsa zemindeki organik madde oksijeni bağlar. Göllerde tabaka devrilmesi olursa ani sıcaklık değişiminden balıklar bayılabilir.

Elektrikle Bayılma: Tatlı sulara elektrik akımı vermek suretiyle balık avlamak mümkündür. Denizlerde tuzlu su balıktan daha iletken olduğu için akım balık üzerinde toplanmamakta ve balık etkilenmemektedir. Bu sebeple denizlerde elektrikle avcılık normal olarak mümkün değildir. Elektrikle avcılıkta alternatif akım kullanıldığında balık uygulanan etkinin gücüne göre bayılmakta veya ölmektedir. Doğru akım kullanıldığında ise balıklar artı (anot) kutba doğru gitme eğilimi göstermektedir. Balıkların bu hareketine “galvanotaksi” denmektedir. Bu tür avcılıkta

genellikle artı kutup bir kepçeden oluşmaktadır. Son yıllarda balıklar ile ilgili bilimsel araştırmalarda “elektroşoker” olarak isimlendirilen cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar bir jeneratör ve buna kablo ile bağlı 3-4 metre uzunluğunda bir sopadan oluşmaktadır. Sopanın ucunda artı ve eksi kutuplar bulunmaktadır. Sopa suya daldırılıp çıkarılarak etki alanı içindeki balıkların bayılmaları sağlanmaktadır. Suya akım verildiğinde üzerlerinde daha fazla akım toplandığı için büyük balıklar daha fazla etkilenmektedir.

4. OLTALAR

Olta, tutucusu balığın sindirim sisteminin herhangi bir yerine takılması suretiyle av yapan balık yakalama aletidir. Bu sebeple balığın vücudunun bir yerine takılarak av yapan çarpma, karmak gibi aletler olta olarak değerlendirilemez. Yakalama prensibinden de anlaşılacağı üzere balık oltanın tutucusunu yiyecek bir madde sanarak beslenmek istemekte ve yakalanmaktadır. Bu sebeple oltada balığı cezp etmek şarttır. Oltalarda balığı cezp etmek amacıyla yem kullanılacağı gibi yem benzeri şekillendirilmiş tutucular da kullanılabilir. Olta ile avcılıkta balığın beslenme alışkanlığı önem arz etmektedir.

Her olta takımında muhakkak surette bir el oltası ve tutucu vardır. Ayrıca oltalar türüne göre; başlık, ara başlık, beden, ara beden, köstek, firdöndü, kıstırma, kıstırma ipi, iskandil, benlik, mantar gibi kısımlardan oluşurlar. Uzun olta dışındaki olta takımlarında firdöndü ve misina kalınlıkları el oltasından tutucuya doğru gidildikçe ya aynı kalır ya da küçülür. Fırlatılarak kullanılan olta takımlarında yem ile birlikte kancanın ağırlığının kıstırmaların toplam ağırlığından fazla olması gerekir.

4.1. Kancasız Oltalar

4.2. Çelik Oltalar

4.3. Kancalı Oltalar

4.3.1. Bir Balığı Yakalamada Kullanılanlar

4.3.1.1. Sade Kancalı Oltalar

4.3.1.1.1. Kefal Oltası

4.3.1.1.2. İstavrit Oltası

4.3.1.1.3. Orkinos Oltası

4.3.1.1.4. Sinagrit Oltası

4.3.1.2. Şekillendirilmiş Kancalı Oltalar

4.3.1.2.1. Yem Takılanlar

4.3.1.2.1.1. Zokalar

4.3.1.2.1.2. Uzun Olta

4.3.1.2.2. Yem Takılmayanlar

4.3.1.2.2.1. Seğirtmeler

4.3.1.2.2.2. Vobler

4.3.1.2.2.3. Yumuşak Plastik

4.3.1.2.2.4. Sinek Oltası

4.3.2. Birden Fazla Balığı Yakalamada Kullanılanlar

4.3.2.1. Çoklu Sinek Oltaları

4.3.2.2. Çoklu Su Üstü Oltaları

4.3.2.3. Çoklu Zemin Oltaları

4.3.2.3.1. Ters Bedenli Olta

4.3.2.3.2. Zemin Oltaları

4.3.2.4. Öksüzler

4.3.2.5. Çapariler

4.3.2.6. Paraketalar

4.3.2.6.1. Zemin Paraketaları

4.3.2.6.2. Semidemersal Paraketalar

4.3.2.6.3. Yüzeye Asılı Paraketalar

4.3.2.6.4. Vertikal Paraketalar

Kancasız oltalar: Ülkemizde kullanılan kancasız oltalara en iyi örnek ipek oltalarıdır. Profesyonel olarak zargana avcılığında kullanılır. Bu amaçla, ham ipek sarı ya da turuncuya boyanır. Dört parmağın üzerine kangal yapılarak misina ile bağlanır. Bu düğümün 1 cm sağına ve soluna cazibesini artırmak için kırmızı makara ipi ile düğüm atılır. Hareket eden bir vasitanın arkasından çekilir. Yüzeyden sürüklenen ipek kangalı-

nı yem olarak düşünen zargana balığı ipeği ısırdığında geriye kıvrık olan dişlerinden takılır. Ayrıca Avrupa’da yılan balığı avcılığında yün yumağı kullanılmaktadır. Bir misinaya bağlanan yün yumağı yılan balığının bulunduğu yerde zemine indirilmektedir. Yün yumağını ısırarak yılan balığı geri bırakmamakta ve bu şekilde avlanmaktadır. Bir başka yöntem de; bir solucanın içerisinden keten geçirilerek kasa yapılır. Yılan balığı solucanı ısırdığında dişleri ketene takılır ve yakalanır.

Çelik oltalar: En ilkel olatalardan birisidir. İlk zamanlarda çelik oltalar bambus ağacından yapılırdı. Yem takılan bu oltaların tutucusu balık tarafından yutulduğunda çekilerek yanlara doğru açılması sağlanır. Günümüzde çelik ya da plastikten yapılanları vardır. Yılan balığı avcılığında daha yaygın kullanılmaktadır.

Kancalı oltalar: Bir kancada pala ya da göz, sap, kavis, çene ve uç vardır. Günümüzde avlanacak balığın türüne ve büyüklüğüne göre çekme tipi ve büyüklüklerde kancalar imal edilmektedir. Kancalı oltalar, bir balığı yakalamada kullanılanlar ve birden fazla balığı yakalamada kullanılanlar olmak üzere iki ayrıdır.

Bir balığı yakalamada kullanılan oltalar: Genellikle sürü oluşturmaya kıymetli balıkların avcılığında kullanılır. Sade kancalı oltalar ve şekillendirilmiş kancalı oltalar olmak üzere iki ayrıdır.

Sade kancalı oltalar: Sade kancalı oltalar avlanılan balığın ismi ile anılırlar (kefal oltası gibi). Bu oltalarda hedeflenen türün beslenme alışkanlığına göre yem kullanılır. Oltanın takımındaki misina kalınlıkları, firdöndü ve kanca büyüklükleri avlanılacak balığın büyüklüğüne göre değişmektedir.

Şekillendirilmiş kancalı oltalar: Bu gruba giren oltaların bir kısmında yem kullanılırken bir kısmında kullanılmaz. Zoka ve uzun oltada yem kullanılır. Seğirtme, vobler, yumuşak plastik ve sinek oltasında yem kullanılmaz.

Zokalar: Kalıpla, sapı üzerine belli formda kurşun dökülerek şekillendirilmiş kancalardır. Bir zoka oltası zokadan itibaren başlık, firdöndü, ara başlık, firdöndü, kıstırma ipi, kıstırma ve el oltasından oluşmaktadır. Zoka kancasında çeşitli balıklar veya bunların parçaları yem olarak kullanılmaktadır. Zoka ile kıyıda veya hareket etmeyen bir kayıktan avcılık yapılmaktadır. Bazen zokalara “hırsız” ismi verilen ikinci bir kanca takılmaktadır. Zokalar ile kofona, lüfer, çinekop, torik, palamut ve istavrit avlanılmaktadır.

Uzun olta: Profesyonel balıkçıların kullandığı olta takımlarıdır. Tutucusu hareketli olan 1 taşıyıcı, 1-3 tutucu kancadan oluşur ve benlik olarak isimlendirilir. Başlık ile ara başlık arasında topaç iskandil vardır. Yem olarak tüm balık (zargana, istavrit, izmarit) kullanılır. Benlikteki hareketli olan kanca, yem olarak kullanılan balığın boyuna göre ayarlanır. Hareket eden bir vasıtanın arkasından zeminden 30-40 cm yukarıdan çekilir. Torik, kofana, lüfer gibi büyük balıkların avcılığında kullanılır.

Seğirtmeler: Zokalarda olduğu gibi kalıplara kanca konarak kurşun dökmek yoluyla yapılmaktadır. Zokaya göre daha uzun ve balık görünümündedir. Seğirtmelerde yem kullanılmamakta ve hareket eden bir vasıtanın arkasından çekilmektedir. Seğırtmenin daha köşeli olanına “pişko-va”, horoz tüyü takılmış olanına ise “yünlü” denilmektedir.

Vobler (Sırtı): Belli bir ritim içerisinde hareket eden cisimlere verilen isimdir. Su canlılarına benzetilerek yapılmış olta tutucuları da vobler veya sırtı olarak isimlendirilmektedir. Şekil, renk, büyüklük olarak sayısız çeşidi mevcuttur. Bu oltalarda yem kullanılmaz. Kaşık oltası da voblerler grubunda değerlendirilir. Kaşık oltası ya hareket eden bir vasıtanın arkasından çekilmekte ya da el ile atıldıktan sonra aralıksız olarak kıyıya veya tekneye doğru çekilmekte ve tutucunun dönme hareketi yapması sağlanmaktadır. Dönen parlak cisim, hareketli canlılarla beslenen karnivor balıkları cezbetmektedir.

Yumuşak plastikler: Su içerisinde dönme hareketi yapmayan, su canlılarına benzetilerek plastikten yapılan tutucusu olan oltalardır.

Sinek oltası: Sinek ve benzeri bir canlıya benzetilmiş tutucusu olan, suda batmayan oltalardır. Oltanın tutucusu suyun üzerine konan bir böceği andırır. Alabalık gibi su yüzeyindeki böceklerle beslenen balıkların avcılığında kullanılır.

Birden Fazla Balığı Yakalamada Kullanılan Oltalar: Birden fazla tutucu bulunan oltalardır. Avcılıkta tek operasyonda birden fazla balık hedeflenir. Bu aletlerde çoğunlukla bir beden ve bu bedene kösteklerle bağlı tutucular mevcuttur.

Çoklu sinek olta: sinek olta türünün çoklu olanlarıdır. Bir beden üzerinde köstekler ve kösteklerin ucunda sinek veya benzeri bir böceğe benzetilmiş kancalar vardır. Ayrıca yem kullanılmaz. Bedenin uç kısmında takımı su yüzeyinde tutan bir şamandıra vardır.

Çoklu su üstü olta: Bu oltalarda köstek ve kancalar su yüzeyinin üzerindedir ve suyla temas etmez. Kazıklarla sabitlenir. Yem olarak ge-

nellikle uçan canlılar kullanılır. Su üstüne sıçrayarak beslenme özelliği gösteren balıkların avcılığında kullanılır.

Çoklu zemin oltaları: Zemin oltaları ve ters bedenli oltalar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Zemin oltası su tabanında sabit olarak bekletilir ve dip balıkların avcılığında kullanılır. Ters bedenli oltalar, hareket eden bir vasiyanın arkasından çekilir. Beden üzerinde başlıklar ve topaç iskandilden oluşur. Bu oltalarda yem kullanılır.

Öksüzler: Av veriminin yüksek olduğu dönemlerde seğırtmeye 1-5 köstekli bir beden takılır. Bedenin bir ucu seğırtmeye diğer ucu el oltasının fırdöndüsüne bağlanır. Bu haliyle bu olta takımı öksüz olarak isimlendirilir. Takılan beden, köstek ve kanca büyüklükleri hedeflenen balığın büyüklüğüne göre seçilir. Bu oltalarda seğırtmeye çoğunlukla kırmızı horoz tüyü takılır.

Çapariler: Çapari, aletin kolay batmasını ve gergin durmasını sağlayan bir iskandil, kancaların bağlı olduğu köstekleri taşıyan bir beden ve el oltasından oluşmaktadır. Çaparilerde kanca sayısı fazla olduğu için yem olarak kanatlı hayvan tüyleri daha fazla tercih edilmektedir. Küçük balık (istavrit, izmarit gibi) çaparileri vertikal el hareketleri ile kullanılırken, büyük balık (palamut, torik gibi) çaparileri hareket eden vasıtaların arkasından çekilmektedir. Çaparilerde köstekler arasındaki mesafe, kancaları ile birlikte iki köstek uzunluğundan daha fazladır.

Paraketalar: Paraketalar, zemine, pelagiale veya yüzeye sabit olarak konumlandırılan olta takımlarıdır. Paraketalarda yem kullanılır. Çaparilerde olduğu gibi iki köstek arası mesafe iki köstek boyundan fazladır. Hedeflenen türe göre isimlendirilirler (Morina paraketası, kalkan paraketası gibi). Ticari amaçlı avcılıkta kullanılırlar. Konumlandırıldıkları yere göre; yüzey paraketaları, semidemersal paraketalar, yüzeye asılı paraketalar ve vertikal paraketalar olmak üzere dört farklı şekilleri vardır.

5. KAPANLAR

Herhangi bir sebeple içine giren canlının çıkmasını zorlaştıran düzenlemeleri olan balık yakalama aletleridir. Balıklar herhangi bir etkidenden korktuklarında kapalı bir yere girme ihtiyacı duyarlar. Bazı türler ise karakteristik olarak gizlenme özelliği gösterirler. Bu durum esas alınarak kapan diye tabir edilen aletlerle balık avcılığı yapılmaktadır. Prensip olarak balıkların içinde kaldığı bir veya birden fazla bölme vardır. Bu amaçla, çalı demetleri, borular, küfeler, çanaklar, huniler, sepetler, pinterler gibi küçük yapıtlı aletler kullanıldığı gibi, 200 m uzunluğundaki dalyanlar da kapanlar içerisinde değerlendirilmektedir.

5.1. Sığınma Kapanları

5.1.1. Çalı Demetleri

5.1.2. Borular

5.1.3. Kalamar Çanakları

5.1.4. Küfeler

5.1.5. Suni Oluşturulmuş Yuvalar

5.2. Setler

5.2.1. Duvarlar

5.2.2. Çit Dalyanları

5.3. Mekanik Kapanlar

5.4. Ventersiz Yapıtlar

5.4.1. Kerevit Tepsileri

5.4.2. Ventersiz Huniler

5.5. Venterli Yapıtlar

5.5.1. Sepetler

5.5.2. Pinter Ağları

5.6. Dalyanlar

5.6.1. Havuzu Kapatılamayanlar

5.6.1.1. Kepasti (≤ 32 m)

5.6.1.2. Kırma (≤ 48 m)

5.6.2. Havuzu Kapatılabilenler

5.6.2.1. Kurtağzı (80-100 m)

5.6.2.2. Şıra (104-200 m)

Sığınma kapanları: Balıkların herhangi bir sebeple sığınmak için girdikleri yapılar balık avcılığında kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi çalı demetleridir. Çalı demetleri sığ suda karides ve yılan balığı avcılığın-

da kullanılır. Bir beden üzerine belirli mesafelerde çalılar bağlanır. Zeminde bekletilen çalı demetleri arasına giren karidesler ve yılan balıkları yakalanır. Yılan balığı avcılığında borular kullanılmaktadır. Bu boruların bir tarafı açık diğer tarafında ise suyu süzmesi için küçük bir delik vardır. Takım, bir bedene bağlanmış borulardan oluşur. Gizlenmek için borulara giren yılan balıkları yakalanırlar. Aynı şekilde ve aynı prensiple kalamar avcılığında kullanılan çanaklar vardır. Ayrıca, bazı kabukluların avcılığında tarımda ürün toplamada kullanılan küfeler kullanılmaktadır.

Setler: Bu gruba giren ve “duvar” olarak tabir edilen yapılar çoğunlukla med-cezir olayının meydana geldiği yerlerde çitalardan veya taşlardan oluşturulur. Su yükseldiğinde oluşturulan setin arkasında kalan balıklar, su çekildiğinde seti geçemezler ve açıkta kalırlar. Set olarak labirent benzeri yapılar da oluşturulabilir. Çit dalyanları ise balıkların göç yollarına kurulan, balık içine girdikten sonra çıkmasını zorlaştıran yapılardır. Çoğunlukla çitalardan bahçe parmaklığı şeklinde yapılmaktadır. İçerideki balıklar kepçelerle alınmaktadır.

Mekanik kapanlar: Mekanik kapanlar sepet şeklinde kapak sistemleri olan kapanlardır. Kapak kapandığı için sadece bir balığı avlamak hedeflenir. Balıklar yem ile cezp edilir. Balık sepetin içindeki yemi çekince kapak kapanır. Sportif amaçlı avcılıkta insanlar tarafından farklı şekillerde oluşturulan yapılardır.

Ventersiz yapıtlar: Ventersiz yapıtlardan olan kerevit tepsileri, tepsi büyüklüğünde kare veya dikdörtgen şeklinde bir çerçeve, dört köşede 10-15 cm yüksekliğinde hafif içeriye doğru eğimli duran dikme ve bunun üzerine geçirilmiş ağdan oluşur. Üzerine yem tutturulur. Yem için tepsinin içine giren kerevitler geri çıkamazlar. Ayrıca bu gruba giren ventersiz huniler balık avcılığında kullanılmaktadır. Akarsularda suyun hızlı aktığı yerlerde kayalar arasına sabitlenir. Geniş olan kısımdan balık girince sıkışır ve geri çıkamaz.

Venterli yapıtlar: Venterli yapıtların en yaygın kullanılanı pinterlerdir. Özellikle ülkemizde kerevit avcılığı tek girişli iki venterli pinterlerle yapılmaktadır. Bunlarda kapalı olan taraf büzülerek bağlanmıştır. Av büzme ipi çözülerek buradan alınır. Pinterlerde en az bir tane çıkmayı zorlaştıracı huni şeklinde venter vardır. Kerevitlerde avı yönlendirmek amacıyla germe ağları da kullanılır. Kerevit avcılığında kullanılan pinterler genelde 100'erli gruplar halinde birbirine bağlanarak suya atılmakta 3-7 gün aralıklarla kontrol edilip av alınmaktadır.

Dalyanlar: Deniz kıyılarında balıkların göç yollarına kurulan, kıyı ile aradaki açıklığı bir germe ağı ile kapatılan, balığın işleyeceği yeri açılıp kapanabilen, ağdan yapılmış büyük havuzlara dalyan denmektedir. Dal-

yan ile kıyı arasını kapatan bir germe ağı vardır. Balıkların ağa girdikleri bölüme döşeme, toplandıkları bölüme hazne, hazne ile döşeme arasındaki kısma ise etek denmektedir. Şıra dalyanlarında balığın tekrar dışarı çıkmadan ağın içinde dönmesini sağlamak için köstek ismi verilen bir bölüm eklenmiştir. Dalyanlar aşağıdaki özellikleri ile birbirinden ayrılmaktadırlar (MEGEP, 2012).

Kepasti dalyanı: Germe, etek ve hazneden oluşmaktadır. Ağ havuzunu kapatma düzeni yoktur. Ağın uzunluğu 32 m kadardır.

Kırma dalyanı: Germe, döşeme, etek ve hazneden oluşmaktadır. Ağ havuzunu kapatma düzeni yoktur. Ağın uzunluğu 48 m kadardır.

Kurtağzı dalyanı: Germe, döşeme, iki etek ve iki hazneden oluşmaktadır. Ağ havuzunun kapatma düzeni vardır. Genellikle balıkların haznede toplanması sağlanmakta ve buralardan alınmaktadır. Ağın uzunluğu 80 m kadardır.

Şıra dalyanı: Germe, köstek, döşeme, etek ve hazneden oluşmaktadır. Ağ havuzunu kapatma düzeni vardır. Ağ havuz içerisinde sürü görülünce ağ girişi kapatılmakta, balıklar hazneye doğru yönlendirilmekte ve haznede toplanan balıklar kepçelerle alınmaktadır. Ağ uzunluğu 200 m'ye kadar olabilmektedir.

6. HAVA KAPANLARI

Bazı balıklar sıkıştırılınca veya bir engelle karşılaşınca suyun yüzeyine sıçramaktadırlar. Su yüzeyine veya üzerine kurulan yapılarla sıçrayan bu balıklar avlanabilmektedir. Akarsularda üreme göçü yapan bazı türler, küçük şelaleleri zıplayarak geçmek isterler. Buralara kurulan kepçe, sandık ve benzeri yapılar ile balık avcılığı yapılabilmektedir. Ayrıca durgun sularda su yüzeyinde duran hasır, kayık gibi cisimlerin gölgelerini engel olarak gören balıklar zıpladıklarında bu yapıların üzerinde kalabilmektedirler. Kefal gibi zıplama özelliği olan balıklar uzatma ağları ile karşılaştıklarında ağı görürlerse zıplayarak ağın üzerinden geçerler. Bunu önlemek için bu balıkların avcılığında kullanılan ağların mantar yakasına, su yüzeyinde yatay duracak şekilde kamışla sağlamlaştırılmış ek ağ bağlanmaktadır. Bu ağlara kamışlı voli ağları denmektedir.

6.1. Su Yüzeyinin Üzerine Asılı Yapılar

6.2. Kayıklar

6.3. Hasırlar

6.4. Kamışlı Voli Ağları

7. AÇIKLIĞI KUVVETLENDİRİLMİŞ TORBA AĞLAR

Bu balık yakalama aletleri torba şeklinde bir ağın ağız açıklığının sert bir materyal ile çevrilmesiyle oluşturulur. Farklı amaçlarla imal edilen çeşitli şekil ve büyüklükteki kepçeler bu gruba girmektedir. İki sopa arsına takılmış bir torba ağdan oluşan alete boş ismi verilmektedir. Kollu ve kolsuz çerçevesiz ağlar çoğunlukla gel-git olayının olduğu deniz kıyılarında kullanılır. Ağız açıklıkları kıyıya doru gelecek şekilde sabitlenirler. Büyük kepçeler çoğunlukla pasif olarak, avın alete sürülmesi şeklinde kullanılan balık yakalama aletleridir.

7.1. El Kepçeleri

7.1.1. Çok Amaçlı Kepçeler (Yuvarlak Kepçeler)

7.1.2. Kazıma Kepçeleri

7.1.3. Boş

7.2. Büyük Kepçeler

7.3. Kolsuz Çerçevesiz Ağlar

7.4. Kollu Çerçevesiz Ağlar

8. SÜRÜKLEME ALETLERİ

Sürüklenme aletleri aktif olarak kullanılan balık yakalama aletleridir. Hareketli bir araca bağlı olan alet zemin üzerinde veya su içerisinde sürüklenmekte ve aletten daha pasif olan av torbada kalmaktadır. Teorik olarak sürüklenme süresi taranan alan sınırsızdır. Sürüklenme aletlerinin boy seçiciliği torbanın göz büyüklüğü ile ilişkilidir. Avcılık düzenlemelerinde küçük balıkları korumak amacıyla trol torbasının göz büyüklüğü sınırlandırılmıştır.

8.1. Zemin Üzerinde Sürüklenenler

8.1.1. Dreçler

8.1.1.1. El Dreçleri

8.1.1.2. Gemi Dreçleri

8.1.2. Ağaç Trolleri

8.1.2.1. Karides Algarnası

8.1.2.2. Kankava

8.1.3. Dip Trolleri

8.1.3.1. Avara Trolü

8.1.3.2. Seyir Dip Trolü

8.1.3.2.1. Çift Gemi Dip Trolü

8.1.3.2.2. Tek Gemi Dip Trolü

8.2. Su İçinde Sürüklenenler

8.2.1. Sürükleme Volisi

8.2.2. Pelajik Trol

8.2.2.1. Çift Gemi Pelajik Trolü

8.2.2.2. Tek Gemi Pelajik Trolü

8.3. Kombine Sürükleme Aletleri

Kaska (Dreç): sabit çerçeveli bir sürükleme aletidir. Su zemininde yaşayan hareketsiz organizmaların (midye, istiridye, tarak, denizhiyarı gibi) avcılığında kullanılır. Aletin zemini kazıyan bıçak ağzı ve avın toplandığı bir torba bulunmaktadır. Torbanın alt tarafı çabucak parçalanmasın diye telden yapılmıştır. Kaskayı av aracına bağlayan halata yuma ipi denmekte ve derinliğin 1,5 katı kadar salınmaktadır. Kaska, avcılığın yapıldığı teknenin kış kısmındaki makara ile suya indirilmekte ve yaklaşık 1 mil/saat hızla çekilmektedir. Sürükleme süresi değişken olmakla birlikte 10 dakika kadardır. Süre dolunca motor durdurulmakta, kaska makaraya kadar çekilmekte ve tila iplerinden tutularak av küpeşteye ağızdan boşaltılmaktadır.

Karides Algarnası: Karides avcılığında kullanılan bu sürükleme aletin ağzı açıklığının üst kısmı 3 metre uzunluğundaki bir borudan oluşmaktadır. Avcılık kaskada olduğu gibidir. Farklı olarak av torbanın arkasından boşaltılmaktadır ve bir tekneden iki algarna çekilebilmektedir.

Kankava: Bir dingil üzerine oturtulmuş 2-3 teker ve geriden gelen bir veya iki torbadan oluşmaktadır. Dingil uzunluğu 6 metreye kadar olabilmektedir. Kurşun yaka çoğunlukla zincirden yapılmaktadır. Kankava sünger avcılığında kullanılan bir sürükleme aletidir. Avcılığı diğer sürükleme aletlerinde olduğu gibidir.

Avara trolü: Motorsuz teknelerde, teknenin enlemesine olan hareketi rüzgar yada akıntı ile sağlanan ve hızı da bu akıntı ve rüzgara bağlı olan avcılık şeklidir.

Seyir dip trolü: Su zeminini tarayan kollu torbalardır. Ağ; kol, omuz, model, karın, tunnel, torba ve torbanın üzerine geçirilen ve katakulli ismi verilen kısımlardan oluşur. Katakulli, ağın sürüklenmesi esnasında balıkların içinde toplandığı torbanın gerek sürüklenme, gerekse avın gemiye alınması işlemlerinde yıpranıp parçalanmaması için torbaya koruma amaçlı olarak takılır. Ağın ağız açıklığının dikey yönde sağlanabilmesi için mantar yakada yüzdürücüler, kurşun yakada batırıcılar kullanılmaktadır. Ağın yatay konumda açılmasını sağlayan ve kapı ismi verilen yapılar mevcuttur. Kapılar hidrodinamik prensiple çalışmaktadır. Çekim esnasında kapılar suyun basıncıyla trolün ağız açıklığını yanlara doğru açmaktadır. Trolün ağız açıklığı kapılar üzerinde yapılan düzenlemelerle ayarlanmaktadır. Ağız açıklığı yanlara doğru açıldıkça yüksekliğinden kaybetmektedir. Trol torbasında avın boşaltıldığı kısım hydros ipi ile bağlanır. Hydros ipi trol torbasının bağlanmasına yaradığı gibi, bu işlem unutulduğunda yüzeyden gelerek torbanın bağlanmadığını belli eder. Bunun dışında ağ bir yere takılıp yırtıldığında, ağın suda kalan kısmının tekneye alınmasını sağlar. Ayrıca av sonrasında torba vinçle tekneye alındığında torbanın salınımını engellemek için hydros ipinden tutulur.

9. ÇEKME ALETLERİ

Çekme aletleri, çok uzun halatlar ve kollar ile bunlara oranla küçük bir torbadan oluşmaktadır. Bu aletlerle avcılık belli bir alanın çevrilmesi, halatların, kolların ve torbanın sabit bir yere, araca veya kıyıya çekilmesi ile yapılmaktadır. Torbalı ve torbasız çekme ağları vardır ancak en yaygın kullanılanları torbalı çekme ağlarıdır. Bunlar ise tek farklılıkları kol uzunlukları olan tarlakoz, manyat ve ıgıptır. Bu çekme aletlerine, balıkların kaçışına engel olan ve av verimini artıran çalı demetleri bağlanınca “çalı volisi” olarak isimlendirilmektedir. Bu aletleri oluşturmak için hazır ağlar kesilmekte, birbirlerine çatılmakta ve yaka donamları yapılmaktadır.

9.1. Torbasız Çekme Ağları

9.1.1. İki Sopalı Çekme Ağları

9.1.2. Halatlı Çekme Ağları

9.2. Torbalı Çekme Ağları

9.2.1. Tarlakoz (Kol Uzunluğu 32-72 m)

9.2.2. Manyat (“ “ 48-128 m)

9.2.3. İğrip (“ “ 52-144 m)

9.2.4. Çalı Volisi

10. ÇEVİRME ALETLERİ

Sürü oluşturan pelajik balıkların ilk önce çevrelerinin ve hemen arkasından altlarının kapatılması ile av yapan aletlerdir. Alet genellikle düz bir ağ duvardan oluşmaktadır. Üst yakada yüzdürücüler, alt yakada ağırlıklar vardır.

10.1. Lampara Ağları

10.2. Lampara-Gırgır Ağları

10.3. Gırgır Ağları

10.3.1. Çift Gemi Gırgır Ağları

10.3.2. Tek Gemi Gırgır Ağları

Çevirme ağlarında iki bariz grup vardır. Bunlardan bir tanesi “lampara ağları”dır. Bu ağlarda kurşun yaka mantar yakadan daha kısadır. Mapalar ve çelik teller (istinga halatı) yoktur. Ağın iki ucundan ortaya doğru göz büyüklükleri değişir. En küçük gözlü kısmı olan “bocilik” kuvvetli materyalden yapılmıştır ve daima ortadadır.

Diğer gruptaki ağlar ise çok daha yaygın kullanılırlar ve “gırgır ağları” olarak bilinirler. Bunlarda mantar yaka ile kurşun yaka eşittir. Ağın kurşun yakasının büzülüp kapanması, yakaya bağlı mapalar ve mapalardan geçen çelik telle (istinga halatı) sağlanmaktadır. Ağın her iki tarafında göz büyüklükleri aynıdır. Bocilik ise ya ortada ya da bir kenardadır. Bocilik ağın bir ucunda ise tor bütün halindedir ve tek gemiyle suya serilir. Bocilik ortada ise tor çatı denen kısımdan ikiye ayrılabilir durumdadır ve iki gemiyle suya serilmektedir. Ağın yan kısımlarına peçe ismi verilmektedir.

Hamsi, istavrit, sardalya, palamut, lüfer, uskumru, gümüş, zargana, ringa gibi sürü oluşturan pelajik balıkların avcılığında kullanılan gırgır ağlarının uzunlukları 150-800 m arasında, derinlikleri ise 25-110 m arasında değişmektedir. Gırgır ağları; hamsi gırgırı, palamut gırgırı gibi avladıkları balık türüne göre isimlendirilirler. Gırgır tekneleri, bu ağların

suya serilip, toplanmasına ve istiflenmesine olanak sağlayan özel mekanizasyonla donatılmışlardır.

Gırgır avcılığı ile avcılıkta yatay ve dikey ses dalgaları gönderen sonar ve radarlar kullanılmaktadır. Daha önceleri balıkçılık tecrübesiyle tespit edilen balık sürüleri günümüzde bu cihazların yardımıyla belirlenmektedir. Sürü tespit edildikten sonra gırgır ağı ile etrafı çevrilmekte, mantar yaka yüzeyde kalmakta ve kurşun yaka zemine ulaşmaktadır. Ağdan daha derin olan sularda sürü çevrilmemektedir. Çevirme işlemi iki gemi ile yapılıyorsa, iki gemi aynı anda ters istikamete hareket ederek ağı sermekte ve bir noktada tekrar buluşmaktadırlar. Tek gemi ile yapılan avcılıkta ise bir gemi ağı suya sererken küçük ama güçlü motorlu bir bot ağın ucunu tutarak aksi yönde motor çalıştırmakta ve böylece ağın ucunun sürüklenmesini önlemektedir. Sürü çevrildikten sonra istinga halatı makaraya sarılarak vira edilmekte ve böylece ağın altı büzülmektedir. Bociliğe sıkıştırılmış sürü ya kepçe ile veya “kital” ismi verilen ağ ile, günümüzde ise çoğunlukla balık pompaları ile tekneye alınmaktadır.

11. AVIN ALETE SÜRÜLMESİYLE AV YAPAN ALETLER

Bu bölüme giren aletlerle, avın alete yönlendirilmesi yoluyla avcılık yapılmaktadır. Diğer gruplardaki av aletlerinin çoğu ile bu yöntemle avcılık yapmak mümkündür.

12. KALDIRMA ALETLERİ

Bu yakalama aletlerinde avcılık, yüzeye paralel veya eğik duran alete balığın kendiliğinden gelmesi, cezp edilmesi veya sürülmesi sonucu, ağın süratle yukarı kaldırılması ile yapılmaktadır. Avlama yüzeyleri küçük olan aletlerde zaman zaman çerçeve de vardır. El kaldırma ağları, mekanik kaldırma ağları ve çökertmeler olmak üzere üç gruba ayrılırlar (MEGEP, 2012).

12.1. El Kaldırma Ağları

12.2. Mekanik Kaldırma Ağarı

12.3. Çökertmeler

12.3.1. Gemi Çökertmeleri

12.3.2. Nehir Çökertmeleri

12.3.3. Kıyı Çökertmeleri (Çardak Dalyanı)

El kaldırma aletleri kıyı bölgelerinde kullanılmaktadır. Çoğunlukla bir ağ torba ve bir sopadan oluşmaktadır. Suyun belli bir derinliğinde sabit tutulan ağın üzerine balıkların gelmesini sağlamak için yem de takılmaktadır. Balıklar ağ torbanın üzerine gelince ağ hızla yukarı doğru kaldırılmakta ve balıkların ağda kalması sağlanmaktadır. Mekanik kaldırma aletleri ise el kaldırma aletlerinin daha büyük olanlarıdır. Bunlar çoğunlukla sabit çerçevelidirler. Avcılık aynı prensiple yapılır. Fakat bunlarda ağın kaldırılması esnasında gerekli insan gücünü azaltmak için mekanik düzenekler mevcuttur.

Çökertmeler nehirlerde, açık denizlerde ve kıyılarda kullanılabilirler. Kıyıda kullanılanlarına çardak dalyanı denmektedir. Gemi çökertmeleri tek gemi ile kullanılabildikleri gibi dört gemi ile de kullanılmaktadır. Bütün bu aletlerinin yakalama prensibi, balık sürüsü ağın üzerinden geçerken ağın yukarıya suyun dışına kaldırılmasına dayanmaktadır.

13. KAPAMA ALETLERİ

Bu gruba giren aletlerle balıkçılığın esasını balığın üstten kapatılarak aletin içinde kalması oluşturmaktadır. Balığın alınması, sık suda aletin altında kalan balığın elle yakalanması, ağda oluşturulmuş ceplerde kalması, ağ yakasının büzülmesi sonucu içinde kalması şeklindedir.

13.1. Sabit Formlu Kapama Aletleri

13.1.1. Ağaç Kapama Sepetleri

13.1.2. Fanus Ağları

13.2. Serpme Ağları

13.2.1. El Serpme Ağları

13.2.1.1. Sade Serpme Ağları

13.2.1.1.1. Merkezi İpli

13.2.1.1.2. Merkezi İpsiz

13.2.1.2. Çarmıklı Serpme Ağları

13.2.1.3. Cepli Serpme Ağları

13.2.1.4. Büzmeli Serpme Ağları

13.2.2. Direk Serpme Ağları

Serpme ağlarının tor kısımları el ile örülerek veya hazır ağdan kesilerek oluşturulmaktadır. Üçgen şeklinde hazırlanan ağın kenar kesimleri birleştirilerek huni şeklinde ağ elde edilmektedir. Daha sonra bu huni şeklindeki ağın geniş kısmına aletin atıldığında batmasını sağlayan kurşun yaka donatılmaktadır. Serpme ağında ağ ve yakadan başka, atıldıktan sonra geri alınmasını sağlayacak el incesi, merkezi ip veya büzme ipi bulunmaktadır. Yakaya ağın batmasını sağlayacak kurşunlar ve ağın altında kalan balıkların, ağın geri alınması esnasında kaçmalarına engel olmak için etekte boşluk oluşturmak amacıyla cep ipleri veya çarmık ipleri takılmaktadır. Büzme ipi ağın alınmasına yardımcı olurken aynı zamanda ağ açıklığının da kapatmaktadır.

Sade serpme ağı: Ağın altında kalan balıkların yalnızca el ile alınabileceği derinliklerde kullanılabilen bir serpme ağıdır. Genellikle daha büyük tek balıkların avcılığında kullanılır. Bu ağlarda merkezi ip vara, ağ atıldıktan sonra çekilerek kurşunların bir araya toplanması sağlanmaktadır.

Çarmıklı serpme ağı: Sığ sularda kullanılabildikleri gibi derin sularda da kullanılabilmektedirler. Serpme ağı atıldıktan sonra çarmık ipleri çekilmekte ve ağın kurşun yakası yukarı doğru kıvrılmaktadır. Kapalı bir torba haline gelen ağda balıklar kaçamamaktadır.

Cepli serpme ağı: Çoğunlukla derelerde ne nehir kenarlarında kullanılmaktadır. Ağ atıldıktan sonra balıklar o sahadan uzaklaşmak isterken kurşun yakanın yanındaki ceplere girmekte ve çıkamamaktadırlar.

Büzmeli serpme ağı: Bu ağlar derin sularda da kullanılabilmektedirler. Ağ atıldıktan sonra bir süre zemine doğru inmesi beklenmekte ve daha sonra büzme ipi çekilmektedir. Kurşun yakadaki mapalardan geçmiş olan büzme ipi ağın ağzını tamamen kapatarak balıkların kaçmasını engellemektedir.

14. GALSAMA AĞLARI

14.1. Dip Ağları (Kesme Ağları)

14.2. Yüzey Ağları (Pelagial Ağlar)

14.3. Çevirme Galsama Ağları

Bu bölüme giren ağlar aynı zamanda “sade ağlar” olarak da tanımlanmaktadır. Bazı literatürlerde “uzatma ağları” olarak da ifade edilebilmektedir. Dünya genelinde hem iç sularda hem de denizlerde en yaygın

olarak kullanılan balık yakalama aletlerindendir. Av, tek kat ve ince materyalden yapıldıkları için az görünen ağda, balığın bir gözden geçmek isterken başını geçirmesi, fakat vücudunu geçirememesi, geri çıkmak istediğinde ise galsamalarından (solungaçlarından) ağa takılması sonucu yapılmaktadır. Balığın ağa takılabilmesi için ağ gözünün balık başından büyük, gövdesinden küçük olması gerekmektedir. Bu sebeple galsama ağlarının selektiviteleri (seçicilikleri) çok yüksektir. Belirli göze büyüklüğündeki ağlar belirli büyüklükteki balıkları optimum düzeyde yakalarlar. Bu büyüklükten uzaklaştıkça balığın yakalanma olasılığı düşer.

Galsama ağlarında mantar ve kurşun yaka olarak çoğunlukla 3-6 mm kalınlığında polipropilen halatlar kullanılır. Bu yakalara yüzdürücüler ve batırıcılar geçirilerek donam yapılır. Galsama ağlarında donam çok önemlidir. Avlanılacak balığın türüne göre donam faktörü (E) seçilmektedir. Donam faktörü, yaka uzunluğunun ağ uzunluğuna oranıdır. Teorik olarak donam faktörü 0 ile 1 arasında olabilmekte ancak, uygulamada 0,30 ile 0,70 arasında değişmektedir.

Galsama ağları ile avcılıkta, ağlar akşamüstü güneş batmadan hemen önce suya serilmekte, bir gün sonra gündüz vakti toplanmaktadır. Gece ağın görünürlülüğü düşük olduğundan balıkların ağa takılma olasılıkları daha yüksektir. Bu ağlar zemine, yüzeye veya pelagiale kurulabilmektedirler.

15. DOLANAN AĞLAR

Bu aletlerde kimi zaman uzatma ağları içerisinde değerlendirilmektedir. Bir, iki veya üç kat ağdan oluşabilen bu aletlerin avlama prensipleri galsama ağlarından farklıdır. Av, balığın ağa dolanması, sarılması veya ağda oluşan ve “babulya” ismi verilen torbanın içinde kalması ile olmaktadır. Aletler genellikle zemin üzerinde durağandır. Ancak, yüzeyden derine doğru sarkan ve akıntılarla sürüklenen tipleri de vardır.

15.1. Tek Kat Dolanan Ağlar

15.2. Fanyalı Ağlar

15.2.1. Uskurçula

15.2.2. Tifana (Difana)

15.2.2.1. Bir Boy Ağlar

15.2.2.2. Alamana

Tek kat dolanan ağların görünüşleri galsama ağları gibidir. Ancak bu ağların donam faktörleri çok düşük, dolayısıyla potu fazla olmaktadır. Balık bir gözeyeye takılmamakta, çok sayıda gözeyeye dolanmakta ve sarılmaktadır.

İki kat halinde kullanılan ağlara “uskuçula” denmektedir. Bu ağlarda bir tarafta küçük gözlü tor ağı, diğer tarafta ise daha büyük gözlü fanya ağı bulunmaktadır. Ağın boy seçiciliği tor göz büyüklüğü ile fanya göz büyüklüğü arasındadır. Bu aletlerle tor tarafından gelen balıkların avlanması hedeflenmektedir. Balık tor ağını kafalayarak fanya gözesinden geçmekte ve ağda oluşan babulya ismi verilen torbada kalmaktadır.

Üç kat halinde kullanılanlara ise “tifana” denmektedir. Bu ağlarda ortada tor ağı her iki tarafında büyük gözlü fanya ağları vardır. Her iki yönden gelen balıkların avlanması hedeflenir. Balık birinci fanya gözesinden geçer, tor ağını kafalayarak ikinci fanya gözesinden de geçer ve oluşan babulyada kalır. Bu ağlar ile avlanan balığın tor gözesinden geçemeyecek kadar büyük, fanya gözesinden geçebilecek kadar küçük olması gerekmektedir.

16. TOPLAMA MAKİNELERİ

Diğer balıkçılık düzenlemelerinin tamamen dışına çıkan bir uygulamadır. Daha çok midyenin çok yoğun olduğu alanlarda midye toplamada kullanılırlar. Sudaki objelerin gemiye veya karaya pompalanması esasına dayanır.

AÇIKLAMA

Bu çalışma “Kaynaklar” kısmında yer alan bilimsel eserlerden derlenerek hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Çelikkale, M.S., Düzgüneş, E., Candeğer, F., 1993. Av Araçları ve Avlama Teknolojisi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Yayınları, Trabzon, 541 s.
- FAO, 1972. Catalogue of Fishing Gear Designs. Rome: Fishing News books Ltd.
- FAO, 2014. Report of the 24th session of the Coordinating Working Party on Fishery. Rome: FAO Fisheries and Aquaculture Report.
- Hoşsucu, H., 1998. Balıkçılık I (Avlama Araçları ve Teknolojisi). Ege Üniversitesi Basımevi, Bornova/İzmir, 247 s.
- Megep, 2012. Denizcilik, Tuzaklarla Avcılık, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, Ankara, 46 s.
- Mengi, T., 1996. Fırat Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi “Av Araçları ve Avlanma Yöntemleri” Lisans Ders Notları, Elazığ.
- Mengi T., 1977. Balıkçılık Tekniği. Met/Er Matbaası, İstanbul, 286 s.
- Von Brandt, A., 1984. Fish Catching Methods of the World. Printed in Great Britain by Avon Litho Ltd., Farnham/England, 418 s.
- Tokaç, A., 2011. Ağ Yapım ve Donam Tekniği, Balıkçılık II. Ege Üniversitesi Basımevi, Bornova/İzmir, 321 s.
- Tokaç, A., 2021. Mühendislik Bilimleri Yenilikçi Yaklaşımlar (Balıkçılık Av Araç ve Gereçlerinin Sınıflandırılması). Livre de Lyon, Editör:Oduncuoğlu Murat, Basım sayısı:1, Sayfa sayısı:132, 1-14.

Bölüm 7

İNFEKSİYÖZ PANKREATİK NEKROZİS VİRÜSÜ (IPNV): ETİYOLOJİ, EPİZOOTİYOLOJİ, PATOGENEZ VE AKUAKÜLTÜRDE HASTALIK YÖNETİMİNE KAPSAMLI BİR BAKIŞ

Şeydanur KAN¹

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Yetiştiriciliği Bölümü, Isparta-TÜRKİYE

seydanurmutlu@isparta.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-0869-3628>

1. Giriş

Su ürünleri yetiştiriciliğinin giderek artış göstermesi hastalık risklerini artırmaktadır. Viral balık hastalıkları tedavisinin olmaması nedeniyle su ürünleri yetiştiriciliği için büyük bir risk arz etmektedir. Özellikle yavru salmonidlerde büyük mortalitelerle seyreden enfeksiyöz pankreatik nekrozis (IPN), ticari su ürünleri üretiminin sürdürülebilirliği açısından kritik bir hastalıktır. Etken olan IPNV, yüksek çevresel stabilitesi, geniş konak aralığı ve hem horizontal hem de vertikal bulaşma kapasitesi nedeniyle kontrolü güç bir viral patojendir. Ayrıca enfeksiyonun akut, subakut ve latent formlarda seyredebiliyor olması, yetiştiricilik sistemleri için uzun süreli risk oluşturmaktadır.

Bu bölüm, IPNV'yi hem klasik hem de modern bilimsel bakış açılarıyla ele almak amacıyla hazırlanmıştır. Moleküler biyolojiden saha yönetimine kadar geniş bir çerçeve sunularak, akuakültür uygulayıcılarına, araştırmacılara ve öğrencilere kapsamlı bir referans kaynağı oluşturulması hedeflenmiştir.

2.1. IPNV'nin Tarihçesi

IPNV'nin varlığına ilişkin ilk kayıt 1940 yılında McGonigle tarafından “akut kataral enterit” olarak bildirilmiştir (McGonigle, 1941). Bunu izleyen dönemde Wood ve arkadaşları (1955), hastalığın enfeksiyöz karakterini ve özellikle pankreas dokusunda oluşturduğu belirgin hasarı dikkate alarak hastalığı “İnfeksiyöz Pankreatik Nekrozis” olarak tanımlamıştır. Etkenin bir virüs olduğuna dair kesin kanıt ise, hastalığın tanımlanmasından yaklaşık yirmi yıl sonra Wolf ve arkadaşları tarafından elde edilmiş; 1960 yılında gerçekleştirilen izolasyon çalışmaları sonucunda IPN virüsünün hücre kültüründe başarıyla üretilmesiyle etkenin viral yapısı doğrulanmıştır (Wolf vd., 1960). Bu bulgu, IPNV'yi hücre kültüründe izole edilerek tanımlanan ilk balık virüsü konumuna getirmiştir.

İlerleyen yıllarda su ürünleri yetiştiriciliğinin hızla gelişmesi, ulusal ve uluslararası balık ve yumurta transferlerinin artmasıyla birlikte virüsün yayılımı kolaylaşmış ve enfeksiyon birçok bölgede daha sık rapor edilmeye başlanmıştır. Günümüze kadar yapılan araştırmalar, IPNV'nin geniş bir balık türü yelpazesinde enfeksiyon oluşturabildiğini ortaya koymuştur. Türkiye’de ise virüsün varlığı ilk kez 1993 yılında Timur ve arkadaşları tarafından histopatolojik incelemeler ve elektron mikroskopisi ile doğrulanmıştır (Timur vd., 1993). Sonrasında ülkemizde farklı araştırma grupları değişik tanı yöntemleri kullanarak IPNV enfeksiyonlarını rapor etmeye devam etmiş; virüsün varlığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Candan, 2002; Tamer vd., 2021; Kan ve Kubilay, 2025).

2.2. Etiyolojisi

Birnaviridae familyası; kuşlarda enfeksiyona neden olan Avibirnavirus, balıkları enfekte eden Aquabirnavirus ve böceklerde hastalık oluşturan Entomobirnavirus cinslerini içermektedir. İnfeksiyöz Pankreatik Nekrozis Virüsü (IPNV), bu familya içerisinde Aquabirnavirus cinsinin bir üyesi olarak sınıflandırılmaktadır. Uluslararası Virüs Taksonomisi Komitesi (*International Committee on Taxonomy of Viruses*, ICTV), IPNV'yi ortalama yaklaşık 65 nm çapında, zarfsız ve ikosahedral morfolojiye sahip bir virüs olarak tanımlamaktadır (Delmas vd., 2019). Bununla birlikte farklı araştırmacıların bildirdiği ölçümlerde değişkenlik söz konusudur; örneğin Munro ve Midtlyng (2011) virüs çapını 60 nm olarak bildirirken, Dobos ve Roberts (1983) 57–74 nm aralığında değişen bir boyut bildirmiştir. Lago ve arkadaşları (2016) tarafından yapılan saflaştırılmış partikül analizlerinde ise IPNV'nin 55–90 nm arasında bir boyut gösterebildiği, en sık rastlanan çapın ise yaklaşık 70 nm olduğu rapor edilmiştir.

IPNV genomu, A ve B segmentleri olarak adlandırılan iki adet çift sarmallı RNA (dsRNA) fragmanından oluşmaktadır (Rodríguez vd., 2003). Segment A, yaklaşık 2962–3097 bp uzunluğunda olup iki açık okuma çerçevesi (ORF) içermektedir (Munro ve Midtlyng, 2011). Bu segment; yapısal proteinler VP2 ve VP3 ile yapısal olmayan proteinler VP4 ve VP5'i kodlamaktadır (Dobos, 1995; Durmaz, 2018). Segment B ise yaklaşık 2400 bp uzunluğunda olup, RNA-bağımlı RNA polimeraz görevi gören VP1 proteinini kodlayan tek bir ORF içerir. VP1 proteininin, her iki genom segmentinin 5' uçlarına kovalent bağlı şekilde bulunduğu gösterilmiştir (Ji vd., 2017).

IPNV, geniş bir antijenik ve genotipik çeşitliliğe sahip olması nedeniyle küresel ölçekte yaygın bir patojen olarak kabul edilmektedir. Hem yabani hem de yetiştiriciliği yapılan salmonid türlerinde farklı suşların varlığı rapor edilmiştir. Virüsün moleküler ağırlığının 55×10^6 Da olduğu, protein/RNA oranının yaklaşık 91/9 düzeyinde bulunduğu, CsCl çözeltisinde 1.33 g/ml kaldırma yoğunluğu sergilediği ve 435 S sedimentasyon katsayısına sahip olduğu bildirilmiştir (Tufiño-Loza vd., 2020).

IPNV'nin en dikkat çekici özelliklerinden biri fizikokimyasal koşullara karşı belirgin direnç göstermesidir. Wolf, (2019) ve Munro ve Midtlyng (2011) tarafından yapılan çalışmalarda, virüsün düşük pH değerlerinde stabilitesini koruyabildiği ve %0–40 aralığındaki tuzluluk seviyelerine tolerans gösterebildiği belirtilmektedir. Ayrıca IPNV'nin 4–27.5 °C sıcaklık aralığında çoğalma yeteneğini sürdürdüğü; 60 °C'ye kadar olan sıcaklıklara ise 30 dakikaya varan sürelerle dayanıklılık gösterebildiği ortaya konmuştur (Dopazo, 2020).

2.3. Epizootiyoloji

İnfeksiyöz pankreatik nekrozis virüsü (IPNV), salmonid yetiştiriciliğinde ekonomik açıdan en önemli viral etkenlerden biri olup, epizootiyolojik özellikleri hastalığın yayılımını ve sürülerdeki klinik seyri önemli ölçüde belirlemektedir. Virüsün güçlü çevresel dayanıklılığı, geniş konak aralığı ve hem horizontal hem de vertikal bulaşma kapasitesi, epizootiyolojik açıdan kompleks ve çok faktörlü bir yayılım modeli oluşturur. Bu nedenle IPNV, endüstriyel su ürünleri yetiştiriciliğinde kontrolü en güç viral patojenlerden biri olarak değerlendirilmektedir. IPN enfeksiyonunun şiddeti ve kümülatif ölümler; konakçı, virüs ve çevre ile ilgili birden fazla faktörün kombinasyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Dorson ve Torchy, 1981).

Epizootiyolojik açıdan en duyarlı türler başta Atlantik salmonu (*Salmo salar*) ve gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) olmakla birlikte, IPNV birçok salmonid ve nonsalmonid türü de enfekte edebilir. *Salvelinus alpinus*, *O. sutch*, *O. masu ishikawai*, *Hucho taimen*, *O. masou*, *Salvelinus leucomaenis*, *S. trutta L.* (Duan vd., 2021), *Reinhardtius hippoglossoides* (Romero-Brey vd., 2009), *Esox lucius L.* (Blake vd., 2001), *Scophthalmus maximus* (Cutrin vd., 2004), *Gadus morhua* (Romero-Brey vd., 2009), *Sebastes mentella* (Romero-Brey vd., 2009), *Carassius auratus* (Duan vd., 2021) türlerinde virüsün varlığı doğrulanmıştır. Bu geniş konak aralığı, virüsün doğada uzun süre dolaşımında kalmasına ve ekolojik rezervuarlar oluşturmaya olanak tanır. Çoğu türde enfeksiyon subklinik seyredebilse de salmonid yavrularında mortalite oranları oldukça yüksektir. IPNV enfeksiyonunun şiddeti, balığın yaşı, gelişim evresi ve fizyolojik durumuyla yakından ilişkilidir. Özellikle:

- Spontan beslenmeye yeni başlayan larvalar
- Parr ve smolt öncesi dönemler

virüse en hassas aşamalardır. Bu duyarlılık, bağışıklık sisteminin henüz tam olgunlaşmamış olması ve stres faktörlerine yüksek tepki verilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Daha ileri yaş gruplarında enfeksiyon çoğunlukla latent hâlde seyreder ve balık yaşamı boyunca taşıyıcı olabilir. Frantsi ve Savan (1971), dere alabalıklarında gerçekleştirdikleri deneysel enfeksiyon çalışmalarında, 60 günlük gözlem sürecinde sırasıyla 1 aylık balıklarda %85, 2 aylıklarda %73, 3 aylıklarda %45 ve 6 aylık balıklarda ise ihmal edilebilir düzeyde mortalite bildirmiştir. Gökkuşağı alabalığının yürütülen benzer bir çalışmada Dorson ve Torchy (1981), 1–2 haftalık yavrularda kümülatif mortalitenin %70'e ulaştığını, 20 haftalık bireylerde ise oldukça düşük bir düzeyde gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu nedenle 5–6 aydan büyük balıkların enfeksiyona karşı belirgin bir direnç geliş-

tirdiği ve asemptomatik taşıyıcı konuma gelerek virüsü dışkı, sperm ve yumurta yoluyla çevreye saçabildiği kabul edilmektedir (Wolf et al., 1963; Ghittino et al., 1984).

Virus horizontal ve vertikal bulaşma yolları ile yayılım gösterebilir. Horizontal bulaşma epizootiyolojik sürecin en etkili bileşenlerinden biridir. Virüs:

- enfekte balıkların dışkıları,
- mukus,
- ölen balık dokuları,
- kontamine ekipmanlar,
- personel hareketleri,
- havuzlar arası su akışı

aracılığıyla hızla yayılabilir. Yüksek stok yoğunluğu ve yetersiz su kalitesi bulaşmayı hızlandırır.

Vertikal bulaşma ise, IPNV epizootiyolojisini benzersiz kılan temel faktörlerden biridir. Enfekte dişi balıkların ovaryum sıvısı veya yumurta yüzeyi virüsle kontamine olabilir. Bu durum, enfekte olmayan pazar balıklarında bile damızlık kaynaklı enfeksiyonlara yol açabilir. Yumurtaların uluslararası ticareti, virüsün küresel yayılımını kolaylaştıran başlıca mekanizmadır. Bunların yanı sıra kuşlar, kabuklular, bazı planktonik organizmalar ve omurgasızlar virüsü mekanik olarak taşıyabilir. Doğal göller veya nehir sistemleriyle bağlantılı işletmelerde bu vektör kaynaklı bulaş riski daha yüksektir (Munro ve Midtlyng, 2011).

Enfeksiyonun yayılım dinamikleri açısından virüsün genetik yapısı kritik bir role sahiptir. VP2 proteininde yer alan bazı moleküler belirteçlerin, özellikle genogrup 1 (Bruslind ve Reno, 2000) ve genogrup 5 (Santi vd., 2004; Shivappa vd., 2004) izolatlarında yüksek virülansla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Avrupa'daki salmonid yetiştiriciliğinde bildirilen IPNV salgınlarının çoğu genogrup 5 (serotip Sp) kaynaklı izolatlarla ilişkilendirilmiştir (Melby ve Christie, 1994; Bain vd., 2008; Ruane vd., 2009). Gökkuşağı alabalığında genogrup 5'in genogrup 2'ye (serotip Ab) kıyasla daha yüksek virülans gösterdiği genel olarak kabul edilmektedir (Novoa vd., 1995).

Virülansı belirleyen faktörler yalnızca genogrup düzeyiyle sınırlı olmayıp aynı genogrup içindeki suşlar arasında da büyük farklılıklar görülebilmektedir. Hem yüksek hem de düşük virülans profiline sahip izo-

latların varlığı uzun süredir bilinmektedir (Santi vd., 2004). Ayrıca uzak akraba suşların benzer patolojilere yol açabildiği, buna karşılık genetik olarak birbirine yakın suşların avirulentten yüksek virülenta kadar geniş bir patojenite spektrumuna sahip olabildiği bildirilmiştir (Eriksson-Kallio, 2022).

Akuabirnavirüslerin geniş sıcaklık, pH ve tuzluluk aralığında stabil kalabilme yetenekleri, IPNV'nin farklı çevresel koşullarda ve çeşitli rezervuar türlerinde uzun süre varlığını sürdürebilmesine olanak tanımaktadır (Dopazo, 2020). Geniş bir sıcaklık, tuzluluk ve pH aralığında hayatta kalabilen virüs, kötü su kalitesi, ani sıcaklık değişimleri, yüksek stok yoğunluğu, mekanik manipülasyon ve düşük oksijen seviyeleri gibi koşullar nedeniyle strese giren balıklarda enfeksiyona daha kolay yol açmaktadır (Li et al., 2022). Balıkların stres yanıtı, hem viral replikasyona uygun bir ortam oluşturmakta hem de immün baskılanma nedeniyle enfeksiyonun şiddetlenmesini kolaylaştırmaktadır.

Su sıcaklığı, IPNV enfeksiyonlarının ortaya çıkışı ve seyri üzerinde belirleyici bir faktördür. Enfeksiyon genellikle 15 °C'nin altındaki sıcaklıklarda görülmekte ve klinik bulgular daha belirgin hale gelmektedir. Dere alabalığı yavrularında yapılan bir çalışmada 10 °C'de %74, 15.5 °C'de %46 kümülatif mortalite kaydedilmiş, 4.5 °C'de ise mortalite gözlenmemiştir. Dorson ve Torchy (1985), gökkuşağı alabalığında 6 °C'de mortalitenin 10 °C'ye göre çok daha düşük olduğunu, 16 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise enfeksiyonun büyük ölçüde baskılandığını bildirmiştir. Bu durum, enfeksiyonun tatlısu kuluçkahanelerinde düşük sıcaklık dönemlerinde aktive olduğunu, daha yüksek sıcaklıklarda ise genellikle latent bir formda seyrettiğini göstermektedir. Dopazo (2020) tarafından sunulan farklı tür ve sıcaklık aralıklarını içeren derleme de bu eğilimi desteklemekte olup, IPNV patogenezi ve klinik görünümünün özellikle 15 °C'nin altındaki sıcaklıklarda belirginleştiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, Kenya'da yapılan bir çalışmada IPNV virülansının bazı durumlarda 18 °C'ye kadar devam edebildiği bildirilmiştir (Mulei vd., 2018).

2.4. Patogenezis

İnfeksiyöz Pankreatik Nekrozis Virüsü (IPNV), enfeksiyonun seyrini belirleyen çok yönlü bir patogenezi mekanizmasına sahiptir. Virüsün konağa girişinden başlayan süreç, hücrel çoğalma dinamikleri, immün yanıtın şekillenmesi ve doku tahribatı ile karakterize kompleks bir biyolojik ilerleyiştir.

IPNV'nin patogenezi, çoğunlukla portantre yoluyla gerçekleşen viral giriş ile başlar. Horizontal bulaşmada virüs solungaçlardan, bağırsak epitelinden ve/veya derinin belirli bölgelerinden çevredeki su yoluyla girmektedir (Munro ve Midtlyng, 2011). Birkaç gün içinde virüs çeşitli dokularda tespit edilir ve dolaşımdaki lökositlerde tespit edildiği için, viremi aşamasında virüsün kandaki varlığının, IPNV'nin böbrek, dalak, pankreas, karaciğer, kalp ve beyin yanı sıra deri, bağırsak ve üreme hücreleri dahil olmak üzere balık dokularının çoğuna hızlı bir şekilde dağılmasının arkasındaki neden olmaktadır. Bu bağlamda, maksimum replikasyona ön böbrekte ve akut enfeksiyon sırasında bağırsak ve pankreasta ulaşıldığı konusunda bir fikir birliği olmasına rağmen, bazı durumlarda virüs pankreas dışındaki organlarda da tespit edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda spermden (Ahmadivand vd., 2020) ve yumurta sıvısından (Bootland vd., 1991; Smail ve Munro, 2008) asemptomatik salmonid balıklardan izole edilmiştir.

Virüs hücre içine girdikten sonra, RNA segmentlerinin transkripsiyon ve translasyonu gerçekleşir ve kısa sürede büyük miktarda viral protein ve yeni virionlar oluşturulur. IPNV'nin yüksek replikasyon hızı, hücre içi mekanizmaların baskılanmasına, metabolik stresin artmasına ve sonuç olarak hücre nekrozu veya apoptozuna yol açar. Bu hücre ölüm süreci, enfeksiyonun klinik belirtileri ve doku hasarının temel nedenidir.

Virüsün sistemik yayılımı, genellikle kan dolaşımına giriş ile devam eder. Bu evrede virüs, özellikle pankreas, karaciğer, böbrek ve bağırsak gibi metabolik açıdan aktif organlarda yoğun olarak çoğalır. En karakteristik lezyonlardan biri, pankreas dokusundaki ekzokrin hücrelerin masif nekrozu olup hastalığa adını veren patolojik tablonun temelini oluşturur. Aynı zamanda anterior böbrek ve karaciğer dokusunda dejenerasyon, vakuolizasyon ve nekroz gibi yaygın histopatolojik değişiklikler görülür.

Konak immün yanıtı, enfeksiyonun seyrinde belirleyici bir role sahiptir. Akut evrede innate bağışıklık yanıtı devreye girer; ancak erken yaşlardaki salmonid balıklarda immün sistemin tam gelişmemiş olması, virüsün hızlı ilerlemesine katkı sağlar. Özellikle 4–6 haftalıktan küçük yavrular, yetersiz antiviral yanıt nedeniyle yüksek mortalite göstermektedir. Buna karşın, daha ileri yaşlardaki balıklarda enfeksiyon subklinik seyredebilir ve bu balıklar virüsü taşıyarak popülasyon içinde persistan enfeksiyon kaynakları haline gelebilir.

Kronik enfeksiyon olgularında virüs, böbrek ve karaciğer gibi organlarda düşük düzeyde varlığını sürdürebilir. Persistan virüs taşıyıcısı balıklar, özellikle stres koşulları (yoğun stoklama, sıcaklık değişiklikleri, transport) altında virüsü yeniden saçabilir. Bu durum, IPNV'nin hem ho-

rizantal hem de vertikal bulaşma yollarıyla populasyonlar arasında uzun süre varlığını sürdüren bir patojen olmasına katkıda bulunur. Enfeksiyondan kurtulan yetişkin balıklar ömür boyu viral taşıyıcı olarak görev yapmaktadır. Bu balıklar virüsü dışkılarında sperm ve yumurtalarında bulunan viral partikülleri yavrularına ve diğer duyarlı türlere bulaştırmaktadır (McAllister vd., 1993). IPNV enfeksiyonundan sağ kurtulan balıklardaki kalıcı taşıyıcıların oranının yüksek olduğu kabul edilmektedir (Evensen ve Santi, 2008) ve bunlar, hastalığın horizontal bulaşmasının önemli bir kaynağıdır (Evensen ve Santi, 2008). Bununla birlikte, saha gözlemleri ve diğer faktörler tamamen bilinmemesine rağmen bağışıklık sisteminin zaman zaman IPNV enfeksiyonunu temizleyebildiği de bildirilmiştir (Munro ve Midtlyng, 2011).

Sonuç olarak, IPNV'nin patogenezi; viral giriş, hızlı hücresel replikasyon, sistemik yayılım, hedef organlarda belirgin nekrotik hasar oluşumu ve konağın immün yanıtının şekillendirdiği karmaşık bir süreçtir. Yaşamın erken dönemlerinde yüksek mortalite ile seyreden bu enfeksiyon, ilerleyen yaşlarda subklinik seyre dönebilir ve populasyonlarda uzun süreli viral varlığın korunmasına neden olabilir.

2.5. Klinik belirtiler

İnfeksiyöz Pankreatik Nekrozis (IPN), özellikle genç salmonidlerde yüksek morbidite ve mortalite ile seyreden, akut formda belirgin klinik bulgularla kendini gösteren önemli bir viral hastalıktır. Hastalığın klinik tablosu; balığın yaşı, virüsün genogrubu ve suş özellikleri, çevresel koşullar ve konak bağışıklık düzeyi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle su sıcaklığının 15 °C'nin altında olduğu dönemlerde klinik belirtiler daha belirgin hale gelmekte ve ölüm oranları artış göstermektedir. IPNV enfeksiyonunun erken dönemlerinde balıklarda genellikle letarji, iştahsızlık ve yüzmeye aktivitelerinde belirgin azalma gözlemlenir. Enfeksiyonun ilerlemesiyle birlikte aşağıdaki karakteristik davranışlar ortaya çıkar:

- **Anormal yüzmeye:** Enfekte balıklar genellikle dengesiz ve koordinasyonsuz bir şekilde yüzmeye başlar. Suyun yüzeyine doğru yönelme, ani spiraller çizme veya tank tabanına çökme gibi davranışlar tipiktir.
- **Koma benzeri durum:** Hastalığın ileri evrelerinde balıkların tank köşelerinde hareketsiz bir şekilde beklediği ve uyarana yanıt vermediği görülür.
- **Sürü bütünlüğünün bozulması:** Sağlıklı sürü yapısı bozulur, yavrular bir arada değil dağınık durur.

Bu davranışsal değişiklikler, hem merkezi sinir sistemi etkilenimine hem de pankreatik yetmezliğe bağlı metabolik bozukluklarla ilişkilendirilmektedir. Enfeksiyonunun karakteristik dış bulguları özellikle akut formda belirgin hale gelmektedir. Başlıca semptomlar (Eriksson-Kallio, 2022; Kan ve Kubilay., 2025):

- **Koyu pigmentasyon:** Enfekte balıklar normalden daha koyu renge bürünür, bu bulgu genellikle IPN'nin en erken ve en kolay fark edilen belirtilerindendir.
- **Karında şişkinlik (abdominal distansiyon)**
- **Ekzoftalmus**
- **Deride hemorajiler:** Baş bölgesi, abdominal yüzey ve yüzgeç tabanlarında peteşi ve ekimozlar görülebilir.
- **Kuyruk ve yüzgeçlerde erozyon ve incelme meydana gelir.**
- **Mukus artışı:** Vücut yüzeyinde belirgin bir mukus tabakası izlenebilir.
- **Anoreksiya:** Vücut bölgesinin zayıflamasıyla birlikte kafa vücuda göre daha büyük görünür.
- **Solungaçta anemi**
- **Anüsten uzayan dışkı**
- **Pilorik sekada peteşiyal kanamalar**
- **IPNV ile enfekte dokularda inklüzyon cisimcileri**

Bu bulgular, su sıcaklığı, balığın fizyolojik durumu, balığın yaşı, türü, virüsün sistemik etkisi ve eşlik eden sekonder enfeksiyonlara bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

2.6. IPNV enfeksiyonun Teşhisi

Su ürünleri yetiştiriciliğinde görülen viral enfeksiyonlar, özellikle de IPNV kaynaklı salgınlar, yüksek mortalite oranları ve ekonomik kayıplar nedeniyle sektör için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle hastalığın erken ve doğru şekilde teşhis edilmesi, hem enfeksiyonun kontrol altına alınması hem de işletmelerde hastalıktan arı üretimin sürdürülebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yumurta, yavru ve anaç materyalin hareketi sırasında sağlık taramalarının yapılması, virüsün işletmeler arasında taşınmasını engellemek için zorunlu bir biyogüvenlik uygulaması haline gelmiştir.

IPNV'nin laboratuvar tanısında çok çeşitli yöntemler kullanılmakla birlikte, hücre kültüründe virüs izolasyonu uzun yıllar boyunca "altın standart" olarak kabul edilmiştir (Wolf, 2019 Munro ve Midtlyng, 2011). CHSE-214, BF-2, RTG-2 gibi duyarlı hücre hatlarında sitopatik etki (Cytopathic effect, CPE) gözlenmesi, virüsün varlığına dair doğrudan kanıt sağlamaktadır. Ancak kültürde izolasyon sürecinin 10-14 gün kadar uzun sürmesi ve düşük viral yük içeren örneklerde başarının düşük olması yöntemin önemli bir dezavantajıdır. Bu sınırlılıklar nedeniyle günümüzde moleküler teknikler, özellikle polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) temelli yöntemler, IPNV tanısında yaygın olarak kullanılmaktadır. PCR, hem yüksek duyarlılığı hem de hız avantajı sayesinde hücre kültürüne göre çok daha kısa sürede sonuç vermekte; ayrıca hücre kültürü ile tespit edilemeyecek düzeyde düşük viral konsantrasyonları da doğru şekilde belirleyebilmektedir (Dopazo ve Barja, 2002). Real-time PCR teknikleri ise hem kantitatif ölçüm yapabilmesi hem de kontaminasyon riskinin düşük olması nedeniyle modern tanı laboratuvarlarında standart hale gelmiştir. Virüsün protein yapılarının belirlenmesine yönelik immünoagnostik yöntemler de tanıda tamamlayıcı olarak kullanılmaktadır. Nötralizasyon testi, immunofloresans ve immunoperoksidaz teknikleri, counterimmunoelektroforez, koagülünasyon ve ELISA gibi yöntemler antijen-antikor etkileşimi prensibine dayanmakta ve özellikle tarama çalışmalarında pratiklik sağlamaktadır (Kan ve Kubilay, 2025).

Bu yöntemler, hızlı ön tanı sağlama açısından değerli olmakla birlikte duyarlılıkları örnek tipine ve antijen yoğunluğuna bağlı olarak değişebilmektedir. Tanısal süreçte ayrıca histopatolojik incelemeler de önemlidir. Özellikle genç balıklarda pankreas, karaciğer ve bağırsak epiteli gibi hedef dokularda görülen nekroz, dejenerasyon ve tipik morfolojik değişiklikler IPNV enfeksiyonunu destekleyici kanıtlar sunmaktadır. Histopatoloji tek başına kesin tanı koydurmasa da, virolojik ve moleküler testlerle birlikte değerlendirildiğinde enfeksiyonun şiddetinin ve ilerleyişinin belirlenmesinde değerli bilgiler sağlar (Kan ve Kubilay, 2025).

2.7. Koruma, Kontrol ve Yönetim Stratejileri

İnfeksiyöz Pankreatik Nekrozis Virüsü (IPNV), özellikle yavru ve genç balıklar üzerinde yüksek mortaliteye neden olması nedeniyle akuakültür endüstrisinde ciddi ekonomik kayıplara yol açan önemli bir viral patojendir. Hastalığın herhangi bir spesifik tedavisinin bulunmaması, IPNV ile mücadelede koruma ve kontrol stratejilerinin merkezi bir rol üstlenmesine neden olmaktadır. Etkili bir hastalık yönetimi, biyogüvenlik uygulamaları, çevresel koşulların optimize edilmesi, genetik dayanıklılık programları ve aşılama gibi çok yönlü yaklaşımların bütüncül olarak uygulanmasını gerektirir.

IPNV'den korunmanın temelini biyogüvenlik önlemleri oluşturmaktadır. Virüs hem horizontal hem de vertikal yolla bulaşabilen yapısı nedeniyle işletmeden işletmeye hızla yayılabilmektedir. Bu nedenle damızlık balıkların düzenli olarak taranması, yumurtaların dezenfeksiyonu, giriş suyu kaynaklarının kontrolü, kullanılan ekipmanın hijyeninin sağlanması, taşıma kapları ve ağların düzenli dezenfekte edilmesi bulaşma riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle IPNV'nin çevresel koşullara yüksek direnç gösterdiği düşünüldüğünde, dezenfektan seçimi ve konsantrasyonunun doğru ayarlanması kritik önem taşımaktadır. İşletmelere yeni balık materyali alınırken karantina uygulanması; klinik belirti göstermeyen, ancak virüsü dışkı, sperm veya yumurta ile saçabilen taşıyıcı bireylerin üretim sistemine dahil edilmesini önlemektedir.

Biyogüvenlik uygulamalarının yanı sıra çevresel koşulların optimize edilmesi de hastalık yönetiminin temel bileşenlerindendir. Balıklarda stres, bağışıklık sisteminin baskılanmasına yol açarak IPNV enfeksiyonlarının ortaya çıkmasını kolaylaştırır. Bu nedenle su sıcaklığı, oksijen seviyesi, amonyak ve nitrit konsantrasyonu gibi temel su parametrelerinin sürekli izlenmesi ve optimal düzeylerde tutulması gerekmektedir. IPNV enfeksiyonunun özellikle 15 °C'nin altındaki sıcaklıklarda şiddetlendiği bilindiğinden, duyarlı dönemlerde su sıcaklığının kontrollü şekilde yönetilmesi mortalitenin azaltılmasına katkı sağlayabilir. Stok yoğunluğunun azaltılması, elle müdahalelerin minimize edilmesi ve besleme programlarının balıkların fizyolojik gereksinimlerine uygun şekilde düzenlenmesi stres kaynaklarının önüne geçilmesini destekler.

Hastalık kontrolünde giderek önem kazanan bir diğer unsur genetik dayanıklılık ve seleksiyon programlarıdır. IPNV'ye karşı dirençli hatların geliştirilmesi birçok ülkede yetiştiricilik programlarına entegre edilmiştir. Virülansı belirleyen VP2 gen bölgesine ait belirteçler sayesinde dayanıklılık ile ilişkili genotiplerin tanımlanması ve seleksiyon hatlarının oluşturulması, hastalığın uzun vadeli kontrolünde biyoteknolojik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu tür genetik iyileştirme çalışmaları, hem mortaliteyi önemli ölçüde düşürmekte hem de ilaç ve aşılama maliyetlerini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

IPNV ile mücadelede kullanılan yöntemlerden biri de aşılama. İnaktif, attenüe veya rekombinant aşılarla yönelik araştırmalar uzun yıllardır devam etmektedir. Aşı uygulamaları özellikle damızlık balıkların yumurta yoluyla virüs saçmasını engelleyerek vertikal bulaşmayı azaltmak açısından önem taşır. Bununla birlikte, IPNV'nin yüksek genetik çeşitliliği ve farklı genogrup suşlarının gösterdiği değişken virülans, aşılama çalışmalarını güçleştiren faktörler arasında yer almaktadır. Yine de bazı bölgelerde kullanılan yağ-adjuvantlı aşılar, klinik enfeksiyonların

görülme sıklığını azaltarak önemli faydalar sağlamaktadır. Türkiye’de halen IPN de dahil olmak üzere viral balık hastalıklarına yönelik ruhsatlı ticari balık aşıları bulunmamaktadır. Ticari aşıların mevcut olmamasına karşın, viral etkenlere karşı korunma amacıyla çeşitli deneysel aşı çalışmalarının yürütüldüğü ve bu çalışmaların sonuçlarının literatürde rapor edildiği görülmektedir. Nitekim Tamer ve arkadaşları (2021), IPNV’ye karşı rekombinant subunit bir aşı ile inaktive edilmiş bir aşının immunoprotektif etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş ve her iki aşının da balıklarda enfeksiyona karşı belirgin düzeyde koruma sağladığını bildirmiştir. Bu bulgular, ülkemizde IPNV kontrolüne yönelik aşı geliştirme çalışmalarının bilimsel açıdan umut verici bir yönde ilerlediğini göstermektedir.

Tüm bu stratejilere rağmen IPNV’nin tamamen eradike edilmesi mümkün olmadığı için, kontrol programlarının sürdürülebilir olması ve düzenli olarak güncellenmesi gerekmektedir. İşletme bazlı kayıt tutma, hastalık geçmişinin izlenmesi, ani mortalite durumlarında hızlı tanı testlerinin uygulanması ve sağlık yönetimi protokollerinin tüm personel tarafından eksiksiz uygulanması hastalığın kontrol altında tutulmasında belirleyici unsurlardır. Ayrıca ülkeler arası ve bölgesel düzeyde harmonize edilmiş hastalık izleme programları, enfeksiyonun yayılımının sınırlandırılmasına önemli katkı sağlar.

Sonuç olarak, IPNV ile mücadele tek bir yöntemle değil; biyogüvenlikten genetik seleksiyona, çevresel yönetimden aşılama çalışmalarına kadar geniş bir yelpazede bütüncül bir yaklaşım gerektirir. Hastalığın çok yönlü yapısı ve virüsün çevre koşullarına yüksek uyum kabiliyeti düşünüldüğünde, etkili bir kontrol stratejisinin uzun vadeli, disiplinler arası ve sürekli güncellenen bir yaklaşımla yürütülmesi gereklidir.

3. SONUÇ

İnfeksiyöz Pankreatik Nekrozis Virüsü (IPNV), özellikle salmonid türleri başta olmak üzere birçok tatlı su ve deniz balığı türünde önemli ekonomik kayıplara yol açan majör viral etkenlerden biridir. Su ürünleri sektöründe sürdürülebilir üretimin sağlanması, yalnızca yetiştiricilik tekniklerinin iyileştirilmesine değil, aynı zamanda enfeksiyöz hastalıkların etkin bir şekilde kontrol edilmesine bağlıdır. Bu bağlamda IPNV’nin biyolojisinin, patogenezin ve epizootiyolojisinin ayrıntılı şekilde anlaşılması, hastalıktan korunma ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Türkiye’de su ürünleri yetiştiriciliği, son yıllarda özellikle alabalık ve levrek gibi türlerde üretim kapasitesinin artmasıyla birlikte hızlı bir

büyüme göstermektedir. Ancak bu büyüme, viral hastalıkların neden olduğu kayıpların daha görünür hâle gelmesine yol açmaktadır. Ülkemizde IPN de dahil olmak üzere viral balık hastalıklarının önlenmesine yönelik ticari bir aşının hâlen bulunmaması, hastalık kontrolünün büyük ölçüde işletme bazlı biyogüvenlik uygulamalarına, su kalitesinin sürekli takibi-ne, stok yönetiminin optimize edilmesine ve riskli dönemlerde stres faktörlerinin azaltılmasına dayanmasına neden olmaktadır. Bu durum, ticari aşların bulunmadığı ülkelerde karşılaşılan yapısal bir problem olup, sektörün uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından önemli bir eksikliklerdir.

Bununla birlikte son yıllarda Türkiye’de viral balık hastalıklarına yönelik yapılan deneysel çalışmalar, yerli aşı geliştirme potansiyelinin giderek güçlendiğini göstermektedir. Tamer ve arkadaşlarının (2021) IPNV’ye karşı geliştirdiği rekombinant subunit ve inaktif aşı adaylarının başarılı sonuçlar vermesi, yerli aşı geliştirme çalışmalarının uygulanabilirliğine ve bilimsel alt yapının yeterliliğine işaret etmektedir. Bu tür çalışmalar, yalnızca IPN için değil, VHSV, IHNV, nodavirus ve KHV gibi diğer önemli viral etkenlere karşı da benzer yaklaşım ve teknolojilerin geliştirilebileceğini göstermektedir. Ancak bu deneysel modellerin ticari formülasyona dönüştürülmesi; üretim ölçeğinin artırılması, stabilite testleri, saha koşullarında geniş ölçekli denemeler, ruhsatlandırma süreçleri ve ulusal mevzuat gereklilikleri gibi çok boyutlu aşamaları içermektedir.

Gelecek dönemde IPN ve diğer viral balık hastalıklarıyla mücadelede önemli gelişmeler beklenmektedir. Öncelikle, hastalığın bulaşma yollarına ilişkin mevcut bilgilerin daha detaylı hâle getirilmesi gerekmektedir. IPNV’nin hem horizontal (yatay) hem de vertical (dikey) bulaşma yeteneğine sahip olması, hastalık kontrolünü zorlaştırmakta ve yumurta dezenfeksiyonu, anaç balıkların yönetimi ve yavru transfer süreçlerinin önemini artırmaktadır. Vertikal bulaşmanın moleküler temellerinin tam olarak anlaşılması, özellikle anaç yönetimi açısından kritik bilgiler sağlayacaktır. Bunun yanında horizontal bulaşmanın su kolonundaki stabilitesi, çevresel faktörlerle olan ilişkisi ve vektör olabilecek diğer akuatik canlıların rolü gibi konular hâlen araştırılmaya açıktır.

Tanısal açıdan bakıldığında, ileri moleküler yöntemlerin yaygınlaşması ile IPNV’nin erken teşhisi daha hızlı ve güvenilir hâle gelmiştir. Bununla birlikte, sahada uygulanabilir, maliyeti düşük ve hızlı sonuç veren yerinde ya da tesiste hızlı point-of-care testlerin geliştirilmesi geleceğin önemli araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Bu tür kitlerin yaygınlaşması, özellikle küçük ölçekli yetiştiricilik işletmelerinde hastalık yönetimini önemli ölçüde kolaylaştıracaktır.

Aşılama stratejilerinin geleceğinde ise klasik inaktif veya attenüe edilmiş aşılardan yanı sıra yeni nesil moleküler platformların giderek önem kazanması beklenmektedir. DNA ve mRNA temelli aşılardan rekombinant kapsid proteinlerinin nanopartiküller ile taşındığı formülasyonlar, viral vektör tabanlı aşılardan mukozal bağışıklığı hedefleyen oral veya immer-siyon aşılardan, su ürünleri sektöründe yeni araştırma eksenlerini oluşturmaktadır. Özellikle balıklarda mukozal bağışıklığın rolü ve immün modülasyon yollarının daha iyi anlaşılması, bu alandaki inovasyonları destekleyecektir.

Ek olarak, IPNV genomik çeşitliliğinin izlenmesi ve saha suşlarının filogenetik analizlerinin düzenli olarak yapılması, hem aşı tasarımı hem de bölgesel hastalık yönetiminde kritik öneme sahiptir. Viral evrimin yönünün belirlenmesi, daha dirençli suşların ortaya çıkışının izlenmesi ve potansiyel yeni genotiplerin erken belirlenmesi, koruma stratejilerinin etkinliğini artıracaktır.

Sonuç olarak IPNV, Türkiye su ürünleri sektörünün karşı karşıya olduğu önemli viral tehditlerden biridir. Etkin bir hastalık yönetimi için biyogüvenlik uygulamalarının güçlendirilmesi, tanı kapasitesinin artırılması ve yerli aşı geliştirme çalışmalarının desteklenmesi gerekmektedir. Su ürünleri sektörünün büyüklüğü, ihracat potansiyeli ve stratejik önemi göz önünde bulundurulduğunda, viral balık hastalıklarının kontrolü yalnızca ekonomik bir gereklilik değil, aynı zamanda ulusal düzeyde sürdürülebilir akuakültür politikalarının temel bileşenidir. Gelecek dönemde bilimsel araştırmaların hız kazanması, uluslararası işbirliklerinin artırılması ve yerli biyoteknolojik üretim kapasitesinin güçlendirilmesi ile IPN'nin etkisinin önemli ölçüde azaltılması mümkün görünmektedir.

KAYNAKÇA

- Ahmadivand, S., Weidmann, M., El-Matbouli, M., & Rahmati-Holasoo, H. (2020). Low pathogenic strain of infectious pancreatic necrosis virus (IPNV) associated with recent outbreaks in Iranian trout farms. *Pathogens*, 9(10), 782.
- Bain, N., Gregory, A., & Raynard, R. S. (2008). Genetic analysis of infectious pancreatic necrosis virus from Scotland. *Journal of Fish Diseases*, 31(1), 37-47. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2007.00864.x>
- Blake, S., Ma, J. Y., Caporale, D. A., Jairath, S., & Nicholson, B. L. (2001). Phylogenetic relationships of aquatic birnaviruses based on deduced amino acid sequences of genome segment A cDNA. *Diseases of Aquatic Organisms*, 45(2), 89-102.
- Bootland, L. M., Dobos, P., & Stevenson, R. M. (1991). The IPNV carrier state and demonstration of vertical transmission in experimentally infected brook trout. *Diseases of Aquatic Organisms*, 10(1), 13-21.
- Bruslind, L. D., & Reno, P. W. (2000). Virulence comparison of three Buhl-subtype isolates of infectious pancreatic necrosis virus in brook trout fry. *Journal of Aquatic Animal Health*, 12(4), 301-315.
- Candan, A. (2002). First report on the diagnosis of infectious pancreatic necrosis (IPN) based on reverse transcription polymerase chain reaction (RT-PCR) in Turkey. *Bulletin-European Association of Fish Pathologists*, 22(1), 45-47.
- Cutrín, J. M., Barja, J. L., Nicholson, B. L., Bandín, I., Blake, S., & Dopazo, C. P. (2004). Restriction fragment length polymorphisms and sequence analysis: an approach for genotyping infectious pancreatic necrosis virus reference strains and other aquabirnaviruses isolated from northwestern Spain. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(2), 1059-1067.
- Delmas, B., Attoui, H., Ghosh, S., Malik, Y. S., Mundt, E., & Vakharia, V. N. (2019). ICTV virus taxonomy profile: Birnaviridae. *Journal of General Virology*, 100(1), 5-6. <https://doi.org/10.1099/jgv.0.001185>
- Dobos, P., & Roberts, T. E. (1983). The molecular biology of infectious pancreatic necrosis virus: a review. *Canadian Journal of Microbiology*, 29(4), 377-384.
- Dopazo, C. P. (2020). The infectious pancreatic necrosis virus (IPNV) and its virulence determinants: what is known and what should be known. *Pathogens*, 9(2), 94. <https://doi.org/10.3390/pathogens9020094>
- Dopazo, C. P., & Barja, J. L. (2002). Diagnosis and identification of IPNV in salmonids by molecular methods. In *Molecular Diagnosis of Salmonid Diseases*. (pp. 23-48)
- Dorson, M., & Torchy, C. (1985). Experimental transmission of infectious pancreatic necrosis virus via the sexual products. In *Fish and Shellfish Pathology*. (pp. 251-260)

- Duan, K., Zhao, J., Ren, G., Shao, Y., Lu, T., Xu, L., ... & Xu, L. (2021). Molecular evolution of infectious pancreatic necrosis virus in China. *Viruses*, 13(3), 488.
- Durmaz, Y. (2018). Yerli İnfeksiyöz Pankreatik Nekrozis Virüs (IPNV) İzolatlarının Moleküler Karakterizasyonu ve Patojenite Denemeleri. (Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Eriksson-Kallio, A. M. (2022). Characteristics of Infectious Pancreatic Necrosis in Finland: Epidemiology, genetic characterization and virulence of infectious pancreatic necrosis virus (IPNV) of farmed fish in Finland. (Ph.D. Dissertations, Department of Veterinary Biosciences Faculty of Veterinary Medicine University of Helsinki)
- Evensen, Ø., & Santi, N. (2008). Infectious pancreatic necrosis virus. In: *Encyclopedia of Virology*. (pp. 544-552)
- Frantsi, C., & Savan, M. (1971). Infectious pancreatic necrosis virüs temperature and age factors in mortality. *Journal of Wildlife Diseases*, 7(4), 249-255.
- Ghittino, P., Schwedler, H., & Kinkelin, P. D. (1984). The Principal Infectious Diseases of Fish and Their General Control Measures. Symposium on Fish Vaccination. 20-22 February, Paris, 5-40.
- Ji, F., Zhao, J., Liu, M., Lu, T., Liu, H., Yin, J., & Xu, L. M. (2016). Complete genomic sequence of an infectious pancreatic necrosis virus isolated from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in China. *Virus Genes*, 53(2), 215-225. <https://doi.org/10.1007/s11262-016-1408-9>
- Kan Ş and Kubilay A, 2025. Infectious pancreatic necrosis virus (IPNV) in rainbow trout(*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792): molecular detection and histopathology. *Pak Vet J*, 45(3): 1377-1382. <http://dx.doi.org/10.29261/pakvetj/2025.214>
- Lago, M., Rodríguez, J. F., Bandín, I., & Dopazo, C. P. (2016). Aquabirnavirus polyploidy: a new strategy to modulate virulence? *Journal of General Virology*, 97(5), 1168-1177. <https://doi.org/10.1099/jgv.0.000434>
- Li, D., Wang, G., Du, L., Zheng, Y., & Wang, Z. (2022). Recent advances in intelligent recognition methods for fish stress behavior. *Aquacultural Engineering*, 96, 102222. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102222>
- McAllister, P., Schill, W., Owens, W., & Hodge, D. (1993). Determining the prevalence of infectious pancreatic necrosis virus in asymptomatic brook trout *Salvelinus fontinalis*. a study of clinical samples and processing methods. *Diseases of Aquatic Organisms*, 15, 157-162.
- McGonigle, R. H. (1941). Acute catarrhal enteritis of salmonid fingerlings. *Transactions of the American Fisheries Society*, 70(1), 297-303. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1940\)70\[297:aceosf\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1940)70[297:aceosf]2.0.co;2)
- Melby, H. P., & Christie, K. E. (1994). Antigenic analysis of reference strains and Norwegian field strains of aquatic birnaviruses by the use of six monoclonal antibodies produced against the infectious pancreatic necrosis virus N1 strain. *Journal of Fish Diseases*, 17(4), 409–415. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.1994.tb00236.x>

- Mulei, I. R., Nyaga, P. N., Mbuthia, P. G., Waruiru, R. M., Njagi, L. W., Mwihi, E. W., Gamil, A. A. A., Evensen, Ø., & Mutoloki, S. (2018). Infectious pancreatic necrosis virus isolated from farmed rainbow trout and tilapia in Kenya is identical to European isolates. *Journal of Fish Diseases*, 41(8), 1191-1200. <https://doi.org/10.1111/jfd.12807>
- Munro, E. S., & Midtlyng, P. J. (2011). Infectious pancreatic necrosis and associated aquatic birnaviruses. In *Fish Diseases and Disorders Viral, Bacterial and Fungal Infections*. (pp. 1-65)
- Novoa, B., Rivas, C., Toranzo, A. E., & Figueras, A. (1995). Pathogenicity of birnaviruses isolated from turbot (*Scophthalmus maximus*): comparison with reference serotypes of IPNV. *Aquaculture*, 130(1), 7-14.
- Romero-Brey, I., Bandín, I., Cutrín, J. M., Vakharia, V. N., & Dopazo, C. P. (2009). Genetic analysis of aquabirnaviruses isolated from wild fish reveals occurrence of natural reassortment of infectious pancreatic necrosis virus. *Journal of Fish Diseases*, 32(7), 585-595.
- Ruane, N. M., McCarthy, L. J., Swords, D., & Henshilwood, K. (2009). Molecular differentiation of infectious pancreatic necrosis virus isolates from farmed and wild salmonids in Ireland. *Journal of Fish Diseases*, 32(12), 979-987. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2009.01080.x>
- Santi, N., Vakharia, V. N., & Evensen, Ø. (2004). Identification of putative motifs involved in the virulence of infectious pancreatic necrosis virus. *Virology*, 322(1), 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2003.12.016>
- Shivappa, R., Song, H., Yao, K., Aas-Eng, A., Evensen, Ø., & Vakharia, V. (2004). Molecular characterization of Sp serotype strains of infectious pancreatic necrosis virus exhibiting differences in virulence. *Diseases of Aquatic Organisms*, 61, 23-32. <https://doi.org/10.3354/dao061023>
- Smail, D. A., & Munro, E. S. (2008). Isolation and quantification of infectious pancreatic necrosis virus from ovarian and seminal fluids of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Journal of Fish Diseases*, 31(1), 49-58. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2007.00866.x>
- Tamer C, Durmaz Y and Ozan, et al., 2021. Pathogenicity trials regarding Turkish isolates of infectious pancreatic necrosis virus and viral haemorrhagic septicemia virus in rainbow trout. *Aquac Res* 52:1395-1400.
- Timur, G., Timur, M., Kubiay, A., & Sarmaşık, A. (1993). Bazı Alabalık İşletmelerinde Görülen Pankreatik Nekrozis Hastalığı Üzerine Histopatolojik ve Elektron Mikroskopik Çalışmalar. *Doğu Anadolu Bölgesi I. Su Ürünleri Sempozyumu*. 23-25 Haziran, Erzurum.
- Tufiño-Loza, C., Martínez-Maya, J. J., Carrillo-González, A., Neria-Arriaga, D., Salgado-Miranda, C., Rojas-Anaya, E., & Loza-Rubio, E. (2020). Uso de una PCR anidada para el diagnóstico del virus de la necrosis pancreática infecciosa (VNPI) en truchas de campo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(3), 811-827. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i3.5242>
- Wolf, K. (2019). *Fish Viruses and Fish Viral Diseases*. Published by Cornell University Press.

- Wolf, K., Quimby, M. C., & Bradford, A. D. (1963). Egg-associated transmission of IPN virus of trouts. *Virology*, 21(3), 317-321. [https://doi.org/10.1016/0042-6822\(63\)90192-2](https://doi.org/10.1016/0042-6822(63)90192-2)
- Wolf, K., Snieszko, S. F., Dunbar, C. E., & Pyle, E. (1960). Virus nature of infectious pancreatic necrosis in trout. *Experimental Biology and Medicine*, 104(1), 105–108. <https://doi.org/10.3181/00379727-104-25743>
- Wood, E. M., Yasutake, W. T., & Snieszko, S. F. (1955). Sulfonamide toxicity in brook trout. *Transactions of the American Fisheries Society*, 84(1), 155-160. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1954\)84\[155:stibt\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1954)84[155:stibt]2.0.co;2)

//

Bölüm 8

YAPAY ZEKA VE SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE KULLANIM ALANLARI

Hülya EMİNÇE SAYGI¹

¹ Profesör, Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, Yetiştiricilik Bölümü, Orcid:
0000-0002-3408-6709

Giriş

Yapay zeka (YZ), insan zekasını taklit ederek öğrenme, problem çözme ve karar verme gibi yetenekleri bilgisayar sistemlerine kazandıran bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır. YZ, büyük miktarda veriyi hızlı ve doğru bir şekilde analiz edebilmekte, makinelerin insan benzeri görevleri yerine getirmesini sağlamak ve gelecek senaryolarını tahmin edebilmektedir (Ece, 2024). Su ürünleri sektöründe ise, YZ uygulamaları veri analitiği, otomasyon, izleme, tahminleme ve optimizasyon gibi alanlarda kullanılmakta ve sektörün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, YZ uygulamalarının yaygınlaştırılmasında veri bilimi ve Makine Öğrenmesi (MÖ)'nde merkezi bir rol oynamaktadır. Su ürünleri sektörü, geleneksel üretim yöntemlerinden ileri teknolojilere geçiş sürecinde önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. YZ, MÖ ve DÖ gibi alt alanlar sayesinde, üretim süreçlerinde operasyonel verimlilik artmakta, balık sağlığı yönetimi iyileşmekte ve çevresel koşullar daha etkin şekilde izlenebilmektedir. Ancak bu dönüşüm, yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda disiplinlerarası bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu makale, YZ'nin su ürünleri yetiştiriciliğinde farklı disiplinlerle entegrasyonunu sistematik olarak ele almaktadır.

YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini ölçmek ve optimize etmek için öncelikle sektörün mevcut dinamiklerinin ve karşı karşıya olduğu zorlukların anlaşılması gerekmektedir. Su ürünleri sektörü, geleneksel olarak doğal kaynaklara dayalı bir üretim yapısına sahip olup, aşırı avlanma, çevresel kirlilik, iklim değişikliği, hastalıklar ve ekonomik dalgalanmalar gibi çok boyutlu risklerle karşı karşıyadır (Lewis, 2008). Özellikle endüstriyel balıkçılığın balık stokları üzerindeki baskısı ve bazı stokların çökmesi, sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır. Bu nedenle, sektörün sürdürülebilirliğini sağlamak için yenilikçi teknolojilerin entegrasyonu kaçınılmaz hale gelmiştir.

Günümüzde YZ teknolojilerinin farklı sektörlerdeki etkileri giderek daha fazla araştırılmakta ve tartışılmaktadır. Su ürünleri sektörü, hem küresel gıda güvenliği hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından stratejik bir öneme sahiptir. Ancak, artan nüfus, iklim değişikliği, doğal kaynakların azalması ve çevresel baskılar, su ürünleri sektöründe sürdürülebilirliğin sağlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin nasıl ölçülebileceği ve optimize edilebileceği konusu, multidisipliner bir yaklaşım gerektiren güncel ve kritik bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

YZ, son yıllarda birçok sektörde olduğu gibi su ürünleri yetiştiriciliğinde de önemli bir dönüşüm aracı haline gelmiştir. Özellikle veri yoğun süreçlerin yönetimi, çevresel değişkenlerin izlenmesi ve üretim verimliliğinin artırılması gibi alanlarda YZ teknolojileri, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için güçlü bir araç sunmaktadır.

YZ Uygulamalarının Su Ürünleri Sektöründe Yaygınlaştırılması İçin Multidisipliner Yaklaşımlar ve İşbirlikleri için YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe etkin ve sürdürülebilir biçimde kullanılabilmesi, yalnızca teknik altyapının geliştirilmesiyle sınırlı değildir. Bu süreç, farklı disiplinlerin bilgi birikimini bir araya getiren multidisipliner yaklaşımları ve çeşitli paydaşlar arasında kurulacak işbirliklerini gerektirir. Bu bölümde, YZ uygulamalarının sektöre entegrasyonu için gerekli olan temel disiplinler ve işbirliği modelleri ele alınmaktadır.

YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini ölçmek için kullanılan yöntemler arasında büyük veri analitiği, uzaktan algılama, MÖ, otomatik izleme sistemleri ve tahmine dayalı modelleme öne çıkmaktadır. Özellikle uzaktan algılama (remote sensing, RS) ve YZ tabanlı analizler, geniş ve erişilemeyen alanların izlenmesi, su kalitesinin değerlendirilmesi, biyokütle tahmini, hastalık ve alg patlamalarının tespiti gibi konularda sektörün verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır (Ratan et al., 2025). RS teknolojileri, su ürünleri üretim alanlarının sıcaklık, su kalitesi ve biyokütle gibi parametrelerini gerçek zamanlı olarak izleyebilmekte ve bu veriler YZ algoritmaları ile işlenerek karar destek sistemlerine entegre edilmektedir. Böylece, çevresel değişkenlerin etkisi daha hızlı ve doğru bir şekilde analiz edilmekte, sürdürülebilirlik göstergeleri daha etkin biçimde ölçülebilmektedir.

YZ ve MÖ tekniklerinin su ürünleri sektöründe kullanımı, özellikle üretim süreçlerinin otomasyonu, kaynak kullanımının optimizasyonu ve çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, MÖ algoritmaları, balık türlerinin davranışlarını analiz ederek yemleme zamanlarını optimize edebilmekte, böylece yem israfı ve su kirliliği azaltılabilmektedir (Ratan et al., 2025). Ayrıca, hastalıkların erken tespiti ve önlenmesi için YZ tabanlı görüntü işleme ve veri madenciliği teknikleri kullanılmakta, bu sayede üretim kayıpları ve kimyasal kullanımının minimize edilmesi sağlanmaktadır. Bu tür uygulamalar, su ürünleri sektöründe sürdürülebilirliğin ölçülmesi ve iyileştirilmesi için somut göstergeler sunmaktadır.

Ayrıca, su ürünleri sektöründe iş sağlığı ve güvenliği, sürdürülebilirliğin sosyal boyutunu oluşturmaktadır. Özellikle balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliğinde çalışanların iş sağlığı ve güvenliği, sürdürülebilir üre-

timin temel unsurlarından biridir (Yücel et al., 2021). Son yıllarda artan iş kazalarının azaltılması için çalışanlara yönelik eğitimlerin artırılması ve YZ tabanlı otomasyon sistemlerinin kullanılması önerilmektedir. YZ destekli izleme ve erken uyarı sistemleri, iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ortamlarının oluşturulmasında önemli rol oynayabilir.

YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin ölçülmesi ve optimize edilmesi, aynı zamanda çevresel etkilerin izlenmesi ve yönetilmesi açısından da kritik öneme sahiptir. Özellikle iklim değişikliği, su kalitesi, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem sağlığı gibi çevresel faktörlerin izlenmesi için YZ tabanlı büyük veri analitiği ve uzaktan algılama teknikleri kullanılmaktadır (Ratan et al., 2025). Bu teknolojiler, deniz ve iç su ekosistemlerinde meydana gelen değişikliklerin erken tespit edilmesini ve uygun müdahale stratejilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, YZ tabanlı modelleme ve simülasyon araçları, farklı senaryolar altında sektörün sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek ve optimize etmek için kullanılabilir.

Offshore (açık deniz) akuakültür uygulamaları, çevresel sürdürülebilirliğin artırılması ve denizel kaynakların daha etkin kullanılması açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, açık deniz balık çiftlikleri ve deniz yosunu yetiştiriciliği altyapısında yaşanan teknolojik ilerlemelerin, üretim kapasitesini artırırken çevresel etkileri minimize etmeye yönelik çözümler sunduğunu göstermektedir (Wang et al., 2024). Bu tür uygulamalarda YZ ve otomasyon sistemlerinin entegrasyonu, üretim süreçlerinin daha hassas kontrol edilmesini ve çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin daha etkin izlenmesini sağlamaktadır.

YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin ölçülmesi ve optimize edilmesi için geliştirilen yöntemler arasında, otomatik izleme sistemleri, veri madenciliği, tahmine dayalı modelleme, uzaktan algılama ve MÖ tabanlı karar destek sistemleri öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler, sektörün çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik göstergelerini bütüncül bir şekilde izlemeyi ve yönetmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca, YZ tabanlı otomasyon ve optimizasyon uygulamaları, üretim süreçlerinde kaynak kullanımını azaltmakta, verimliliği artırmakta ve çevresel etkileri minimize etmektedir (Ratan et al., 2025).

Bununla birlikte, YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin ölçülmesi ve optimize edilmesi sürecinde karşılaşılan bazı zorluklar da bulunmaktadır. Özellikle veri kalitesi, veri güvenliği, etik ve yasal düzenlemeler, finansman ve insan kaynağı eksik-

liği gibi faktörler, YZ uygulamalarının etkinliğini sınırlandırabilmektedir (Ece, 2024). Bu nedenle, sektörün tüm paydaşlarının işbirliği içinde hareket etmesi, veri paylaşımı ve standartların oluşturulması, YZ politikalarının geliştirilmesi ve güvenli yazılımların kullanılması gerekmektedir.

YZ teknolojilerinin sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin optimize edilmesi ise, yalnızca teknolojik entegrasyonla sınırlı değildir. Aynı zamanda, sektörün tüm paydaşlarının (üreticiler, kamu otoriteleri, araştırmacılar ve tüketiciler) işbirliği içinde hareket etmesi, veri paylaşımı ve standartların oluşturulması gerekmektedir. YZ uygulamalarının etkinliği, kaliteli ve doğru veriye erişim, güçlü bilişim altyapısı ve finansman gereksinimleri ile doğrudan ilişkilidir (Ece, 2024). Bu nedenle, sektör, kamu ve üniversite işbirliğinin geliştirilmesi, YZ politikalarının oluşturulması ve güvenli yazılımların geliştirilmesi gibi stratejik adımlar atmalıdır. Ayrıca, YZ uygulamalarının etik, yasal ve toplumsal boyutları da göz önünde bulundurulmalı, insan faktörünün dışlanmaması ve teknolojinin doğru kullanılması için kapsamlı düzenlemeler yapılmalıdır.

Su ürünleri sektöründe sürdürülebilirliğin ölçülmesi ve optimize edilmesi için YZ teknolojilerinin kullanımı, yalnızca çevresel göstergelerin izlenmesiyle sınırlı değildir. Aynı zamanda ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik göstergelerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Türkiye örneğinde, iç su ürünleri avcılığı ve yetiştiriciliği alt sektörlerinin ekonomik performansı, kişi başına arz, GSYİH'ya katkı, hasat miktarı ve değeri gibi göstergelerle değerlendirilmiştir (Rad & Rad, 2012). Bu göstergeler, sektörün ekonomik sürdürülebilirliğini analiz etmek ve gelişme eğilimlerini izlemek için kullanılmaktadır. YZ tabanlı veri analitiği ve tahmine dayalı modelleme teknikleri, bu tür ekonomik göstergelerin daha hızlı ve doğru bir şekilde hesaplanmasını ve sektörün gelecekteki eğilimlerinin öngörülmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin ölçülmesi ve optimize edilmesi, multidisipliner bir yaklaşım gerektiren, teknolojik, ekonomik, çevresel ve sosyal boyutları olan karmaşık bir süreçtir. YZ ve MÖ tabanlı uygulamalar, sektörün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli fırsatlar sunmakta; ancak bu teknolojilerin etkin ve güvenli bir şekilde entegre edilmesi için kapsamlı stratejiler ve politikalar geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, mevcut literatür ve güncel araştırmalar, YZ teknolojilerinin su ürünleri sektöründe sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin ölçülmesi ve optimize edilmesi konusunda önemli bilgiler ve yol haritaları sunmaktadır (Lewis, 2008, Rad & Rad, 2012, Yücel et al., 2021, Ece, 2024, Ratan et al., 2025, Wang et al., 2024).

YZ Teknolojilerinin Temel Özellikleri

YZ; MÖ, DÖ, görüntü işleme ve doğal dil işleme gibi alt alanları kapsayan bir teknolojik çerçevedir. Bu teknolojiler, büyük veri kümelerinden anlamlı sonuçlar çıkarma, tahminleme yapma ve karar destek sistemleri oluşturma gibi işlevleri yerine getirir. Su ürünleri sektöründe bu işlevler, çevresel izleme, üretim optimizasyonu ve hastalık yönetimi gibi kritik alanlarda kullanılmaktadır.

YZ uygulamalarının su ürünleri sektöründe yaygınlaştırılması için gerekli olan multidisipliner yaklaşımlar ve işbirlikleri, sektörün sürdürülebilir, verimli ve yenilikçi bir yapıya kavuşmasını sağlayacak temel unsurlardır. Bilişim teknolojileri, biyoloji, çevre mühendisliği, ekonomi, eğitim, sosyoloji, politika ve uluslararası işbirlikleri gibi farklı disiplinlerin ortak çalışması, sektörde teknolojik dönüşümün hızlanmasına ve yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır. Bu süreçte, sektörün tüm paydaşlarının aktif katılımı, bilgi paylaşımı ve ortak projeler geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Su ürünleri sektörü, küresel ölçekte hızla gelişmekte ve farklı ülkelerdeki uygulamalar, bilgi ve deneyimlerin paylaşılması, teknolojik yeniliklerin yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle dijital ikiz teknolojileri, büyük veri analitiği ve YZ entegrasyonu gibi alanlarda, uluslararası araştırma ve endüstri işbirlikleri, sektörde yenilikçi uygulamaların geliştirilmesini ve yaygınlaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Dijital ikizler, IoT cihazları ve gelişmiş veri analitiği teknikleri ile entegre edilerek, balık besleme yönetimi, çevre izleme ve balık sağlığı gibi alanlarda gerçek zamanlı izleme ve öngörücü analizler sunmaktadır (Khatei et al., 2025). Bu tür teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması için, farklı ülkelerden araştırmacıların, sektör temsilcilerinin ve teknoloji sağlayıcılarının ortak projelerde yer alması gerekmektedir.

YZ Destekli Akuakültür Yönetiminde Etik, Veri Gizliliği ve Sürdürülebilirlik Perspektifleri ele alınacak olunursa, YZ'nin etik, veri gizliliği ve insan faktörü ile ilgili tartışmaları, su ürünleri sektöründe de dikkate alınması gereken önemli konular arasında yer almaktadır. Halkla ilişkilerde YZ kullanımının incelendiği bir çalışmada, YZ'nin veri analizi ve kişiselleştirme odaklı iletişim stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynadığı, ancak veri gizliliği, manipülasyon ve algoritmalarındaki önyargı gibi etik sorunları da beraberinde getirdiği belirtilmektedir (Summak, 2024). Su ürünleri sektöründe de, özellikle veri toplama, analiz ve karar verme süreçlerinde etik standartlara uyum ve veri gizliliği konularına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Günümüzde su ürünleri sektöründe YZ uygulamalarının yaygınlaştırılması için öncelikle sektörün mevcut durumu, karşılaştığı zorluklar ve teknolojik gelişmelerin sektöre etkileri iyi analiz edilmelidir. Su ürünleri sektörü, geleneksel üretim yöntemlerinden ileri teknolojilere geçiş sürecinde, özellikle su kalitesi yönetimi, hastalıkların erken teşhisi, besleme optimizasyonu ve çevresel sürdürülebilirlik gibi alanlarda YZ tabanlı çözümlere ihtiyaç duymaktadır. YZ, MÖ ve derin öğrenme (DÖ) gibi alt alanlar sayesinde, su ürünleri yetiştiriciliğinde operasyonel verimlilik artmakta, balık sağlığı yönetimi iyileşmekte ve çevresel koşullar daha etkin şekilde izlenebilmektedir (Roy et al., 2025). Bu teknolojiler, gerçek zamanlı su kalitesi izleme, hastalık tespiti ve balık biyokütlesinin otomatik tahmini gibi uygulamalarla sektörde önemli dönüşümlere yol açmaktadır (Roy et al., 2025). Ancak, bu dönüşümün sürdürülebilir ve yaygın olabilmesi için disiplinlerarası işbirliklerinin önemi büyüktür.

Küresel su ürünleri üretimi artarken, gıda güvenliği ve ekolojik sınırlar arasında denge kurmak için dijital ikizler, IoT ve YZ tabanlı analitiklere olan gereksinim hızla yükselmektedir. SOFIA 2024 raporu, akuakültürün sürdürülebilir büyüme kapasitesini ve 2032'ye uzanan eğilimleri ortaya koyarken politika-bilim etkileşiminin önemini vurgular. AB Komisyonu'nun 2021-2030 Stratejik Kılavuzları ise, AB Yeşil Mutabakatı ve Çiftlikten Çatala hedefleriyle uyumlu olarak yeşil dönüşüm, dayanıklılık ve yenilik eksenlerinde somut eylemler önermektedir. Eşzamanlı olarak yayımlanan kapsamlı derlemeler, YZ'nin su kalitesi optimizasyonu, hastalık erken uyarısı, yemleme ve biyokütle kestirimindeki rolünü ve zorluklarını sistematik biçimde ortaya koymaktadır (FAO, 2024, EU, 2021, Mandal & Ghost, 2024).

Veri Toplama ve İzleme (IoT)

Veri toplama ve İzleme (IoT)'un su ürünlerindeki amacı, Su kalitesi ve üretim parametrelerini (sıcaklık, pH, DO, amonyak, tuzluluk, bulanıklık, yem tüketimi, ağırlık/uzunluk, debi) 1-5 dk aralıklarla gerçek zamanlı izlemek. Bu işlemi yaparken kullanılan teknikler ise Zaman serisi filtreleme, anomali tespiti, veri füzyonu ve buluta/kenara dayalı akış işlemdir. Etkileri ise gerçek zamanlı uyarılar; sensör drift ve kalibrasyon hatalarının periyodik kalibrasyon ve yedekli sensör stratejileriyle yönetimi. IoT tabanlı su kalitesi izleme sistemlerinin doğruluk ve tepki sürelerinde önemli kazanımlar sağladığını göstermektedir (Capetillo-Contreras, 2024; Iniyan Arasu, 2024).

Karar Destek Sistemleri (KDS)

Karar destek sistemleri (KDS)'nin Amacı su tüketimi (m^3/ton), enerji (kWh/ton), karbon ayak izi ($kg CO_2e/kg$), FCR, SGR, mortalite (%) gibi göstergeleri izleyerek operasyonel öneriler üretmek. Kullanılan Teknikler ise çok ölçütlü karar verme (AHP/ANP), takviye öğrenmesi, kural tabanlı kurallar; panolar ve açıklanabilirlikdir.

Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)

Yaşam döngüsü Analizi (LCA)'nın amacı ise üretimin tüm aşamalarında su/enerji/atık etkilerini hesaplamak; yem üretiminin baskın etkilerini görünür kılmaktır. Kullanılan teknikler ise Envanter tamamlama, emisyon faktörü eşleştirme, Monte Carlo belirsizlik analizidir. Elde edilenlerin sonucu olarak ise eleştirel derlemeler, akuakültür LCA'larında fonksiyonel birim, sınır kapsamı ve çok işlevlilik gibi metodolojik konuların kritik olduğunu ve yemin çoğu etkide “sıcak nokta” olduğunu göstermektedir. Mikroalg veya bitkisel yağ alternatifleri gibi besleme senaryoları, etki azaltımında kaldıraç sunabilirler (Bohnes & Laurent, 2019; Bohnes et al., 2019; Zlaugotne et al., 2023; Zuorro et al., 2023).

Enerji ve Su Verimliliği

Enerji ve su verimliliğinin YZ ile yapılmasındaki amaç kWh/kg ve su geri kullanım oranını iyileştirerek OPEX'i düşürmektir. Kullanılan teknikler ise Model predictive control (MPC), Bayes optimizasyonu, değişken hızlı sürücü (VFD) ayarı ve entegre enerji planlamasıdır. Elde edilenlerin sonucu olarak ise RAS'ta dinamik modelleme ve kontrol çalışmaları MPC'nin su kalitesi-enerji denklemini yönetmede etkililiğini; enerji simülasyon/optimizasyon çalışmaları ise ısıtma/soğutma set noktalarının enerji tasarrufuna duyarlılığını ortaya koymaktadır. Çok zaman ölçekli tasarım-işletme-kontrolün tek çatı altında ele alındığı yeni karar destek çerçeveleri, yenilenebilir entegrasyonuyla birlikte seviyeleşmiş yaşam döngüsü maliyetini azaltmayı hedeflemektedirler (Goo et al., 2025; Zhang, 2025).

İklim ve Çevre Tahminleri

İklim ve Çevre Tahminlerinde YZ'nin kullanılmasındaki amaç Sıcaklık dalgalanması, klorofila ve DO trendleriyle alg patlaması gibi riskleri erken öngörmektir. Kullanılan teknikler Gradyan artırma/LSTM gibi veri güdümlü modeller, fizikselveri hibrit yaklaşımlar, açıklanabilir YZ (SHAP)'dır. Elde edilenlerin sonucu olarak ise göller ve kıyı suları üzerinde yapılan çalışmalar, ML ve hibrit modellerin zamanlama ve büyüklük öngörüsünde süreçtabanlı modellere kıyasla üstünlük/katkı sağlayabildi-

ğini, açıklanabilirlik araçlarının fosfor/azot gibi sürücülerini ayrıştırabilmesini göstermektedir. Benzer yaklaşımlar su temini rezervuarlarında HAB sınıflandırmasında da başarı vermiştir (Lin et al., 2022; Demiray et al., 2025; Jeong et al., 2022).

Model Verimliliği ve MetaÖğrenme

Model Verimliliği ve Meta Öğrenmesinde YZ'nın kullanılmasındaki amaç Eğitim/çalıştırma enerji tüketimini ve gecikmeyi azaltarak kenar bilişim uygulamalarını ölçeklemektir. Kullanılan teknikler ise Kuantizasyon, damıtma (distillation), hafif mimariler ve çok kipli füzyon, AIoT mimarileridir. Elde edilenlerin sonucu olarak ise güncel derlemeler, akua-kültürde derin öğrenmenin veri kıtlığı–genelleme–gerçek zaman kısıtları altında kenarodaklı ve hafif çözümlere yöneldiği ve AIoT çerçevelerinin sahada uygulanabilirliği artırdığını vurgulanmaktadır (Wu et al., 2025; Huang & Khabusi, 2025).

Çevresel İzleme ve Risk Yönetimi

Su ürünleri yetiştiriciliğinde özellikle çevresel verilerin izlenmesi, stok tahmini, hastalık tespiti ve kalite kontrol gibi alanlarda büyük veri ve YZ entegrasyonu kritik rol oynamaktadır. YZ destekli sensör sistemleri, su sıcaklığı, pH, çözünmüş oksijen gibi çevresel parametreleri gerçek zamanlı olarak izleyebilir. Bu veriler, makine öğrenimi algoritmaları ile analiz edilerek ani değişimlerin erken tespiti sağlanabilir. Böylece üretim ortamında oluşabilecek stres faktörleri önceden belirlenerek müdahale edilebilir.

YZ ve MÖ tekniklerinin büyük veri ile entegrasyonu, su ürünleri gibi verisi yoğun sektörlerde önemli avantajlar sağlamaktadır. Büyük veri analizinde YZ ve MÖ uygulamalarında çalışmada, kümeleme, sınıflandırma, yapay sinir ağları (YSA), metin ve web madenciliği, fikir madenciliği ve duygu analizi gibi tekniklerin büyük veriyle yapılan uygulamalarda kullanıldığı belirlenmiştir (Atalay & Çelik, 2017). Su ürünleri sektöründe de, üretimden pazarlamaya kadar birçok aşamada büyük veri analitiği ve YZ uygulamaları ile daha etkin kararlar alınabilmektedir.

YZ tabanlı çevresel izleme ve analiz sistemleri, su kalitesinin korunması, atıkların azaltılması ve çevre dostu uygulamaların yaygınlaştırılması açısından büyük önem taşımaktadır (Sidique et al., 2025). Bu tür uygulamalar, sektörün hem ekonomik hem de ekolojik sürdürülebilirliğini desteklemektedir.

Yemleme ve Büyüme Takibi

Yemleme ve Büyüme Takibindeki amaç FCR ve SGR'yi iyileştirip yem israfını azaltmak; davranışa duyarlı adaptif stratejiler geliştirmek. Kullanılan teknikler ise Görüntü analizi (CNN), uzamsal zamansal derin modeller (CNNLSTM/GRU), açgözlü/öğrenen yemleme (RL), çoklu veri füzyonudur. Elde edilenlerin sonucu olarak ise otomatik yemleme sistemleri ve davranış tanıma yaklaşımları yem gereksinimini daha hassas ölçerek israfı azaltmakta; son çalışmalar satiety/sinyal temelli yaklaşımlarla hafif modelleri kenarda çalıştırılabilir kılmaktadır. Derleme çalışmalar, derin öğrenmenin sürdürülebilir akuakültürde balık tespiti-davranış-su kalitesi öngörülerinde yaygınlaştığını bildirmektedir (Son et al., 2024; Zhao et al., 2025; Wu et al., 2025).

Balıkların büyüme oranları, yem tüketimi ve davranışları görüntü işleme teknikleri ile izlenebilir. YZ algoritmaları, bu verileri analiz ederek en uygun yemleme zamanlarını ve miktarlarını belirleyebilir. Bu sayede yem israfı önlenirken büyüme verimliliği artırılabilir.

Günümüzde teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte YZ ve MÖ uygulamaları, çok çeşitli sektörlerde olduğu gibi su ürünleri alanında da önemli bir dönüşüm potansiyeli taşımaktadır. Büyük veri analitiği, MÖ, DÖ ve YSA gibi alt teknolojiler, veri yoğun sektörlerde yeni uygulama alanlarının önünü açmaktadır. Su ürünleri sektörü ise, üretimden kalite kontrolüne, sürdürülebilirlikten kaynak yönetimine kadar birçok aşamada veri odaklı karar süreçlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, YZ'nın su ürünlerinde kullanımı, hem bilimsel hem de endüstriyel açıdan multidisipliner bir yaklaşım gerektirmektedir.

Su ürünleri sektöründe büyük veri analitiği, veri madenciliği ve MÖ algoritmaları, çevresel analiz, yem yönetimi, hastalık yönetimi ve stok değerlendirmesi gibi alanlarda derinlemesine içgörüler sunmaktadır. Özellikle sensör ağlarından ve otomatik izleme sistemlerinden elde edilen büyük hacimli verilerin işlenmesi, akıllı karar destek sistemlerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Gladju & Kanagaraj, 2021).

Hastalık Tespiti ve Yönetimi

Balıklarda hastalık belirtileri, görüntü analizi ve davranışsal veri ile erken dönemde tespit edilebilir. YZ sistemleri, geçmiş verilerle karşılaştırma yaparak olası hastalıkları sınıflandırabilir ve uygun müdahale yöntemlerini önerir. Bu yaklaşım, üretim kayıplarını azaltmak ve antibiyotik kullanımını minimize etmek açısından önemlidir.

YZ'nın sağlık ve biyoloji alanlarındaki uygulamaları, su ürünlerinde hastalık tespiti ve biyolojik analizler için önemli bir referans oluşturmaktadır. YZ'nın mikrobiyoloji alanındaki uygulamalarının incelendiği bir çalışmada, MÖ ve DÖ tekniklerinin mikrobiyolojik tanı, ilaç keşfi, enfeksiyon kontrolü ve hasta izleme gibi alanlarda kullanıldığı belirtilmektedir. Özellikle, yapay zekâ destekli görüntü analizi yöntemlerinin hızlı ve doğru tanı koymada kullanıldığı vurgulanmaktadır (Kayar et al., 2024). Su ürünleri sektöründe de, balık hastalıklarının erken teşhisi, su kalitesinin izlenmesi ve biyolojik çeşitliliğin korunması gibi alanlarda benzer YZ uygulamaları geliştirilebilir.

Hasat ve Lojistik Optimizasyonu

Hasat ve Lojistik Optimizasyonunda YZ'daki amaç, büyüme eğrileri, stok sağlığı ve piyasa fiyatlarıyla en uygun hasat haftasını belirlemek. Kullanılan Teknikler ise Zaman serisi (ARIMA/SARIMA), LSTM, çok hedefli optimizasyon (gelir, verim, risk)'dir. Elde edilenlerin sonucu olarak ise balık üretim/üretim trendleri ve büyüme için ARIMA yaygın şekilde uygulanmış; yakın tarihli uygulamalar çevresel açıklayıcılar (ARIMAX) ile doğruluğu arttırmıştır (Yadav et al., 2020; Siddique et al., 2025).

Lojistik sektöründe YZ ve MÖ teknolojilerinin kullanımı ile ilgili yapılan çalışmada, akıllı lojistik sistemlerinin tedarik zinciri ve lojistik alanında dijital dönüşümü kolaylaştırdığı ve verimliliği, şeffaflığı ve planlamayı artırmada pratik bir öneme sahip olduğu belirtilmektedir (Oğuz & Yalçıntaş., 2024). Su ürünleri sektöründe de, tedarik zinciri yönetimi, stok takibi ve sürdürülebilir üretim planlaması gibi alanlarda YZ destekli sistemler kullanılabilir.

YZ, balıkların büyüme verilerini analiz ederek ideal hasat zamanını tahmin edebilir. Ayrıca lojistik süreçlerde talep tahmini, stok yönetimi ve dağıtım planlaması gibi alanlarda da kullanılabilir. Bu sayede üretim zinciri daha verimli ve sürdürülebilir hale gelir.

YZ'nın endüstriyel yönetim ve üretim planlamasındaki rolü, su ürünleri sektöründe de süreçlerin optimizasyonu açısından yol gösterici olmaktadır. Endüstriyel yönetimde YZ kullanımının ele alındığı bir çalışmada, MÖ ve öngörücü analizlerin verimlilik, üretkenlik ve karar verme süreçlerinde önemli iyileşmeler sağladığı belirtilmiştir. Özellikle, öngörücü bakım, otomasyon, tedarik zinciri optimizasyonu ve kalite kontrol gibi alanlarda YZ'nın sunduğu avantajlar vurgulanmaktadır (Silviu, 2024). Su ürünleri sektöründe de, üretim ekipmanlarının bakımı, stok yönetimi, lojistik ve kalite kontrol gibi süreçlerde YZ'nın benzer şekilde kullanılabileceği öngörülmektedir.

YZ'nın kalite kontrol ve otomasyon alanındaki uygulamaları, su ürünleri sektöründe ürün kalitesinin artırılması ve süreçlerin otomatikleştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Ferit Artkın'ın çalışmasında, YZ'nın mekanik imalat sanayinde kalite denetimi, kusur tespiti ve iş yeri güvenliğini artırma gibi alanlarda yaygın olarak kullanıldığı belirlenen bir çalışma bulunmaktadır (Artkın, 2022). Benzer şekilde, su ürünleri sektöründe de, ürünlerin kalite kontrolü, paketleme süreçlerinin otomasyonu ve üretim hatalarının en aza indirilmesi gibi alanlarda YZ uygulamaları geliştirilebilir.

YZ'nın genel tanımı ve uygulama alanları, günümüz dünyasında hızla genişlemektedir. YZ teknolojisi, üretimden günlük yaşama kadar birçok alanda kullanılmakta ve özellikle üretim hassasiyetini sağlamak, iş üretkenliğini ve iş yeri güvenliğini artırmak gibi avantajlar sunmaktadır. YZ teknolojisi, mekanik imalat sanayinde kalite denetimi, kusur tespiti ve iş yeri güvenliğini artırma gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, YZ'nın üretim süreçlerinde otomasyon ve akıllı geliştirmeyi gerçekleştirmek için vazgeçilmez bir unsur haline geldiği vurgulanmaktadır (Artkın, 2022). Bu genel çerçeve, su ürünleri sektöründe de YZ'nın benzer şekilde süreç optimizasyonu, kalite kontrol ve verimlilik artışı gibi alanlarda kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Sürdürülebilirlik Analizi

Sürdürülebilirlik Analizinde YZ'nın kullanılmasındaki amaç alternatif yönetim senaryolarının çevresel/sosyoekonomik etkilerini test etmek ve uyum puanı ile maliyet-fayda değerlendirmesi üretmektir. Çerçeve, AB'nin 2021–2030 kılavuzları ve ECA 2023 özel raporu, planlama–lisanslama ve izleme verisi gibi eksenlerde ilerleme ile boşluklara işaret eder. İklim uyum ve enerji geçişi rehberleriyle yeni politika belgeleri, yer, su erişimi, iklim uyumu ve enerji geçişinde uygulamaya dönük öneriler sunar.

YZ ile karbon ayak izi, enerji tüketimi ve su kullanımı gibi sürdürülebilirlik göstergeleri izlenebilir. Bu veriler, yaşam döngüsü analizi (LCA) kapsamında değerlendirilerek üretim süreçlerinin çevresel etkileri hesaplanabilir. Böylece daha az kaynakla daha fazla üretim hedeflenebilir.

YZ'nın sürdürülebilirlik ve kaynak yönetimi açısından sunduğu olanaklar, su ürünleri sektöründe doğal kaynakların korunması ve verimli kullanımı için kritik öneme sahiptir.

YZ uygulamalarının sektörel çeşitliliği, su ürünlerinde kullanılabilecek teknolojik yaklaşımların da çeşitlenmesini sağlamaktadır. YZ girişimciliği üzerine yapılan kavramsal bir çalışmada, YZ'nın otomotiv, sağ-

lık, bankacılık, finans, eğitim, medya, enerji, lojistik, e-ticaret, güvenlik, savunma ve hukuk gibi birçok sektörde akıllı platformlar, MÖ, optimizasyon, otonom araçlar, doğal dil işleme, nesnelerin interneti ve yapay görüş gibi alanlarda uygulandığı belirtilmektedir (Yüksel & Esmer, 2024). Bu çeşitlilik, su ürünleri sektöründe de YZ'nın farklı alanlarda kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle, su ürünleri üretiminde otomasyon, kalite kontrol, stok yönetimi ve sürdürülebilirlik gibi konular, YZ'nın potansiyel uygulama alanları arasında yer almaktadır.

YZ uygulamalarının su ürünleri sektöründe yaygınlaştırılması için gerekli olan multidisipliner yaklaşımların başında, bilişim teknolojileri ile biyolojik ve çevresel bilimlerin entegrasyonu gelmektedir. Özellikle su kalitesi yönetimi, balık sağlığı ve üretim verimliliği gibi konularda, biyologlar ve çevre mühendisleri ile yazılım geliştiricilerinin birlikte çalışması gerekmektedir. Örneğin, YZ tabanlı su kalitesi yönetimi uygulamaları, sıcaklık, çözünmüş oksijen, pH ve besin seviyeleri gibi parametrelerin hassas kontrolünü mümkün kılarak, kaynak tüketimini azaltmakta ve çevresel etkileri en aza indirmektedir (Roy & Kumari, 2025). Bu tür uygulamalar, gerçek zamanlı izleme ve öngörücü analizler sayesinde, su ürünleri işletmelerinin üretkenliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır (Roy & Kumari, 2025). Ancak, bu teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması için hem biyolojik süreçlerin hem de veri biliminin derinlemesine anlaşılması gerekmektedir.

Veri bilimi ve MÖ uzmanlarının, biyologlar ve sektör profesyonelleriyle birlikte çalışarak, sektöre özgü veri setlerinin analizini ve modellemesini yapması gerekmektedir. Bu tür işbirlikleri, su ürünleri sektöründe veri tabanlı karar alma süreçlerinin yaygınlaşmasını ve üretim verimliliğinin artmasını sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Akkaya, G. (2007). Yapay sinir ağları ve tarım alanındaki uygulamaları. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38(2), 195-202.
- Akram, W., Din, M. U., Soud, L. S., & Hussain, I. (2025). A Review of Generative AI in Aquaculture: Foundations, Applications, and Future Directions for Smart and Sustainable Farming. *arXiv preprint arXiv:2507.11974*.
- Artkin, F. (2022). Applications of artificial intelligence in mechanical engineering. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (45), 159-163.
- Bohnes, F. A., & Laurent, A. (2019). LCA of aquaculture systems: methodological issues and potential improvements. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(2), 324-337.
- Bohnes, F. A., Hauschild, M. Z., Schlundt, J., & Laurent, A. (2019). Life cycle assessments of aquaculture systems: a critical review of reported findings with recommendations for policy and system development. *Reviews in Aquaculture*, 11(4), 1061-1079.
- Capetillo-Contreras, O., Pérez-Reynoso, F. D., Zamora-Antuñano, M. A., Álvarez-Alvarado, J. M., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2024). Artificial intelligence-based aquaculture system for optimizing the quality of water: a systematic analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 161.
- Atalay, M., & Çelik, E. (2017). Büyük veri analizinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları-artificial intelligence and machine learning applications in big data analysis. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(22), 155-172.
- Demiray, B. Z., Mermer, O., Baydaroğlu, Ö., & Demir, I. (2025). Predicting harmful algal blooms using explainable deep learning models: A comparative study. *Water*, 17(5), 676.
- Ece, N. J. (2024). Yapay Zeka: Denizcilik Sektöründe Kullanımı Ve Swot Analizi. *Mersin Üniversitesi Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 30-51.
- EC, European Commission. Strategic guidelines for a more sustainable and competitive EU aquaculture (2021–2030).<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52021DC0236>
- FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>.<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a10e81b3-3fbd-4393-b7b6-6a926915a19a/content>
- FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>.
- Gladju, J., & Kanagaraj, A. (2021, October). Potential applications of data mining in aquaculture. In *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)* (pp. 1-5). IEEE.
- Goo, J., Jo, S., Kim, J., Cho, S., Kim, N., Ho Hong, J., Num, -h., Kwak, Y., (2025). Energy Saving Potential Analysis of Indoor Aquaculture Through Optimal

- Control Strategies Based on Building Energy Simulation. Proceedings of the 19th IBPSA Conference Brisbane, Australia, Aug 24–27, 2025 <https://doi.org/10.26868/25222708.2025.1373>. https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2025/papers/bs2025_1373.pdf
- Huang, Y., & Khabusi, S. P. (2025). *Artificial Intelligence of Things (AIoT) advances in aquaculture: A review. Processes, 13, 73.*
- Iniyan Arasu, M., Subha Rani, S., Thiyagarajan, K., & Ahilan, A. (2024). AQUASENSE: aquaculture water quality monitoring framework using autonomous sensors. *Aquac. Int, 32, 9119-9135.*
- Jeong, B., Chapeta, M. R., Kim, M., Kim, J., Shin, J., & Cha, Y. (2022). Machine learning-based prediction of harmful algal blooms in water supply reservoirs. *Water Quality Research Journal, 57(4), 304-318.*
- Kayar, M. Y., Körün, A. B., Topsakal, Ü. U., & Satıcı, S. A. (2025). From Fear of Innovation to AI Dependency: the Mediating Roles of Fear of Failure and Self-Doubt. *International Journal of Mental Health and Addiction, 1-18.*
- Khatei, A., Ganie, P. A., & Pandey, P. K. (2025). Introduction of Information Technology in Fisheries and Aquaculture. In *Information Technology in Fisheries and Aquaculture* (pp. 1-15). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Lewis, R. (2008). Impacts on Capture Fisheries and Aquaculture. *Agriculture In a Changing Climate, 49.*
- Lin, S., Pierson, D., & Mesman, J. (2022). Prediction of algal blooms via data-driven machine learning models: An evaluation using data from a well monitored mesotrophic lake. *Geoscientific Model Development Discussions, 2022, 1-18.*
- Mandal, A., & Ghosh, A. R. (2024). Role of artificial intelligence (AI) in fish growth and health status monitoring: A review on sustainable aquaculture. *Aquaculture International, 32(3), 2791-2820.* <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01297-z>
- Rad, F., & Rad, S. (2012). A comparative assessment of Turkish Inland fisheries and aquaculture using economic sustainability indicators. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 12(2).*
- Ratan, R., Ashwini, M., & Nagarajan, V. (2025). Artificial Intelligence in Aquaculture: Advancing Monitoring and Sustainability via Remote Sensing. In *Inland Aquaculture Sustainability and Effective Water Management Strategies: Optimizing Resources for Environmental Harmony* (pp. 69-85). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Roy, S. M., & Kumari, S. (2025). Integration of Artificial Intelligence in Aquaculture Water Management. In *Nano-solutions for Sustainable Water and Wastewater Management: From Monitoring to Treatment* (pp. 353-368). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Roy, D., Padhiary, M., Roy, P., & Barbhuiya, J. A. (2025). Artificial Intelligence-Driven Smart Aquaculture: Revolutionizing Sustainability through

- Automation and Machine Learning. *EthAIca: Journal of Ethics, AI and Critical Analysis*, (4), 398.
- Siddique, M. A. B., Mahalder, B., Haque, M. M., & Ahammad, A. S. (2025). Impact of climatic and water quality parameters on Tilapia (*Oreochromis niloticus*) broodfish growth: Integrating ARIMA and ARIMAX for precise modeling and forecasting. *PloS One*, 20(3), e0313846.
- Silviu, G. A. (2024, May). The Use of Artificial Intelligence in Industrial Management. In *International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering* (pp. 819-828). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Son, S.; Jeong, Y. An Automated Fish-Feeding System Based on CNN and GRU Neural Networks. *Sustainability* 2024, 16, 3675. <https://doi.org/10.3390/sul16093675>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/9/3675>
- Summak, M. E. (2024). Halkla İlişkilerde Yapay Zeka Kullanımı Ve Geleceğin İletişim Stratejilerinin Şekillendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Akşehir Meslek Yüksekokulu Sosyal Bilimler Dergisi*, (18), 70-80.
- Wang, C. M., Chu, Y., & Nguyen, H. P. (2024). Advancements in Offshore Aquaculture: Enhancing Environmental Sustainability and Elevating Seafood Production. In *World Conference on Floating Solutions* (pp. 3-11). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Wu, A. Q., Li, K. L., Song, Z. Y., Lou, X., Hu, P., Yang, W., & Wang, R. F. (2025). Deep Learning for Sustainable Aquaculture: Opportunities and Challenges. *Sustainability*, 17(11), 5084.
- Yadav, A. K., Das, K. K., Das, P., Raman, R. K., Kumar, J., & Das, B. K. (2020). Growth trends and forecasting of fish production in Assam, India using ARIMA model. *Journal of Applied and Natural Science*, 12(3), 415.
- Oğuz, S., & Yalçıntaş, D. (2024). A Review on The Use of Artificial Intelligence and Machine Learning Technologies in The Logistics Sector. *Trends in Business and Economics*, 38(4), 218-225.
- Yücel, M., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Kayabekir, A. E. (2021). An artificial intelligence-based prediction model for optimum design variables of reinforced concrete retaining walls. *International Journal of Geomechanics*, 21(12), 04021244.
- Esmer, Y., & Yüksel, M. (2024). Artificial Intelligence Entrepreneurship: A Conceptual Research. *JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy*, 9(2), 180-187.
- Zhang, R. (2025). *Integrated optimisation and control framework for sustainable aquaculture systems: design, operation, and multi-time scales planning* (Doctoral dissertation, University of Surrey), 261p.
- Zhao, S., Cai, K., Dong, Y., Feng, G., Wang, Y., Pang, H., & Liu, Y. (2025). Fish feeding behavior recognition via lightweight two stage network and satiety experiments. *Scientific Reports*, 15(1), 30025.
- Zlaugotne, B., Diaz Sanchez, F., Pubule, J., & Blumberga, D. (2023). Life cycle assessment of fish feed for oil alternatives-environmental impact of

microalgae, rapeseed and fish oil. *Agronomy Research* 21(3), 1351–1360, 2023 <https://doi.org/10.15159/AR.23.074>

Zuorro, A., García-Martínez, J. B., Barajas-Solano, A. F., Rodríguez-Lizcano, A., & Kafarov, V. (2023). Environmental Footprint of Inland Fisheries: Integrating LCA Analysis to Assess the Potential of Wastewater-Based Microalga Cultivation as a Promising Solution for Animal Feed Production. *Processes*, 11(11), 3255.

Bölüm 9

SUCUL CANLILARDA MİKROPLASTİK MARUZİYETİNE BAĞLI FİZYOLOJİK YANITLAR

Öğr. Gör. Dr. Elif PAÇAL¹

¹ Çankırı Karatekin Üniversitesi, Şabanözü Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Çevre Sağlığı ve Çevresel Risk Yönetimi Teknikerliği Programı, Çankırı, Türkiye.

Giriş

Dünya çapında insan kaynaklı atıkların birikmesi sucul çevre açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Plastikler sentetik veya yarı sentetik polimerlerdir. Plastik ürünlerin uygun maliyetli ve dayanıklı olması kullanım oranını büyük ölçüde arttırmaktadır. Dünya çapında plastik üretiminin 2010 yılında 265 milyon ton olduğunu (PlasticsEurope, 2011), 2015'te 60 ila 99 milyon tona ulaştığını, 2060'a kadar da 155-265 milyon tona ulaşabileceği öngörülmektedir (Dusaucy ve ark., 2021). Günümüzde en yaygın kullanılan sentetik plastikler düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS) ve polietilen tereftalat (PET). Bu plastikler toplamda dünya üretiminin yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır (Sul ve Costa., 2014). Plastik ürünler, fonksiyonel ve kimyasal performanslarını artırmak için kimyasallarla karıştırılmış temel polimerlerden üretilir (Dusaucy ve ark., 2021). Bu kimyasallar; plastikleştiriciler, stabilizatörler, dolgu maddeleri, alev geciktiriciler ve pigmentler gibi katkı maddelerini kapsar ve plastik ürünün mekanik dayanımını, esnekliğini, ısıl stabilitesini ve kullanım ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir (Murphy., 2001) Plastik atıklar, sert ve biyolojik olarak parçalanamayan doğaları nedeniyle deniz atıklarının %75'inden fazlasını oluşturmaktadır (Zhang ve diğerleri, 2021).

Plastik parçaların çeşitli çevresel etkilerle parçalanması sonucu oluşan mikroplastikler, küresel ölçekte önemli kirleticiler grubu olarak ≤ 5 mm'den küçük parçalar olarak tanımlanmaktadır. Çevreye salınan mikroplastik emisyonunun yılda 10 ila 40 milyon ton arasında olduğu tahmin edilmekte ve bu miktarın 2040 yılına kadar iki katına çıkabileceği öngörülmektedir. Emisyonları hemen durdurmak mümkün olsa bile, eski ürünlerin parçalanması nedeniyle miktarlar artmaya devam edecektir. Modelleme tahminleri mikroplastikler için 70 ila 100 yıl içinde geniş çaplı çevresel zarar potansiyeline işaret etmektedir, fakat maruz kalma ve etki verileri eksik olduğundan ayrıntılı risk değerlendirmeleri henüz sınırlı düzeydedir (Thompson ve ark., 2024). Mikroplastikler birincil ve ikincil kaynaklar olarak ikiye ayrılmaktadır. Birincil mikroplastik kaynaklarını kozmetik ve kişisel bakım ürünleri, sentetik tekstil lifleri, endüstriyel kullanım parçacıkları oluşturur. İkincil mikroplastik kaynakları büyük plastik atıkların çevresel etkilerle küçük parçalara ayrılması, balıkçılık ekipmanları ve ağlar, tek kullanımlık plastiklerdir (İbrahim ve ark., 2025). Mikroplastiklerin sucul ortamlarda bulunma düzeyleri gün geçtikçe artış göstermektedir. Okyanus suyu örneklerinde mikroplastik yoğunluğu $800-2.200$ parça/ m^3 düzeylerinde, açık denizlerde $\sim 10^{-4}$ ila 10^4 parça/ m^3 arasında, derin deniz suyunda >1.100 parça/ m^3 oranlarında bulunmaktadır (Zhao ve ark., 2025). Tatlı su örneklerinde $0.005\sim 1.1 \times 10^6$ parça/ m^3 oranlarında bulunduğu tespit edilmiştir (Ricciardi ve ark.,

2021). Kozmetiklerde bulunan mikroplastik parçacıkları, polyester ve poliamid gibi kumaşlardan gelen mikroplastik lifler (Browne ve ark., 2011) evsel atık sularda bulunur ve kanalizasyon arıtımı sırasında tutulmaz bu nedenle deniz ortamına kolayca girebilirler (Van Cauwenberghe ve ark., 2013). Mikroplastikler küçük boyutlar sayesinde, genellikle büyük deniz atıklarından etkilenmeyen organizmalar tarafından yutulabilir hale gelir. Sucul canlılarda mide bağırsak tıkanmasına, beslenme bozukluklarına, büyümeye, oksidatif strese, üreme ve gelişmeye, davranışsal ve fizyolojik bozukluklara neden olmaktadır (Liu ve Li., 2025; Hodkovicova ve ark. 2022). Sucul canlılar üzerinde yapılan çalışmalarda Zebra balığının (*Danio rerio*) 20 mg/L konsantrasyona maruziyeti sonucu karaciğerde lipid birikiminde artış, yüzme aktivitesinde %40 azalma olduğu tespit edilmiştir (Lu ve ark., 2016). Mavi midyenin (*Mytilus edulis*) 0.51 mg/L konsantrasyondaki maruziyette filtrasyon hızında %67 azalma, enerji rezervlerinde %20-25 azalma tespit edilmiştir (Browne ve ark., 2008). Mikroplastiklerin suda yaşayan canlılar üzerindeki potansiyel zararlı etkileri konusunda çalışmalar günümüzde devam etmektedir. Kitabın bu bölümünde mikroplastiklerin sucul canlılar üzerindeki fizyolojik etkileri konusunda yapılan çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur.

Dokularda Birikim ve Biyoakümüülasyon

Mikroplastikler sucul sistemdeki canlılar tarafından biyoakümüüle olarak, gastrointestinal sistemde birikebilir, biyolojik bariyerleri aşabilir, dolaşım veya lenfatik sistem yoluyla diğer iç organlara geçebilirler (Zeng ve ark., 2023). Mikroplastiklerin yutulması doğrudan veya dolaylı tüketim yollarıyla gerçekleşebilir. Doğrudan tüketim, organizmaların plastikleri sindirilebilir besin maddeleriyle karıştırıp kasıtlı olarak yemeleri, ayırım gözetmeksizin filtreleyerek beslenmeleri, tüy temizleme veya içme sırasında kazara yutmaları durumunda meydana gelir. Dolaylı beslenme ise canlıların mikroplastiklerle etkileşime girmiş (tüketmiş veya takılmış) bir avı yemeleri ve bu durumun daha üst düzey organizmalarda mikroplastik birikimini teşvik etmesi durumunda gerçekleşmektedir (Mchale ve Sheehan., 2024). Besin zincirinde küçük balıklar mikroplastik içeren zooplanktonları yutarlar böylece besin zincirinin trofik transferi yoluyla mikroplastikler büyük balıklara kadar ulaşmış olur (Zuo ve ark., 2025). Sucul canlılarda solungaçlar yüzey alanı, mikrovili aktivitesiyle suda bulunan mikroplastiklerin alınması için bir yol sağlar. Sucul türler arasındaki morfolojik ve fizyolojik farklılıklar, mikroplastiklerin biyodağılım ve biyoakümüülasyon özelliklerinde farklılıklara neden olmaktadır. Çalışmalar, dokularda mikroplastik birikiminin su canlıları üzerinde olumsuz etkilere neden olacağını göstermektedir (D'Costa., 2022). Su ortamına ulaştıktan sonra mikroplastikler, ortamda hâlihazırda bulunan

kalıcı organik kirleticileri adsorbe etme konusunda yüksek bir kapasiteye sahiptir. Bu mikroplastik parçacıkların balıklar tarafından yutulması durumunda, üzerlerinde taşınan toksik maddeler de eş zamanlı olarak canlının vücuduna alınmaktadır. Bu kimyasalların en azından bir kısmı, yutulmalarının ardından balıklar üzerinde doğrudan toksik etkilere yol açmakta ve besin zinciri boyunca taşınarak biyoakümülyasyon gösterebilmektedir (Jovanović., 2017). Sindirim sisteminde mikroplastik birikimi, su canlılarında tıkanmalara ve mekanik yaralanmalara neden olabilir, bu durum beslenmenin azalmasına, davranış bozukluklarına, büyüme ve gelişmenin engellenmesine neden olmaktadır (Zeng ve ark., 2023). Balıklar üzerinde yapılan çalışmalarda histolojik analiz sonucu hücresel mukoza nekrozu, bağırsak epitelinin zarar görmesi, vakuolizasyonu olmak üzere önemli hücre ve doku hasarlarına neden olduğu tespit edilmiştir (Putri ve ark., 2023; Yan ve ark., 2025). Sucul canlılarda mikroplastiklerin dokuda birikimi ve biyoakümülyasyonu sonucu oluşan etkilerle ilgili araştırma bulguları tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Sucul canlılarda mikroplastiklerin dokuda birikimi ve biyoakümülyasyonu sonucu oluşan etkiler

Türler	Yutulan Mad-denin Boyutu	Konsantras-yon	Etkileri	Referans
Yeşil alg (<i>Scenedesmus spp.</i>)	130 µm PVC	Ağırlıkça %0-5	Yutma miktarında azalma, fagositoz aktivitesinde azalma	Wright ve ark., 2013
Mavi midye (<i>Mytilus edulis</i>)	30 nm PS	0, 0.1, 0.2, ve 0.3 g L ⁻¹	Filtreleme kapasitesi azaldı, yutma etkilendi	Wegner ve ark., 2012
Su piresi (<i>Daphnia magna</i>)	Polycarbonate (PC), PVC, PU, PE, LDPE, PMMA, PET, HDPE, PTFE, acrylonitrile butadiene styrene (ABS), MDPE, PP	70e- 100 g/L ⁻¹	Ölüm gözlemlendi	Lithner ve ark., 2009
Norveç ıstakozu (<i>Nephrops norvegicus</i>)	5 mm PP fiber	10 fiber	Yutma azaldı	Murray ve Cowie 2011
Su piresi (<i>Daphnia magna</i>)	0.194 µm	1; 5; 10; 30 mg/L+ 1; 2; 3; 4; 5 mg/L Zn	Organlarda toksisite	Kim ve ark., 2017

Zebra balığı (<i>Danio rerio</i>)	10-106 µm PE	10, 100, 1000 mg/L+ 0.001 Cd	Bağırsaklarda, solungaçlarda ve vücutta birikim	Khan ve ark., 2015
--	--------------	------------------------------------	--	-----------------------

Sindirim Sistemi Üzerindeki Etkiler

Mikroplastikler, dünya genelinde birçok deniz türü tarafından doğrudan yutulabilmektedir (Klangnurak ve Chunniyom., 2020). Kopepodlar, çift kabuklular, balık ve balinalar gibi çok sayıda filtreyle beslenen canlı türü, çevredeki sularda yüzen mikroplastikleri aktif olarak hedefleyebilir veya pasif olarak yutabilmektedirler (Egbeocha ve ark., 2018). Mikroplastikler, sucul canlılarda gastrointestinal sistemde (mide ve bağırsak) birikerek hücreler aracılığıyla dolaşım sistemine geçer, solungaç, karaciğer ve kas gibi diğer dokulara taşınabilir (Hollerová ve ark., 2021). Balıkların mikroplastik yutmasının en belirgin sonuçlarından biri, sindirim organlarında fiziksel tıkanmalara yol açarak besin alımını ve sindirim süreçlerini olumsuz yönde etkilemesidir (Jovanović., 2017). Balıklar ve kabuklular da dahil olmak üzere çok çeşitli deniz canlıları, mikroplastikleri kolayca tüketebilir bu durum beslenme verimliliğini düşürür, yetersiz beslenmeye veya ölüme neden olabilmektedir. Yutulan mikroplastikler bağırsak astarına zarar vererek besin emilimini ve metabolik süreçleri bozabilir (Deepthimahanthi ve ark., 2025). Baltık Denizi'ndeki mavi midyeler (*Mytilus torculas*) üzerinde yapılan bir vaka çalışmasında, mikroplastiklerin etkisini incelemek için 500 midye örneği toplanmış ve örneklerin yaklaşık %75'inde bağırsak astarında mikroplastik biriktiği tespit edilmiştir. Sadece tıkanmalar değil, besin emiliminde %30'dan fazla azalma görülmüş, bu da doğal yaşam alanlarını simüle eden deneysel koşullarda büyüme hızında azalmaya, üreme verimsizliğine ve ölüm oranında artışa neden olmuştur (Lusher ve ark., 2017). Çiftlik beyaz balığı (*Coregonus peled*) 5, 50, 500 µg/L⁻¹ konsantrasyonlarda polistiren mikroplastiklere maruz kalması sonucu pankreatik sindirim enzimlerinde artış, bağırsak enzimlerinde dengesizlik tespit edilmiştir (Frank ve ark., 2023). *Tigriopus japonicus* türünün 24 saatlik mikroplastik maruziyeti sonucu EC50 değeri 57-59 mg/L olarak tespit edilmiş, yutma inhibe olmuştur (Yu ve ark., 2020). Bu çalışmalara dayanarak mikroplastiklerin sindirim sistemi üzerinde ciddi zararlı etkileri olduğunu söylemek mümkündür.

Hücresel ve Metabolik Etkiler

Mikroplastik kirliliğinin sucul ekosistemlerde giderek artması, sucul canlılarda oksidatif stresin artması, hücresel hasar, enerji metabolizmasının bozulması ve antioksidan savunma sistemlerinde değişimler gibi

çeşitli hücrel ve metabolik etkilerle ilişkilendirilmektedir (Wright ve ark., 2013; de Sá ve ark., 2018; Frank ve ark., 2023). Örneğin, Çiftlik beyaz balığı (*Coregonus peled*) larvalarında 2 µm polistiren mikroplastiklerle yapılan çalışmalarda αamylase ve trypsin gibi sindirim enzimlerinin aktivitesinde 24–144 saat içinde anlamlı artışlar gözlemlenmiştir (Frank et al., 2023). Mikroplastikler sucul ortamlarda birikmesi bu parçacıklar ve üzerlerine adsorbe olmuş kirleticilerin, besin zinciri boyunca taşınarak organizmalarda metabolik fonksiyonların aksamasına yol açabilir (Pal ve ark., 2025). Balıklarla yapılan çalışmalarda mikroplastiklere adsorbe olmuş PAH'lar (Polisiklik aromatik hidrokarbonlar) karaciğerde; sitokrom P450 enzimlerinin aşırı uyarılmasına neden olmuştur (Rochman ve ark., 2013). Mikroplastiklerin farklı sucul canlıların hücrel ve metabolik sistemi üzerindeki etkileriyle ilgili bazı araştırma bulguları tablo 1.1.'de sunulmuştur.

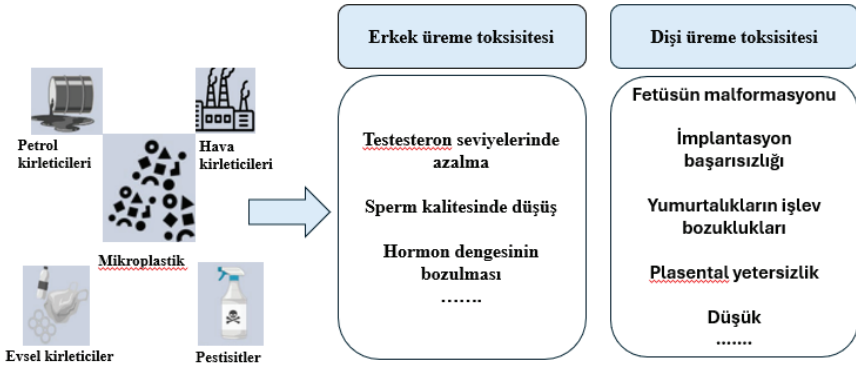
Tablo 2. Mikroplastiklerin sucul canlıların hücrel ve metabolik sistemi üzerindeki etkileri

Türler	Konsantras-yon	Maruz Kalma	Etkileri	Referans
Yeşil alg (<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>)	10–200 mg/L PVC	0, 24, 48, 72 and 96 h	Antioksidatif enzimlerde artış	Wang ve ark., 2020
Nil tilapyası (<i>Oreochromis niloticus</i>)	500 µ g/L PS	7-14 gün	FAS, ATP, ACC, LPL, TC, TG, EROD, ROS, SOD, TNFα, IL-1β) artışı karaciğer hasarına neden olmuştur	Zheng ve ark., 2024
Su piresi (<i>Daphnia magna</i>)	20, 60 and 100 mg/L PE	24 saat	Metabolit üretimini, enerji, lipid ve amino asit etkilenmiştir	Wang ve ark., 2022
Pirinç yılan balığı (<i>Monopterus albus</i>)	0.5, 1, 5, and 10 mg/ L PS	28 gün	Sinir sistemiyle ilgili metabolitler etkilenmiştir	Yao ve ark., 2024
Akoya istiridyesi (<i>Pinctada fucata martensii</i>)	15 mg/L PVC	1-15 gün	Lipit, karbonhidrat, amino asit ve enerji metabolizması etkilenmiştir	Lu ve ark., 2024

Tatlısu kereviti (<i>Procambarus clarkii</i>)	100 µg/L ⁻¹ PS	3 gün	Bağışıklık tepkisi, oksidatif stres, gen transkripsiyonu ve translatasyonu	Capanni ve ark., 2021
Kıllı yengeç (<i>Eriocheir sinensis</i>)	40–40,000 µg/L ⁻¹	21 gün	ACHe, GPT, GOT, SOD, GSH, CAT, GPx aktivite-lerinde azalma	Yu ve ark., 2018

Üreme Sistemi Üzerindeki Etkiler

Mikroplastik kirliliği, sucul organizmaların üreme sistemleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturmakta; hormon düzeylerini etkilemekte, gamet gelişimini engellemekte ve üreme oranlarını düşürmektedir (Sussarellu ve ark., 2016; Pitt ve ark., 2018). Üreme toksisitesi türlerin hayatta kalmasıyla yakından bağlantılıdır (Lee ve ark., 2025). Mikroplastiklerin neden olabileceği üreme toksisite bozuklukları Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Mikroplastiklerin ve diğer çevresel kirleticilerin neden olduğu erkek ve dişi üreme sistemi toksisitesi (Lee ve ark., 2025).

Mikroplastiklerin neden olduğu üreme bozuklukları, suda yaşayan türlerde gözlemlenmiştir ve bu durum, mikroplastiklerin üreme dokularında birikmesine bağlanmaktadır (Dubey ve ark., 2022). Mikroplastiklerin farklı sucul canlıların üreme sistemi üzerindeki etkileriyle ilgili bazı araştırma bulguları tablo 3.’de sunulmuştur.

Tablo 3. Mikroplastiklerin sucul canlıların üreme sistemi üzerindeki etkileri

Türler	Konsantrasyon	Maruz Kal- ma	Etkileri	Referans
Zebra balığı (<i>Danio rerio</i>)	100 ve 1000 µg/L PS	21 gün	Testis apopto- zunda artış	Qiang ve Cheng., 2021
Su piresi (<i>Daphnia magna</i>)	4000 mg/L PV- C-MPs	21 gün	Dişi başına toplam yavru sayısını azalmış, ilk yavruya kadar geçen gün sayısı- nı uzamıştır	Liu ve ark., 2022
Kopepod (<i>Calanus helgolandicus</i>)	75 mikroplastik/ mL ⁻¹ PS,	24 saat	Üreme verimliliğinde azalma tespit edildi	Cole ve ark., 2015
Akdeniz midyesi (<i>Mytilus gallopro- vincialis</i>)	0.0005, 0.1, 1, 10, ve 100 mg/L PET	32 gün	Midyelerde seks hormonları öst- radiol ve testeste- ron seviyelerinin azaldığı tespit edilmiştir	Choi ve ark., 2022
japon istiridyesi (<i>Crassostrea gigas</i>)	0.023 mg·L ⁻¹ PS	2 ay	Sperm hızında azalma, gamet ve oosit kalitesinde düşüş tespit edil- miştir	Sussarellu ve ark., 2016
Pirinç balığı (<i>Oryzias melastig- ma</i>)	(20 and 200 mg/L PS	60 gün	Kuluçka süresin- de uzama sonrası yumurtadan çıkma oranının azalması	Wang ve ark., 2019
Büyük karides (<i>Prawn</i>)	2 and 20 mg/L PS	96 saat	Testis germ hü- creslerinin kalitesi ve seks hormon- larının değişme- siyle yumurta çıkma azalır ve larvaların hayat- ta kalma oranı düşer	Sun ve ark., 2022
Meksika tatlı su karidesi (<i>Hyaella azteca</i>)	5000; 10,000 MPs/ mL PE	28 ve 42 gün	Dişi üreme sis- teminde engel- lenme	Au ve ark., 2015
Nil tilapyası (<i>Ore- ochromis niloticus</i>)	10 mg/L	15 gün	Testosteron sevi- yelerinde düşüş ve testislerde dejeneratif deği- şiklikler	İsmail ve ark., 2021

Sonuç

Günümüzde literatürdeki çalışmalar mikroplastiklerin tatlı su ve deniz ekosistemlerinde yaygın olarak bulunduğunu ve sucul canlılar tarafından kolaylıkla alınabildiğini ortaya koymaktadır. Mikroplastiklerin sucul ekosistem üzerindeki zararlı etkileri acil müdahale gerektiren önemli bir çevre sorunudur (Deepthimahanthi ve ark., 2025). Mikroplastiklerin fiziksel varlığına ek olarak, bu parçacıkların yüzeylerine adsorbe olmuş ağır metaller, pestisitler ve hidrofobik organik kirleticiler, besin zinciri boyunca taşınarak biyobirikime neden olmaktadır (Lu ve ark., 2016). Mikroplastik maruziyetinin sucul canlılarda oksidatif stresin artması, antioksidan enerji ile lipid metabolizmasında bozulmalarla ilişkili olduğunu göstermiştir. Özellikle karaciğer, bağırsak ve solungaç gibi metabolik açıdan aktif dokularda gözlenen bu etkiler, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel bir kirletici değil, aynı zamanda hücresel ve metabolik fonksiyonları olumsuz yönde etkileyen kompleks bir stres faktörü olduğunu ortaya koymaktadır (Rochman ve ark., 2103). Fizyolojik süreçlerin bozulmasıyla sucul canlıların hayatta kalma oranları ve biyoçeşitlilik azalma yönünde eğilim göstermektedir (Deepthimahanthi ev ark., 2025). Bu bulgular, mikroplastik kirliliğinin ekosistem sağlığı ve trofik transfer yoluyla üst düzey organizmalar üzerindeki potansiyel risklerini vurgulamakta ve bu alanda uzun dönemli ve çok disiplinli çalışmaların gerekliliğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Au, S.Y., Bruce, T.F., Bridges, W.C., Klaine, S.J. (2015). Responses of *Hyalella azteca* to acute and chronic microplastic exposures. *Environ. Toxicol. Chem.* 34, 2564–2572.
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental science & technology*, 45(21), 9175-9179.
- Capanni, F., Greco, S., Tomasi, N., Giulianini, P. G., & Manfrin, C. (2021). Orally administered nano-polystyrene caused vitellogenin alteration and oxidative stress in the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*). *Science of the Total Environment*, 791, 147984.
- Choi, J. S., Kim, K., Park, K., & Park, J. W. (2022). Long-term exposure of the Mediterranean mussels, *Mytilus galloprovincialis* to polyethylene terephthalate microfibers: Implication for reproductive and neurotoxic effects. *Chemosphere*, 299, 134317.
- Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2015). The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus*. *Environmental science & technology*, 49(2), 1130-1137.
- D’Costa, A.H. (2022). Microplastics in decapod crustaceans: accumulation, toxicity and impacts, a review. *Sci. Total Environ.* 832, 154963.
- De Sá, L. C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T. L., & Futter, M. N. (2018). Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: what do we know and where should we focus our efforts in the future?. *Science of the total environment*, 645, 1029-1039.
- Deeppthimahanthi, D., Narsaiah, S., Mubeen, A., Deekshitha, C., Nashath, J., & Ali, M. A. (2025). Physiological Effects of Microplastic on Marine Organisms. *Cuestiones de Fisioterapia*, 54(4), 1618-1634.
- do Sul, J. A. I., & Costa, M. F. (2014). The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental pollution*, 185, 352-364.
- Dubey, I., Khan, S., & Kushwaha, S. (2022). Developmental and reproductive toxic effects of exposure to microplastics: A review of associated signaling pathways. *Frontiers in Toxicology*, 4, 901798.
- Dusaucy, J., Gateuille, D., Perrette, Y., & Naffrechoux, E. (2021). Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environmental Pollution*, 284, 117075.
- Egbeocha, C. O., Malek, S., Emenike, C. U., & Milow, P. (2018). Feasting on microplastics: ingestion by and effects on marine organisms. *Aquatic Biology*, 27, 93-106.
- Frank, Y. A., Interesova, E. A., Solovyev, M. M., Xu, J., & Vorobiev, D. S. (2023). Effect of microplastics on the activity of digestive and oxidative-stress-related enzymes in peled whitefish (*Coregonus peled* Gmelin) larvae. *International journal of molecular sciences*, 24(13), 10998.

- Hodkovicova, N., Hollerova, A., Svobodova, Z., Faldyna, M., & Faggio, C. (2022). Effects of plastic particles on aquatic invertebrates and fish—a review. *Environmental toxicology and pharmacology*, 96, 104013.
- Hollerová, A., Hodkovicová, N., Blahová, J., Faldyna, M., Maršálek, P., & Svobodová, Z. (2021). Microplastics as a potential risk for aquatic environment organisms—a review. *Acta Veterinaria Brno*, 90(1), 99-107.
- Ibrahim, N., Rahman, A. M. N. A. A., Shafiq, M. D., Lockman, Z., Jaafar, M., & Kameda, Y. (2025). Microplastic Pollution: Sources, Degradation Mechanisms, Analytical Advances, and Mitigation Strategies for Environmental Sustainability. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 263(1), 1-42.
- Ismail, R.F., Saleh, N.E., Sayed, A.E.H. (2021). Impacts of microplastics on reproductive performance of male tilapia (*Oreochromis niloticus*) pre-fed on *Amphora coffeaeformis*. *Environ. Sci. Pollut. Res Int*
- Jovanović, B. (2017). Ingestion of microplastics by fish and its potential consequences from a physical perspective. *Integrated environmental assessment and management*, 13(3), 510-515.
- Khan, F. R., Syberg, K., Shashoua, Y., & Bury, N. R. (2015). Influence of polyethylene microplastic beads on the uptake and localization of silver in zebrafish (*Danio rerio*). *Environmental Pollution*, 206, 73–79.
- Klangnurak, W., & Chunniyom, S. (2020). Screening for microplastics in marine fish of Thailand: the accumulation of microplastics in the gastrointestinal tract of different foraging preferences. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(21), 27161-27168.
- Lee, H., Park, J., Hong, T., & Song, G. (2025). Impact and mechanisms of microplastics and nanoplastics on the reproductive system. *Molecular & Cellular Toxicology*, 21(2), 339-350.
- Liu, J., & Li, C. (2025). Impact of Microplastics on Aquatic Ecosystems. *Water*, 17(14), 2124.
- Liu, Y., Zhang, J., Zhao, H., Cai, J., Sultan, Y., Fang, H., ... & Ma, J. (2022). Effects of polyvinyl chloride microplastics on reproduction, oxidative stress and reproduction and detoxification-related genes in *Daphnia magna*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 254, 109269.
- Lu, F., Li, Z., Yang, C., Liao, Y., Mkuye, R., & Deng, Y. (2024). Impact of polyvinyl chloride microplastic exposure on the hepatopancreas metabolism of *Pinctada fucata martensii*: Insights from metabolomics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 304, 108827.
- Lu, Y., Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., ... & Ren, H. (2016). Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver. *Environmental science & technology*, 50(7), 4054-4060.

- Lusher, A. L., Hollman, P. C. H., & Mendoza, A. (2017). Microplastic in the gastrointestinal tract of marine organisms: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), 62-70.
- McHale, M. E., & Sheehan, K. L. (2024). Bioaccumulation, transfer, and impacts of microplastics in aquatic food chains. *Journal of Environmental Exposure Assessment*, 3(3), N-A.
- Murphy, J. (Ed.). (2001). *Additives for plastics handbook*. Elsevier.
- Pal, D., Prabhakar, R., Barua, V. B., Zekker, I., Burlakovs, J., Krauklis, A., ... & Vincevica-Gaile, Z. (2025). Microplastics in aquatic systems: A comprehensive review of its distribution, environmental interactions, and health risks. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(1), 56-88.
- Pitt, J. A., Trevisan, R., Massarsky, A., Kozal, J. S., Levin, E. D., & Di Giulio, R. T. (2018). Maternal transfer of nanoplastics to offspring in zebrafish (*Danio rerio*): a case study with nanopolystyrene. *Science of the Total Environment*, 643, 324-334.
- PlasticsEurope, 2011. Plastics - the Facts 2011: an Analysis of European Plastics Production, Demand and Recovery for 2010 (last accessed: 01.13.2021). <https://www.plasticseurope.org/fr/resources/market-data>.
- Putri, R. R. R. A. D., Retnoaji, B., & Nugroho, A. P. (2023). Accumulation of Microplastics and Histological Analysis on Marine Fish from Coastal Waters of Baru and Trisik Beaches, Special Region of Yogyakarta: 10.32526/enrj/21/202200207. *Environment and Natural Resources Journal*, 21(2), 153-170.
- Qiang, L., & Cheng, J. (2021). Exposure to polystyrene microplastics impairs gonads of zebrafish (*Danio rerio*). *Chemosphere*, 263, 128161.
- Ricciardi, M., Pironti, C., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., & Montano, L. (2021). Microplastics in the aquatic environment: occurrence, persistence, analysis, and human exposure. *Water*, 13(7), 973.
- Rochman, C. M., Manzano, C., Hentschel, B. T., Simonich, S. L. M., & Hoh, E. (2013). Polystyrene plastic: a source and sink for polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment. *Environmental science & technology*, 47(24), 13976-13984.
- Sun, S., Jin, Y., Luo, P., and Shi, X. (2022). Polystyrene microplastics induced male reproductive toxicity and transgenerational effects in freshwater prawn. *Sci. Total Environ.* 842, 156820.
- Sussarellu, R., Suquet, M., Thomas, Y., Lambert, C., Fabioux, C., Pernet, M. E. J., ... & Huvet, A. (2016). Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proceedings of the national academy of sciences*, 113(9), 2430-2435.
- Thompson, R. C., Courtene-Jones, W., Boucher, J., Pahl, S., Raubenheimer, K., & Koelmans, A. A. (2024). Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned?. *Science*, 386(6720), ead12746.

- Van Cauwenberghe, L., Vanreusel, A., Mees, J., & Janssen, C. R. (2013). Microplastic pollution in deep-sea sediments. *Environmental pollution*, 182, 495-499.
- Wang, J., Li, Y., Lu, L., Zheng, M., Zhang, X., Tian, H., ... & Ru, S. (2019). Polystyrene microplastics cause tissue damages, sex-specific reproductive disruption and transgenerational effects in marine medaka (*Oryzias melastigma*). *Environmental Pollution*, 254, 113024.
- Wang, Q., Wangjin, X., Zhang, Y., Wang, N., Wang, Y., Meng, G., & Chen, Y. (2020). The toxicity of virgin and UV-aged PVC microplastics on the growth of freshwater algae *Chlamydomonas reinhardtii*. *Science of the Total Environment*, 749, 141603.
- Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environmental pollution*, 178, 483-492.
- Yan, Z., Yang, Y., Xiang, J., Chen, Y., Zhu, P., Yuan, S., ... & Ma, Y. (2025). Exposure routes induce differential intestinal damage in zebrafish from polystyrene microplastics. *Process Safety and Environmental Protection*, 197, 107020.
- Yao, C., Liu, C., Hong, S., Zhou, J., Gao, Z., Li, Y., ... & Zhou, W. (2024). Potential nervous threat of nanoplastics to *Monopterus albus*: implications from a metabolomics study. *Science of The Total Environment*, 910, 168482.
- Yu, J., Tian, J. Y., Xu, R., Zhang, Z. Y., Yang, G. P., Wang, X. D., ... & Chen, R. (2020). Effects of microplastics exposure on ingestion, fecundity, development, and dimethylsulfide production in *Tigriopus japonicus* (Harpacticoida, copepod). *Environmental Pollution*, 267, 115429.21-
- Yu, P., Liu, Z., Wu, D., Chen, M., Lv, W., Zhao, Y. (2018). Accumulation of polystyrene microplastics in juvenile *Eriocheir sinensis* and oxidative stress effects in the liver. *Aquat. Toxicol.* 200, 28–36
- Zeng, Y., Deng, B., Kang, Z., Araujo, P., Mjøs, S. A., Liu, R., ... & Qu, Y. (2023). Tissue accumulation of polystyrene microplastics causes oxidative stress, hepatopancreatic injury and metabolome alterations in *Litopenaeus vannamei*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 256, 114871.
- Zhang, Q. Q., Ma, Z. R., Cai, Y. Y., Li, H. R., & Ying, G. G. (2021). Agricultural plastic pollution in China: Generation of plastic debris and emission of phthalic acid esters from agricultural films. *Environmental science & technology*, 55(18), 12459-12470.
- Zhao, S., Kvale, K. F., Zhu, L., Zettler, E. R., Egger, M., Mincer, T. J., ... & Stubbins, A. (2025). The distribution of subsurface microplastics in the ocean. *Nature*, 641(8061), 51-61.
- Zheng, Y. et al., Integrated transcriptomics and proteomics analyses reveal the ameliorative effect of hepatic damage in tilapia caused by polystyrene microplastics with chlorella addition, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 285 (2024) 117076.

Zuo, Y., Ma, L., Liu, Z., Li, S., Zhang, Z., & Yu, J. (2025). Environmental risks of microplastics: A Review of their distribution and effects on aquatic ecosystems. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 77(4).

//

Bölüm 10

SU KALİTESİ VE EKOSİSTEM SAĞLIĞI

Gözde ŞAVRAN¹, Fahrettin KÜÇÜK²

1 Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temel Bilimleri Anabilim Dalı. ORCID: 0000-0003-0053-964X

2 Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Temel Bilimleri Bölümü. ORCID: 0000-0002-0470-9063

1. Giriş

Tatlısu ekosistemleri, küresel ölçekte hem biyolojik çeşitlilik hem de insanlar için sağladıkları çok yönlü ekosistem hizmetleri bakımından büyük önem taşımaktadır (Wetzel, 2001). Nehirler, göller, baraj gölleri ve sulak alanlar; içme ve kullanma suyu temini, tarımsal sulama, hidro-elektrik üretimi, balıkçılık, taşımacılık ve rekreasyon gibi çok çeşitli hizmetler sunar (Apostolaki vd., 2020). Bu hizmetlerin kapsamı ve önemi, son yıllarda ekosistem hizmetleri yaklaşımı çerçevesinde ayrıntılı biçimde tartışılmaktadır (Deeksha ve Shukla, 2022).

Buna karşın, tatlısu ekosistemleri alan ve hacim olarak küresel su kaynaklarının küçük bir bölümünü oluşturmalarına rağmen, insan kaynaklı baskılara en fazla maruz kalan sistemler arasındadır (Reid vd., 2019). Nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme, tarımda yoğun gübre ve pestisit kullanımı, arazi örtüsündeki değişimler ve iklim değişikliği; su miktarı ve kalitesi üzerinde çok yönlü baskılar oluşturarak tatlısu ekosistemlerinin yapısını ve işleyişini değiştirmektedir (Cantonati vd., 2020). Küresel ölçekte tartışılan su güvenliği ve su yönetimi sorunları, bu baskıların giderek arttığını göstermektedir (Koç, 2024).

Evsel, endüstriyel ve tarımsal kaynaklı kirlilik yükleri; suya taşınan besin tuzları, organik ve inorganik kirleticiler, sediment birikimi ve ısıl kirlilik gibi süreçler aracılığıyla suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirirken, bu değişimler aynı zamanda tatlısu ekosistemlerinin biyolojik bileşenlerini ve besin ağlarının yapısını da etkilemektedir (Wetzel, 2001). Sucul toplulukların çeşitliliğindeki azalmalar, duyarlı türlerin kaybı, istilacı türlerin yayılması ve habitat parçalanması, tatlısu biyoçeşitliliği için başlıca tehditler arasında sayılmaktadır (Reid vd., 2019). Bu nedenle, su kaynaklarının yönetiminde yalnızca kullanım odaklı kriterlerin değil, ekosistem bütünlüğünün ve tatlısuya bağlı ekosistem hizmetlerinin korunmasının da dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Tockner, 2021).

Geleneksel yaklaşımlarda su kalitesi çoğunlukla bazı fiziksel ve kimyasal ölçümler üzerinden tanımlanmıştır. Çözünmüş oksijen, sıcaklık, pH, iletkenlik, askıda katı madde, besin tuzları ve ağır metaller gibi parametreler, bir su kütlesinin “iyi” ya da “zayıf” olarak sınıflandırılmasında temel göstergeler olarak kullanılmıştır (Omer, 2019). Ancak Tatlısu ekosistemlerinin, türler arası ilişkilerle örülü karmaşık besin ağlarına sahip canlı sistemler olduğu gerçeği, su kalitesinin ekolojik boyutlarını da dikkate alan yeni bir bakış açısını zorunlu kılmaktadır (Kazancı, 2008). Bu nedenle “su kalitesi” kavramı, giderek daha fazla “ekolojik kalite” ve “eko-

sistem sağlığı” kavramlarıyla birlikte, tatlısu ekosistemlerinin bütüncül yapısını dikkate alan bir çerçevede ele alınmaktadır (O’Brien vd., 2016).

Ekosistem sağlığı yaklaşımı, tatlısu ekosistemlerinin durumunu değerlendirirken yalnızca kimyasal ve fiziksel parametreleri değil; biyoçeşitlilik düzeyleri, tür bileşimi, işlevsel grupların dengesi, enerji ve madde döngüleri, sistemin dış baskılara karşı gösterdiği direnç ve bozulma sonrasında toparlanma kapasitesini de dikkate alır (Sandin ve Solimini, 2009). Böylece, su kalitesindeki değişimlerin ekosistem yapısı ve işleyişi üzerindeki etkileri daha iyi anlaşılabilir ve uzun vadeli sonuçlar daha sağlıklı biçimde öngörülebilir. Örneğin, besin tuzlarının artmasına bağlı su zenginleşmesi, yalnızca fosfor ya da azot derişimindeki artışla değil; fitoplankton ve su bitkisi topluluklarındaki değişimler ve çözünmüş oksijen dalgalanmalarıyla birlikte ele alındığında, ekosistem sağlığı üzerindeki etkisi daha bütüncül biçimde değerlendirilebilir (Smith, 2003; Dodds ve Smith, 2016).

Bu bölümde, tatlısu kalitesi ile ekosistem sağlığı arasındaki ilişkiler ekolojik temelleri, değerlendirme yaklaşımları ve yönetim boyutlarıyla birlikte ele alınacaktır. İlk olarak tatlısu kalitesinin temel fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşenleri özetlenecek; ardından ekosistem sağlığı ve ekolojik bütünlük kavramlarının tatlısu ekosistemleri bağlamındaki yeri tartışılacaktır. Daha sonra, su kalitesinde meydana gelen bozulmaların ekosistem düzeyinde yol açtığı yapısal ve işlevsel değişimler ana hatlarıyla ele alınacak; izleyen bölümlerde değerlendirme, izleme ve yönetim yaklaşımlarına odaklanılacaktır.

2. Tatlısu Kalitesinin Temel Kavramları

2.1. Fiziksel ve kimyasal su kalitesi değişkenleri

Tatlısu kalitesinin değerlendirilmesinde fiziksel ve kimyasal değişkenler uzun süredir temel bileşenler olarak kullanılmaktadır. Sıcaklık, çözünmüş oksijen, pH, elektriksel iletkenlik, bulanıklık, askıda katı madde, besin tuzları ve çeşitli iz elementler, su kalitesini belirleyen başlıca parametrelerdir (Omer, 2019). Bu değişkenler, bir su kütlesinin ekolojik durumunu ve suyun farklı kullanımlar için uygunluğunu belirlemede birlikte değerlendirilir.

Sıcaklık, sucul ekosistemlerde biyokimyasal süreçlerin hızını, çözünmüş oksijen düzeylerini ve türlerin yaşama koşullarını doğrudan etkiler (Wetzel, 2001). Çözünmüş oksijen ise hem balıklar hem de omurgasızlar için yaşamsal öneme sahiptir ve organik madde yükü, suyun karışma durumu ve sıcaklıkla yakından ilişkilidir (Omer, 2019). pH ve elektriksel iletkenlik, suyun asit–baz dengesini ve iyon içeriğini yansıtarak hem je-

olojik arka plan hem de antropojenik girdiler hakkında fikir verir (Jaffar vd., 2020).

Besin tuzları, özellikle azot ve fosfor bileşikleri, tatlısulara üretim süreçlerinin ve ötrofikasyon potansiyelinin belirlenmesinde kritik rol oynar. Akarsu ve göl sistemlerinde azot ve fosfor derişimindeki artış, fitoplankton ve su bitkilerinin aşırı çoğalmasına, su saydamlığının azalmasına ve çözünmüş oksijen düzeylerinde dalgalanmalara yol açabilir (Dodds ve Smith, 2016). Bu süreç, su zenginleşmesi veya ötrofikasyon olarak tanımlanır ve dünya genelinde başlıca su kalitesi sorunlarından biri olarak kabul edilmektedir (Smith, 2003).

Ötrofikasyonun gelişimi, yalnızca besin tuzu yüklerine bağlı değildir; iklim koşulları, suyun hidrodinamiği ve havza özellikleri de süreci belirgin biçimde etkiler (Jones ve Brett, 2014). Özellikle durgun veya yavaş akışlı sularda, yüksek fosfor ve azot yükleri ile artan su sıcaklıkları birlikte değerlendirildiğinde, toksik siyanobakteri çoğalmaları ve uzun süreli oksijen yetersizliği gibi ciddi sonuçlar ortaya çıkabilmektedir (Doğan-Sağlamtimur ve Sağlamtimur, 2018). Bu nedenle azot ve fosfor derişimlerinin düzenli olarak izlenmesi, tatlısu kalitesinin korunmasında temel bir yönetim aracı olarak görülmektedir (Kapsalis ve Kalavrouziotis, 2021).

Sonuç olarak fiziksel ve kimyasal parametreler, tatlısu kalitesinin temel yapı taşlarını oluşturmakta ve su kütlelerinin hem kimyasal durumunun hem de ekosistem sağlığının ön değerlendirmesinde vazgeçilmez bir rol oynamaktadır (Omer, 2019; Ayar vd., 2025).

2.2. Biyolojik bileşenler ve gösterge topluluklar

Tatlısu ekosistemlerinde su kalitesinin ve ekosistem sağlığının değerlendirilmesinde biyolojik bileşenler giderek daha fazla kullanılmaktadır. Makroomurgasızlar, balıklar, fitoplankton, perifiton ve sucul bitkiler hem kirliliğe duyarlılık düzeyleri hem de yaşam döngüleri gereği belirli baskı türlerini ve su kalitesindeki değişimleri yansıtan biyolojik göstergeler olarak öne çıkar (Wetzel, 2001).

Makroomurgasızlar, özellikle akarsu ekosistemlerinde biyolojik izleme çalışmalarının temel bileşenlerinden biridir. Farklı grupların organik kirlilik, besin zenginleşmesi, oksijen azlığı ve habitat bozulması gibi etkenlere karşı farklı tolerans düzeylerine sahip olması, tür bileşimini su kalitesi için duyarlı bir gösterge hâline getirir. Benzer biçimde, balık topluluklarının tür zenginliği ve yaş-boy dağılımı da daha büyük ölçekli ekolojik koşulların ve uzun dönemli değişimlerin bir yansıması olarak değerlendirilir (Fierro vd., 2017).

Fitoplankton ve perifiton, besin tuzu düzeylerindeki değişimlere hızlı yanıt veren topluluklardır. Bu toplulukların tür bileşimi ve biyokütlesi, özellikle göl ve durgun sularda besin zenginleşmesi ve ışık iklimindeki değişimleri izlemek için yaygın biçimde kullanılmaktadır (Wu vd., 2014). Bazı alg gruplarının, özellikle siyanobakterilerin baskın hâle gelmesi, yüksek besin yükü ve yüksek sıcaklık gibi koşulların bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Smith, 2003; Doğan-Sağlamtimur ve Sağlamtimur, 2018).

Sucul canlılarda ağır metal ve diğer zehirli maddelerin birikimi de su kalitesi açısından önemli bir konudur. Metaller su ve sedimentten besin zinciri boyunca taşınarak balıklar ve diğer organizmalarda birikebilir; bu durum hem ekosistem sağlığı hem de insan sağlığı açısından risk oluşturur (Şavran ve Küçük, 2022). Bu nedenle biyolojik dokularda metal birikiminin izlenmesi, kimyasal ölçümlerle birlikte değerlendirildiğinde kirleticilerin uzun vadeli ve birikimli etkilerini ortaya koymada yararlı bir araçtır.

Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi kapsamında biyolojik kalite unsurlarının ekolojik durumun değerlendirilmesinde merkezi bir rol üstlenmesi, bu yaklaşımın önemini göstermektedir (Uyanık ve Cebe, 2017). Türkiye’de de yüzey suyu kalitesinin değerlendirilmesinde biyolojik bileşenlere dayalı çalışmaların arttığı ve bu yaklaşımın ulusal ölçekte izleme programlarına yansıtılmaya başlandığı görülmektedir (Öztürk, 2024).

2.3. Su kalitesinden ekosistem sağlığına: kavramsal geçiş

Su kalitesi kavramı tarihsel olarak çoğunlukla fizikokimyasal parametreler üzerinden ele alınmış olsa da son yıllarda “ekosistem sağlığı”, “ekolojik kalite” ve “ekolojik bütünlük” gibi kavramların öne çıkmasıyla birlikte daha bütüncül bir yaklaşım benimsenmeye başlanmıştır (Klimaszyk ve Gołdyn, 2020). Bu yaklaşımda, su kütlesinin yalnızca kimyasal durumu değil, aynı zamanda biyolojik toplulukların yapısı, işlevsel süreçler ve habitat özellikleri birlikte değerlendirilir (O’Brien vd., 2016).

Ekosistem sağlığı, bir tatlısu ekosisteminin tür çeşitliliğini, ekolojik süreçlerini ve ekosistem hizmetlerini sürdürme kapasitesi ile ilişkilendirilir (Sandin ve Solimini, 2009). Bu nedenle, kimyasal parametrelerin belirli standartlara uygun olması tek başına ekosistemin sağlıklı olduğu anlamına gelmeyebilir. Habitat parçalanması, akış rejimindeki yapay değişiklikler veya istilacı türlerin baskın hâle gelmesi gibi etkenler, su kalitesi göstergeleri kabul edilebilir düzeyde olsa bile biyoçeşitlilik ve ekosistem işlevlerinde bozulmalara yol açabilir (Cantonati vd., 2020).

Tatlısu ekosistemleri için geliştirilen modeller ve değerlendirme araçları da bu kavramsal değişime paralel olarak, yalnızca kimyasal parametrelere odaklanmaktan çıkıp biyolojik ve işlevsel bileşenleri içerecek şekilde genişlemektedir. Su kalitesi ve ekosistem modelleri, fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri bir arada ele alarak farklı yönetim senaryolarının olası sonuçlarını öngörmeye yardımcı olur (Booty ve Lam, 2018). Bu araçlar, hem baskı-yanıt ilişkilerinin daha iyi anlaşılmasına hem de ekosistem temelli stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Klimaszky ve Goldyn, 2020).

Öte yandan, sucül ekosistemlerin korunması yalnızca teknik değil, aynı zamanda etik ve toplumsal bir boyuta da sahiptir. Sucül ekosistemlerin sadece insan yararı için kullanılan kaynaklar değil, kendi iç değeri olan sistemler olarak görülmesi gerektiğini vurgulayan çevre etiği yaklaşımları, biyolojik izleme ve koruma politikalarının dayandığı normatif çerçeveyi de etkilemektedir (Kılçık, 2021). Küresel iklim değişikliğinin biyolojik çeşitlilik ve ekosistem kaynakları üzerindeki etkilerine ilişkin tartışmalar, ekosistem sağlığı kavramının gelecek kuşaklar için ekosistem hizmetlerinin devamlılığı ile de ilişkili olduğunu göstermektedir (Demir, 2009).

Sonuç olarak, su kalitesinden ekosistem sağlığına uzanan kavramsal geçiş, tatlısu ekosistemlerinin değerlendirilmesinde çok göstergeli ve ekosistem temelli bir yaklaşımın benimsenmesini gerektirmektedir (O'Brien vd., 2016).

3. Tatlısu Ekosistemlerinde Ekosistem Sağlığı

3.1. Ekosistem sağlığı, ekolojik bütünlük ve direnç

Ekosistem sağlığı kavramı, tatlısu ekosistemlerinin durumunu yalnızca kimyasal kirlilik düzeyi ya da tek tek türlerin varlığı üzerinden değil, sistemin bütün yapısı ve işleyişi üzerinden değerlendirmeyi amaçlar. Bu bağlamda, tür çeşitliliği, besin ağlarının dengesi, enerji ve madde döngülerinin sürekliliği, dış baskılara karşı direnç ve bozulma sonrasında toparlanma kapasitesi gibi unsurlar birlikte ele alınır (Sandin ve Solimini, 2009).

Ekolojik bütünlük, bir ekosistemdeki canlı ve cansız bileşenlerin, aralarındaki ilişkilerin ve doğal süreçlerin, insan etkilerinin görece az olduğu koşullara yakın bir düzeyde sürdürülmesini ifade eder (O'Brien vd., 2016). Türler arası ilişkilerin aşırı bozulmadığı, istilacı türlerin baskın hale gelmediği, enerji ve madde döngülerinin büyük ölçüde doğal düzeyine yakın işlediği sistemler, yüksek ekolojik bütünlüğe sahip olarak değerlendirilir (Cantonati vd., 2020). Direnç ve toparlanma kapasitesi ise,

bir ekosistemin dış baskılar karşısında yapısını ve işleyişini ne ölçüde koruyabildiği ve bozulma sonrasında eski durumuna ne kadar yaklaşılabildiğiyle ilgilidir (Demir, 2009).

Tatlısu ekosistemleri, havza ölçeğinde arazi kullanımı, iklim koşulları ve insan etkinlikleriyle doğrudan bağlantılı oldukları için, ekosistem sağlığının korunması bu dış etkenlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirir (Wetzel, 2001). Nehir ve göl sistemlerinde yukarı, orta ve aşağı kesimler arasında tür bileşimi, habitat yapısı ve besin dinamikleri bakımından doğal bir farklılaşma bulunur; bu doğal değişimlerin üzerine binen insan kaynaklı baskılar, ekosistem sağlığındaki bozulmaların anlaşılmasını güçleştirebilir (Cantonati vd., 2020).

3.2. Sağlıklı tatlısu ekosistemlerinin yapısal ve işlevsel özellikleri

Sağlıklı bir tatlısu ekosistemi hem yapısal hem de işlevsel bakımdan belirli özellikler taşır. Yapısal açıdan bakıldığında, tür çeşitliliğinin belirli bir düzeyin üzerinde olması, farklı besin basamaklarına ait türlerin (üreticiler, otçullar, etçiller, ayrıştırıcılar) dengeli biçimde temsil edilmesi ve habitat çeşitliliğinin korunmuş olması temel göstergeler arasındadır (Sandin ve Solimini, 2009). Örneğin doğal bir akarsu sisteminde kıyı bitki örtüsünün sürekliliği, akımın farklı kesimlerinde derin-sığ ve hızlı-yavaş akış bölgelerinin bulunması, çok sayıda tür için yaşama alanı ve sığınak sağlar (Wetzel, 2001).

İşlevsel açıdan ise, birincil üretim, ayrışma ve besin döngüleri gibi süreçlerin sürdürülebilir biçimde işlemesi önemlidir. Güneş enerjisinin sucul bitkiler ve algler aracılığıyla kimyasal enerjiye dönüştürülmesi, bu üretimin otçullar ve ayrıştırıcılar tarafından tüketilmesi ve besin elementlerinin döngüsel olarak taşınması, sağlıklı bir tatlısu ekosisteminin temel işlevsel süreçleridir (Likens, 1975; Large vd., 1996). Bu süreçlerde meydana gelen aksaklıklar, örneğin üretim ve tüketim dengesinin bozulması ya da besin maddelerinin sistemde aşırı birikmesi, ekosistem sağlığının zayıfladığını gösterebilir (Carpenter vd., 1992).

Birincil üretim, tatlısu ekosistemlerinin enerji temelini oluşturur ve iklim koşulları, besin tuzu düzeyi, ılık iklimi ve hidrodinamik özelliklerden güçlü biçimde etkilenir (Likens, 1973; Likens, 1975). Nehir, göl ve sulak alan gibi farklı tatlısu tiplerinde birincil üreticilerin bileşimi, üretimin dağılımı ve mevsimsel desenleri değişiklik gösterir (Large vd., 1996). Bu desenlerdeki uzun dönemli değişimler, çoğu zaman iklim değişikliği ve besin yüklerindeki artış gibi daha geniş ölçekli baskıların da bir göstergesi olabilir (Carpenter vd., 1992).

Öte yandan, sucul canlılarda ağır metal ve diğer zehirli maddelerin birikimi, ekosistemin işlevsel bütünlüğünü zayıflatabilecek önemli bir et-kendir. Ağır metaller su ve sedimentten besin zinciri boyunca taşınarak balıklar ve diğer organizmalarda birikebilir; bu durum hem türlerin sağ-lık durumu hem de enerji–madde akışlarının sürekliliği açısından risk oluşturur (Şavran & Küçük, 2022). Bu tür maddelerin birikimi, ekosistem sağlığının yalnızca kısa vadeli kimyasal ölçümlerle değil, uzun dönemli biyolojik tepkiler üzerinden de değerlendirilmesi gerektiğini göstermek-tedir.

3.3. Biyoçeşitlilik, besin ağları ve ekosistem işlevleri

Biyoçeşitlilik, ekosistem sağlığının en temel göstergelerinden biri ola-rak kabul edilir. Tür zenginliği, endemik türlerin varlığı, genetik çeşit-lilik ve habitat çeşitliliği gibi bileşenler, ekosistemin dış baskılara karşı dayanıklılığını ve farklı işlevleri yerine getirme kapasitesini artırır (San-din ve Solimini, 2009). Biyoçeşitliliğin azalması ise çoğu zaman besin ağlarının basitleşmesine, önemli işlevsel grupların kaybına ve ekosistem işlevlerinde aksamaya yol açar (O'Brien vd., 2016).

Besin ağları, üreticiler, otçullar, etçiller ve ayrıştırıcılar arasındaki enerji ve madde akışlarını temsil eder. Karmaşık ve çok basamaklı bir be-sin ağı, genellikle ekosistemin daha kararlı ve dayanıklı olmasına katkıda bulunur (Wetzel, 2001). Örneğin farklı alg türleri, sucul bitkiler, omur-gasızlar ve balık türlerinden oluşan zengin bir topluluk, çevresel koşul-lardaki geçici bozulmalar karşısında bazı türler zarar görse bile, sistemin genel işleyişini sürdürebilmesini sağlayabilir (Carpenter vd., 1992).

Biyoçeşitlilik ve besin ağları, ekosistem işlevleriyle yakından bağlan-tılıdır. Organik maddenin parçalanması, besin maddelerinin döngüsü, suyun arıtılması, çökeltme ve sediman taşınımı gibi pek çok süreç, fark-lı türlerin ve işlevsel grupların birlikte faaliyet göstermesiyle gerçekleşir (Sandin ve Solimini, 2009). Bu işlevler bozulduğunda yalnızca ekosiste-min kendi iç dengesi değil, aynı zamanda suyun insan kullanımlarına uygunluğu da olumsuz etkilenir (Klimaszyk ve Gołdyn, 2020). Bu ne-denle ekosistem sağlığının korunması hem biyoçeşitliliğin hem de temel ekosistem işlevlerinin devamlılığının güvence altına alınmasını gerekti-rir (Demir, 2009).

4. Su Kalitesi ile Ekosistem Sağlığı Arasındaki İlişkiler

4.1. Besin zenginleşmesi, ötrofikasyon ve düzen değişimleri

Besin zenginleşmesi, özellikle azot ve fosfor gibi besin elementlerinin suya doğal düzeylerinin üzerinde girmesiyle ortaya çıkan bir süreçtir.

Evsel atık sular, tarımsal drenaj, endüstriyel deşarjlar ve atmosferik taşınım, tatlısu ekosistemlerindeki besin tuzu girişinin başlıca kaynaklarını oluşturur (Smith, 2003). Belirli eşiklerin aşılması sonrasında, bu süreç su zenginleşmesi veya ötrofikasyon olarak adlandırılan ve ekosistem sağlığı açısından olumsuz sonuçlar doğuran bir duruma dönüşür (Doğan-Sağlamtimur ve Sağlamtimur, 2018).

Ötrofikasyon sonucunda yoğun alg çoğalmaları, su yüzeyinde çiçeklenmeler, saydamlığın azalması ve çözünmüş oksijenin gün içinde büyük dalgalanmalar göstermesi gibi belirtiler ortaya çıkar (Qin vd., 2013). Özellikle geceleri ve suyun dip bölgesinde oksijen düzeyi çok düşebilir, hatta tamamen tükenebilir. Bu durum, dipte yaşayan omurgasızlar ve oksijene duyarlı balık türleri için yaşama koşullarını zorlaştırır ve kitle ölümlerine varan sonuçlar doğurabilir (Yağcı, 2010). Uzun süreli besin zenginleşmesi, sucul bitki ve alg topluluklarının bileşiminde kalıcı değişikliklere, toksik siyanobakterilerin baskın hâle gelmesine ve biyoçeşitliliğin azalmasına yol açabilir (Doğan-Sağlamtimur ve Sağlamtimur, 2018; Qin vd., 2013).

Bazı sığ göl ve durgun su sistemlerinde ötrofikasyon, ekosistemin farklı ve daha az istenen bir duruma kalıcı olarak geçmesine neden olabilir. Örneğin berrak ve su bitkilerinin baskın olduğu bir göl, bulanık ve fitoplankton ağırlıklı bir duruma geçebilir ve bu yeni durum, besin yükleri azalsa bile kolay kolay eski hâline dönmeyebilir (Qin vd., 2013). Ayrıca ağır metal kirliliği ve besin zenginleşmesinin birlikte görüldüğü durumlarda, metallerin sedimentte tutulması ve yeniden çözünmesi süreçleri de ötrofikasyon dinamikleriyle iç içe geçerek karmaşık etkiler ortaya çıkarabilir (Dereli vd., 2017). Besin zenginleşmesi ve iklim değişikliğine bağlı sıcaklık artışlarının birlikte değerlendirilmesi, özellikle son yıllarda öne çıkan bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Lin vd., 2021).

4.2. Zehirli kirleticiler ve besin basamakları üzerindeki etkiler

Zehirli kirleticiler, düşük derişimlerde bile sucul organizmalar üzerinde olumsuz etkiler yaratabilen kimyasal maddeleri kapsar. Ağır metaller, kalıcı organik kirleticiler ve bazı pestisitler bu gruba girmekte ve tatlısu ekosistemleri için uzun vadeli riskler oluşturmaktadır (Amoatey ve Baawain, 2019). Bu maddelerin önemli bir bölümü sedimentte birikir ve dipte yaşayan canlılar ile besin zinciri boyunca daha üst basamaklardaki türler için kalıcı bir tehlike kaynağı hâline gelir (Burton, 1991).

Kalıcı organik kirleticiler, uzak ve görece bozulmamış tatlısu ekosistemlerinde dahi tespit edilebilmekte ve atmosferik taşınım yoluyla geniş alanlara yayılabilmektedir (Fernández vd., 2005). Bu maddeler, besin zin-

ciri boyunca biyobirikim ve biyobüyütme süreçleriyle özellikle üst trofik düzeydeki türlerde yüksek derişimlere ulaşabilir (Xu vd., 2013). Ağır metallerin ve diğer zehirli maddelerin balıklarda ve diğer sucul organizmalarda birikimi, büyüme, üreme ve bağışıklık sistemi üzerinde olumsuz etkiler yaratmakta; bu durum hem ekosistem sağlığı hem de insan sağlığı açısından kaygı verici sonuçlar doğurmaktadır (Aktop ve Çağatay, 2020).

Zehirli kirleticilerin ekosistem üzerindeki etkileri hem doğrudan hem de dolaylı yollardan ortaya çıkar. Doğrudan etkiler, belirli türlerin hayatta kalma ve üreme başarısında azalma gibi sonuçlarla kendini gösterirken, dolaylı etkiler türler arası ilişkiler ve besin ağları üzerinden şekillenir (Amoatey ve Baawain, 2019). Örneğin, bentik omurgasızlarda görülen azalmalar, bu gruplarla beslenen balık türlerini de olumsuz etkileyebilir (Choudri vd., 2017). Bu nedenle, su kolonu ölçümlerinin yanı sıra sediment ve biyota içindeki kirletici düzeylerinin de değerlendirilmesi, ekosistem sağlığının güvenilir biçimde ortaya konulması için gereklidir (Burton, 1991; Taylan ve Özkoç, 2007).

5. Değerlendirme ve İzleme Yaklaşımları

5.1. Fizikokimyasal izleme

Tatlısu kalitesinin değerlendirilmesinde fizikokimyasal izleme çalışmaları, en köklü ve en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir. Bu kapsamda, belirlenen örnekleme noktalarından düzenli aralıklarla su örnekleri alınır ve sıcaklık, çözünmüş oksijen, pH, iletkenlik, askıda katı madde, besin tuzları, organik madde ve belirli kirleticilerin derişimleri gibi parametreler ölçülür (Omer, 2019). Bu ölçümler, su kütlesinin mevcut kimyasal durumunun ve zaman içindeki değişimlerin ortaya konulmasında temel bir araçtır.

Fizikokimyasal izleme, noktasal kirlilik kaynaklarının etkisini, mevsimsel örüntüleri ve aşırı olayları belirlemede önemli bilgiler sağlar (Jaffar vd., 2020). Ancak çoğu zaman su kolonunun belirli bir anda ve belirli bir noktadaki durumunu yansıttığı için, kısa süreli deşarjlar veya ani kirlenme olayları örnekleme zamanına bağlı olarak gözden kaçabilir. Ayrıca, fizikokimyasal ölçümler kirleticilerin ekosistem bileşenleri üzerindeki birikimli ve dolaylı etkilerini her zaman tam olarak yansıtmayabilir (Wetzel, 2001). Bu sınırlılıklar, fizikokimyasal izlemenin biyolojik ve hidromorfolojik bileşenlerle desteklenmesini gerekli kılmaktadır.

5.2. Biyolojik değerlendirme ve çok göstergeli yaklaşımlar

Biyolojik değerlendirme, tatlısu ekosistemlerindeki bitki ve hayvan topluluklarının yapısını inceleyerek su kalitesi ve habitat durumu hak-

kında daha bütünleşik bilgi sağlamayı amaçlar. Bu yaklaşımda makroo-murgasızlar, balıklar, fitobentoz ve sucul bitkiler gibi belirli biyotik gruplar seçilir; bu grupların tür bileşimi, bolluğu, duyarlı ve dayanıklı türlerin oranı ve işlevsel özellikleri gibi ölçütler değerlendirilir (Fierro vd., 2017). Böylece, ekosistemin maruz kaldığı çevresel koşulların belli bir zaman dilimindeki toplam etkisi topluluk yapısı üzerinden okunabilir.

Biyolojik değerlendirmede sık kullanılan yöntemlerden biri, çok göstergeli (çok metrikli) indekslerin geliştirilmesidir. Bu tür indekslerde seçilen biyotik topluluk için tür zenginliği, kirli koşullara dayanıklı türlerin oranı ve belirli duyarlı türlerin varlığı gibi göstergeler bir araya getirilir ve her birine referans koşullara ne kadar yakın olduğuna bağlı olarak puan verilir (Fierro vd., 2017). Bu puanlar birleştirilerek genel bir ekolojik durum sınıflaması yapılır. Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi kapsamında biyolojik kalite unsurlarının ekolojik durum değerlendirmesinde merkezi bir rol üstlenmesi, bu yaklaşımın önemini açıkça göstermektedir (Uyanık ve Cebe, 2017).

Kimyasal ölçümlerin çoğu zaman anlık koşulları yansıtmasına karşın, biyotik topluluklar maruz kaldıkları çevresel koşulların daha uzun süreli ortalama etkisini yansıtır. Örneğin kısa süreli bir oksijen azalması kimyasal izleme sırasında yakalanamayabilir; ancak bu durum zaman içinde belirli duyarlı türlerin kaybına neden olabilir (Wu vd., 2014). Bu nedenle biyolojik değerlendirme, fizikokimyasal izlemenin tamamlayıcısı olarak tatlısu ekosistemlerinin gerçek ekolojik durumunu ortaya koymada önemli bir rol oynar (Öztürk, 2024).

5.3. Yeni teknolojiler ve modelleme yaklaşımları

Son yıllarda tatlısu ekosistemlerinin izlenmesi ve değerlendirilmesinde yeni teknolojiler ve modelleme yaklaşımlarının kullanımı hızla artmaktadır. Bu gelişmeler, izleme çalışmalarının mekânsal ve zamansal kapsamını genişleterek su kalitesi ile ekosistem sağlığı arasındaki ilişkilerin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır.

Çevresel DNA (environmental DNA, eDNA) temelli izleme, son dönemde öne çıkan yöntemlerden biridir. Bu yaklaşımda sucul ortama saçılan DNA parçacıkları (örneğin balıklar, omurgasızlar, amfibiler ve mikroorganizmalar tarafından bırakılan genetik materyal) su örneklerinden elde edilerek analiz edilir ve böylece birçok türün varlığı, doğrudan yakalama yapılmadan tespit edilebilir (Taberlet vd., 2012). eDNA yöntemleri, özellikle nadir ya da tespiti zor türlerin varlığını belirlemede ve geniş alanlarda biyoçeşitliliğin hızlı taranmasında önemli avantajlar sunmaktadır (Harper vd., 2019). Bununla birlikte, örnekleme

tasarımı, DNA'nın ortamda kalma süresi ve tür düzeyinde ayırım gücü gibi konular, bu yaklaşımın uygulanmasında dikkate alınması gereken temel zorluklar arasında yer almaktadır (Bálint vd., 2018).

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknikleri de su kalitesi ve ekosistem sağlığının değerlendirilmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Havza ölçeğinde arazi kullanım desenlerinin, eğim ve toprak özelliklerinin, su kütlelerinin konumunun ve bağlantılılığının CBS ortamında analiz edilmesi, kirlilik kaynaklarının ve riskli bölgelerin belirlenmesine yardımcı olur (Tona vd., 2022). Uydu görüntüleri ve diğer uzaktan algılama verileri ise özellikle büyük ölçekli göl ve rezervuarlarda su yüzey sıcaklığı, klorofil-a yoğunluğu ve bulanıklık gibi parametrelerin izlenmesinde yararlı bilgiler sağlar (Eşbah vd., 2013).

Modelleme yaklaşımları, fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri bir arada ele alarak farklı senaryolar altında su kalitesi ve ekosistem yanıtlarını öngörmeyi amaçlar. Akarsu su kalitesi modelleri, akım rejimi, kirlilik yükleri, çözünmüş oksijen dengesi ve besin dinamikleri gibi süreçleri matematiksel olarak temsil ederek, çeşitli kirlilik azaltım ve yönetim senaryolarının olası sonuçlarını değerlendirmeye olanak verir (Reichert vd., 2001). Hidrolojik/su kalitesi modelleri ise havza ölçeğinde yağış-yüzey akışı, toprak-bitki süreçleri ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan kirlilik yüklerini dikkate alarak su kütlelerine ulaşan kirlilik miktarlarını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Engel vd., 2007; Coşkun, 2012).

Bu yeni teknolojiler ve modelleme yaklaşımları, geleneksel fizikokimyasal ve biyolojik izleme yöntemlerinin yerini almaktan ziyade, onları tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. eDNA, CBS, uzaktan algılama ve süreç temelli modeller birlikte kullanıldığında, su kalitesi ve ekosistem sağlığına ilişkin değerlendirmelerin kapsamı ve doğruluğu önemli ölçüde artmakta; yönetim kararları için daha sağlam bir bilimsel temel oluşturulmaktadır (Harper vd., 2019).

6. Yönetim ve Politika Boyutları

6.1. Entegre su kaynakları yönetimi ve ekosistem temelli yaklaşım

Su kaynakları yönetimi, uzun süre boyunca büyük ölçüde suyun tahsisi, depolanması ve taşınması gibi mühendislik ağırlıklı hedeflere odaklanmıştır. Barajlar, sulama sistemleri ve içme suyu altyapıları bu yaklaşımın temel araçları olmuş; ekosistem sağlığı çoğu zaman ikincil bir konu olarak ele alınmıştır (Teonlan Meriç, 2004). Ancak artan su talebi, su kalitesi sorunları, iklim değişikliği ve ekosistem hizmetlerindeki bozulmalar, daha bütüncül ve ekosistem temelli bir yönetim anlayışını gündeme getirmiştir (Harmancıoğlu vd., 2002).

Entegre su kaynakları yönetimi (Integrated Water Resources Management, IWRM), su kaynaklarını havza ölçeğinde; su miktarı ve kalitesi, kara kullanımı, ekosistem ihtiyaçları ve sosyoekonomik talepler birlikte ele alınarak yönetmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır (Agarwal vd., 2000). Bu yaklaşım, suyun yalnızca ekonomik bir girdi olarak değil, aynı zamanda ekosistemlerin işleyişi ve toplumsal refah için temel bir doğal varlık olarak değerlendirilmesini öngörür (Rahaman ve Varis, 2005). Su talepleri arasındaki çatışmaların yönetimi, havza ölçeğinde kurumsal iş birliği, paydaş katılımı ve çevresel akış gereksinimlerinin dikkate alınması, entegre yönetim anlayışının temel unsurları arasında yer alır (Jain ve Singh, 2023).

Türkiye’de de su kaynakları yönetimine ilişkin tartışmalar, özellikle son yıllarda entegre ve havza temelli yaklaşımların önemine vurgu yapmaktadır. Su kaynakları yönetiminin kurumsal yapısı, mevzuat, veri paylaşımı ve farklı sektörler arasındaki eşgüdüm gereksinimleri bu tartışmaların merkezinde yer alır (Aküzüm vd., 2010; Teonlan Meriç, 2004). Su güvenliği, taşkın ve kuraklık riskleri, su kalitesi sorunları ve ekosistem hizmetlerindeki azalma, Türkiye’de de yönetim yaklaşımlarının gözden geçirilmesini gerektiren başlıca unsurlardır (ÖİK Raporu, 2014).

Entegre su kaynakları yönetimi, uygulamada her zaman beklendiği ölçüde başarılı olmayabilmiştir. Farklı kurumsal yapılar, veri eksiklikleri, politik ve ekonomik öncelikler ile uygulama kapasitesindeki sınırlılıklar, IWRM uygulamalarını çeşitli açılardan zorlamaktadır (Biswas, 2013). Bununla birlikte, havza ölçeğinde planlamayı, sektörel taleplerin dengelemesini ve ekosistem sağlığına yönelik çevresel hedeflerin belirlenmesini öngören bu yaklaşım, sürdürülebilir su yönetimi için hâlâ önemli bir çerçeve sunmaktadır (Rahaman ve Varis, 2005).

Ekosistem temelli su yönetimi, entegre yaklaşıma ek olarak, su politikalarının merkezine ekosistem sağlığını ve ekosistem hizmetlerinin korunmasını yerleştirmeyi hedefler. Bu çerçevede çevresel akışların tanımlanması, korunan alanların ve hassas su kütlelerinin önceliklendirilmesi, kirlilik yüklerinin ekosistem temelli hedeflere göre sınırlandırılması ve restorasyon uygulamalarının planlanması temel araçlar arasında sayılabilir (Harmancıoğlu vd., 2002). Böylece su kalitesi ve ekosistem sağlığı, yalnızca çevresel bir hedef değil, aynı zamanda su yönetimi ve kalkınma politikalarının ayrılmaz bir bileşeni hâline gelir.

6.2. Ekosistem sağlığını merkeze alan uygulamalı stratejiler

Ekosistem sağlığını merkeze alan yönetim stratejileri, su kalitesi ve ekosistem işlevlerinin korunmasını yalnızca kirlilik kontrolü ile sınırlı

görmeyip, aynı zamanda habitat bütünlüğü, akış rejimi ve ekosistem süreçlerinin desteklenmesi üzerinden ele alır. Besin zenginleşmesi ve ötrofikasyonla mücadele, bu kapsamda önemli bir uygulama alanıdır. Besin yüklerinin azaltılması, atık su arıtma süreçlerinin iyileştirilmesi, tarımda gübre kullanımının kontrolü ve tampon bölge uygulamaları, ötrofikasyon kontrolüne yönelik temel araçlar arasında yer alır (Ansari vd., 2011; Tang vd., 2012).

Ötrofikasyon kontrolüne yönelik ekolojik stratejiler, yalnızca dış yüklerin azaltılmasına değil, aynı zamanda iç yüklerin yönetimine ve ekosistem yapısının yeniden düzenlenmesine de odaklanır. Sedimentte biriken fosforun mobilizasyonunun azaltılması, makrofit örtüsünün desteklenmesi veya balık topluluklarının yapısının dengelenmesi gibi uygulamalar, bazı göl ve rezervuarlarda su kalitesinin iyileştirilmesi için kullanılan yöntemlerdir (Tang vd., 2012). Bu tür müdahaleler, besin döngülerinin ve besin ağlarının yeniden dengelenmesine katkı sağlayarak ekosistem sağlığının güçlendirilmesini amaçlar (Ansari vd., 2011).

Nehir restorasyonu uygulamaları da ekosistem sağlığını merkeze alan stratejilerin önemli bir bileşenidir. Nehirlerin kanallaştırılması, yatağın düzeltilmesi ve taşkın düzlüklerinden koparılması gibi geçmiş mühendislik uygulamaları, habitat çeşitliliğini azaltmış ve ekosistem işlevlerini zayıflatmıştır (Wohl vd., 2015). Günümüzde nehir restorasyonu, akarsu yatağının ve kıyı zonunun doğal morfolojik özelliklerinin kısmen geri kazanılmasını, bağlantılı sulak alanların yeniden canlandırılmasını ve akış rejiminin ekolojik gereksinimler gözetilerek düzenlenmesini hedeflemektedir (Smith vd., 2014). Bu tür uygulamalar, habitat kalitesinin artmasına, biyoçeşitliliğin desteklenmesine ve ekosistem hizmetlerinin güçlenmesine katkıda bulunmaktadır (Wohl vd., 2015).

Ekosistem temelli stratejilerin başarılı olabilmesi için, bilimsel bilgi, yerel koşullar ve paydaş beklentilerinin birlikte değerlendirilmesi gereklidir (Smith vd., 2014). Yönetim hedeflerinin açık biçimde tanımlanması, izleme programlarının bu hedeflerle uyumlu tasarlanması ve elde edilen sonuçlara göre uyarlanabilir yönetim yaklaşımlarının benimsenmesi, ekosistem sağlığını korumaya yönelik stratejilerin temel ilkeleri arasında yer alır (Tang vd., 2012).

7. Gelecek Perspektifleri ve Araştırma İhtiyaçları

7.1. İklim değişikliği ve değişen baskı profilleri

İklim değişikliği, tatlısu ekosistemleri üzerindeki baskı profillerini köklü biçimde dönüştürmektedir. Artan hava sıcaklıkları, yağış rejimlerindeki değişimler, aşırı hava olaylarının sıklık ve şiddetindeki artışı,

bu dönüşümün başlıca bileşenleri arasındadır (Woodward vd., 2010). Sıcaklık artışı, su sıcaklığını yükselterek çözünmüş oksijen düzeylerini düşürmekte, buharlanmayı artırarak su miktarını azaltmakta ve böylece hem su kalitesi hem de su güvenliği açısından yeni riskler ortaya çıkarmaktadır (Yüksel vd., 2011).

Yağış desenlerindeki değişim, özellikle kurak dönemlerin uzaması ve kısa süreli şiddetli yağışların artması, akış rejimlerinde belirgin dalgalanmalara yol açmaktadır (Kernan vd., 2011). Bu durum, bir yandan taşkın ve erozyon riskini artırırken, diğer yandan uzun süren düşük akım dönemleri nedeniyle su kalitesinin bozulmasına ve sucul habitatların daralmasına neden olmaktadır (Firth ve Fisher, 2012). Tatlısu ekosistemlerinde sıcaklık, akış ve besin girdilerinin birlikte değişmesi, ötrofikasyon dinamiklerini ve biyoçeşitlilik desenlerini de etkilemekte; bazı sistemlerde toksik alg çoğalmalarının görülme olasılığını artırmaktadır (Woodward vd., 2010).

İklim krizinin sucul ekosistemler ve su ürünleri üretimine yansımaları, özellikle bölgesel ölçekte giderek daha fazla tartışılmaktadır. Su sıcaklığındaki artış, bazı balık türleri için üst tolerans sınırlarının aşılmasına ve dağılım alanlarının kaymasına yol açarken; kuraklık koşulları sucul habitatların daralmasına ve popülasyon baskısının artmasına neden olabilmektedir (Pulatsü vd., 2025). Aynı zamanda, artan su sıcaklığı ve düşük akım koşulları, kirleticilerin seyreltme kapasitesini azaltarak su kalitesinin daha kırılğan hâle gelmesine neden olur. Bu durum hem doğal popülasyonlar hem de su ürünleri yetiştiriciliği için belirsizlik ve riskleri artırmaktadır (Kernan vd., 2011).

Gelecek perspektifinde, iklim değişikliğinin etkilerinin yalnızca fizikokimyasal parametreler üzerinden değil, ekosistem düzeyinde baskı profillerinin bütünleşik bir bileşeni olarak ele alınması gerekmektedir. Sıcaklık, akış rejimi, besin zenginleşmesi, istilacı türler ve arazi kullanımı gibi baskıların bir arada ve zaman içinde nasıl değiştiğinin anlaşılması, ekosistem sağlığının sürdürülmesi için kritik önemdedir (Woodward vd., 2010; Firth ve Fisher, 2012). Bu bağlamda, iklim projeksiyonları ile su kalitesi modellerinin, biyoçeşitlilik verileri ve ekosistem hizmetleri değerlendirmeleriyle birleştirildiği bütüncül yaklaşımlara olan ihtiyaç giderek artmaktadır (Kernan vd., 2011).

7.2. Veri eksiklikleri, yöntemsel zorluklar ve fırsatlar

Tatlısu ekosistemlerinin izlenmesi ve değerlendirilmesinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, uzun dönemli ve yüksek kaliteli veri eksikliğidir. Birçok su kütlesi için fizikokimyasal, biyolojik ve hidro-

morfolojik veriler düzensiz, kısa süreli veya sınırlı parametre setleri ile sınırlıdır (Park ve Hwang, 2016). Bu durum, özellikle iklim değişikliği, arazi kullanımı değişimleri ve besin zenginleşmesi gibi süreçlerin uzun dönemli etkilerini ortaya koymayı güçleştirmektedir (Stefanidis ve Papastergiadou, 2024).

Veri eksiklikleri hem ekolojik değerlendirme hem de modelleme çalışmalarında belirsizlikleri artırmaktadır. Örneğin, nehir ve göl sistemleri için geliştirilen su kalitesi ve ekosistem modelleri, akım, besin tuzu yükleri, sıcaklık ve biyolojik yanıtlar gibi çok sayıda veriye ihtiyaç duymakta; bu verilerdeki boşluklar veya tutarsızlıklar, model sonuçlarının güvenilirliğini sınırlandırmaktadır (Reichert vd., 2001; Engel vd., 2007; Coşkun, 2012). Benzer biçimde, biyolojik izleme verilerinin düzensizliği, tür bileşimindeki değişimlerin veya topluluk yapısındaki kaymaların gerçek eğilim mi yoksa örnekleme tasarımına ilişkin bir artefakt mı olduğunu ayırt etmeyi zorlaştırabilir (Radinger vd., 2019).

Ekolojik izleme programlarının tasarımında da önemli yöntemsel zorluklar bulunmaktadır. Örnekleme sıklığı, mekânsal kapsama alanı, seçilen biyotik gruplar ve değerlendirilen parametreler, sınırlı kaynaklar ve zaman kısıtları altında belirlenmek zorundadır (Park ve Hwang, 2016). Bu nedenle, izleme tasarımlarının hem yönetsel ihtiyaçlara hem de bilimsel amaçlara yanıt verecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir (Radinger vd., 2019). Tatlısu balıklarının etkin izlenmesine yönelik çalışmalar, örnekleme yöntemleri, tespit olasılığı ve veri yorumlama süreçlerinde dikkat edilmesi gereken noktaları ortaya koyarak bu konuda önemli bir çerçeve sunmaktadır (Radinger vd., 2019).

Öte yandan, yeni teknolojiler veri eksikliklerini azaltmak ve izleme çalışmalarını güçlendirmek için önemli fırsatlar sunmaktadır. Çevresel DNA (eDNA) yöntemleri, birçok türün varlığını doğrudan yakalama gerektirmeden tespit etmeye olanak sağlayarak, özellikle geniş alanlı ve çok türlü izleme çalışmalarında önemli bir araç hâline gelmektedir (Taberlet vd., 2012; Harper vd., 2019). eDNA zaman serilerinin kullanımı, tür bileşimi ve biyoçeşitlilikteki değişimlerin uzun dönemli izlenmesine yönelik yeni olanaklar sunarken; aynı zamanda yöntemsel standartlaşma, veri yorumlama ve belirsizliklerin yönetimi gibi yeni araştırma gereksinimlerini de beraberinde getirmektedir (Bálint vd., 2018).

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknikleri, havza ölçeğinde arazi kullanımı, topografya ve su kütlelerinin mekânsal düzeni hakkında ayrıntılı bilgi sağlayarak, veri boşluklarının giderilmesine ve risk alanlarının belirlenmesine katkı sağlar (Tona vd., 2022; Eşbah vd., 2013). Bu tür mekânsal verilerin, su kalitesi ölçümleri ve biyolojik göz-

tergelerle bütünleştirilmesi, “büyük veri” yaklaşımlarına kapı aralamaktadır (Park & Hwang, 2016; Stefanidis & Papastergiadou, 2024). Ancak farklı veri kaynaklarının entegrasyonu, veri kalitesi, standardizasyon ve birlikte çalışabilirlik gibi konularda yeni yönetsel zorluklar da doğurmaktadır.

Gelecek perspektifinde, tatlısu ekosistemlerinde izleme ve değerlendirme çalışmalarının güçlendirilmesi için, sistematik örnekleme stratejileri, uzun dönemli gözlem ağları, yeni teknolojilerin entegrasyonu ve belirsizlik analizlerinin birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşım gerekmektedir (Stefanidis ve Papastergiadou, 2024). Bu çerçevede, mevcut veri boşluklarının ve yönetsel sınırlılıkların açıkça tanımlanması hem araştırma önceliklerinin belirlenmesi hem de uyarlanabilir yönetim süreçlerinin desteklenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

7.3. Ekosistem temelli ve uyarlanabilir yönetim yaklaşımları

Ekosistem temelli ve uyarlanabilir yönetim yaklaşımları, belirsizliklerin yüksek, baskı türlerinin çoklu ve değişken olduğu tatlısu ekosistemlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ekosistem temelli yaklaşım, su yönetiminde yalnızca su miktarı ve kalitesi hedeflerine odaklanmak yerine, ekosistem sağlığını ve ekosistem hizmetlerinin sürekliliğini merkeze almayı amaçlar (Agarwal vd., 2000). Bu çerçevede çevresel akışların tanımlanması, hassas ve korunan su kütlelerinin önceliklendirilmesi, biyoçeşitlilik ve habitat bütünlüğünün yönetim hedefleri arasına açık biçimde dâhil edilmesi gerekmektedir (Rahaman ve Varis, 2005).

Uyarlanabilir yönetim (adaptive management) ise, belirsizliklerin kaçınılmaz olduğu durumlarda, yönetim uygulamalarının birer “öğrenme süreci” olarak tasarlanmasını öngörür. Bu yaklaşımda, belirli hedefler doğrultusunda uygulanan tedbirler, düzenli izleme sonuçları ışığında değerlendirilir ve gerekirse stratejiler güncellenir (Wohl vd., 2015). Nehir restorasyonu, ötrofikasyon kontrolü ve havza ölçekli su yönetimi gibi karmaşık alanlarda, uyarlanabilir yönetim ilkeleri çerçevesinde hareket etmek, beklenmedik ekosistem tepkilerine ve değişen baskı profillerine daha esnek yanıt verilmesini sağlar (Smith vd., 2014; Tang vd., 2012).

Entegre su kaynakları yönetimi, ekosistem temelli bakış açısı ve uyarlanabilir yönetim ilkeleri bir arada ele alındığında, geleceğe dönük güçlü bir çerçeve sunar. Havza ölçeğinde su tahsisi, su kalitesi hedefleri, taşkın ve kuraklık yönetimi ile ekosistem sağlığının korunmasına yönelik hedeflerin birlikte planlanması, kurumsal eşgüdüm ve paydaş katılımını gerektirir (Aküzüm vd., 2010). Aynı zamanda, restorasyon uygulamaları,

ötrofikasyon kontrol stratejileri ve kirletici yük yönetimi gibi araçların, ekosistem tepkilerine göre zaman içinde gözden geçirilmesi ve uyarlanması gerekir (Wohl vd., 2015).

Yeni teknolojiler ve modelleme yaklaşımları da ekosistem temelli ve uyarlanabilir yönetim için önemli destek araçlarıdır. Nehir su kalitesi modelleri, hidrolojik modeller, CBS tabanlı analizler ve eDNA temelli izleme yöntemleri, farklı senaryolar altında ekosistem tepkilerini öngörmeye ve yönetim seçeneklerinin olası sonuçlarını değerlendirmeye yardımcı olur (Reichert vd., 2001; Engel vd., 2007; Harper vd., 2019). Bu araçların, net hedefler, düzenli izleme ve geri besleme mekanizmaları ile bir arada kullanılması, tatlısu ekosistemlerinde uyarlanabilir ve öğrenmeye dayalı yönetim kültürünün yerleşmesine katkı sağlayacaktır (Stefanidis ve Papastergiadou, 2024).

8. Sonuç

Tatlısu ekosistemleri, biyolojik çeşitlilik açısından taşıdıkları zenginlik ve insanlara sağladıkları çok yönlü ekosistem hizmetleri nedeniyle kritik öneme sahiptir. Ancak artan su talebi, arazi kullanımındaki değişimler, kirlilik yükleri ve iklim değişikliğinin etkileri, bu ekosistemler üzerindeki baskıları her geçen gün artırmaktadır. Bu çalışma, tatlısu kalitesi ile ekosistem sağlığı arasındaki ilişkileri temel fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşenler; izleme yaklaşımları ve yönetim boyutları çerçevesinde ele alarak bütüncül bir değerlendirme sunmayı amaçlamıştır.

Öncelikle su kalitesi kavramının, yalnızca fizikokimyasal parametrelerle sınırlı kalamayacağı; biyoçeşitlilik, besin ağları, ekosistem işlevleri ve habitat bütünlüğü ile birlikte düşünülmesi gerektiği vurgulanmıştır. Besin zenginleşmesi, ötrofikasyon, ağır metal ve kalıcı organik kirleticiler gibi baskıların, tatlısu ekosistemlerinde tür bileşimini, enerji-madde döngülerini ve ekosistem hizmetlerini nasıl dönüştürdüğü ortaya konmuştur. Bu çerçevede, ekosistem sağlığı ve ekolojik bütünlük kavramlarının, su kalitesine ilişkin değerlendirmelere eklenmesinin zorunlu olduğu görülmektedir.

Çalışmada, fizikokimyasal ve biyolojik izleme yaklaşımlarının birbirini tamamladığı; kimyasal ölçümlerin anlık koşulları, biyolojik göstergelerin ise daha uzun süreli ve birikimli etkileri yansıttığı gösterilmiştir. Makroomurgasızlar, balıklar, fitoplankton, perifiton ve sucul bitkiler gibi biyolojik bileşenlere dayalı çok göstergeli indekslerin, ekolojik durumu değerlendirmede önemli araçlar sunduğu; ancak uzun dönemli ve düzenli veri eksikliklerinin hâlâ önemli bir sınırlılık oluşturduğu tartışılmıştır. Yeni teknolojiler (eDNA, CBS, uzaktan

algılama) ve modelleme yaklaşımlarının, bu eksiklikleri gidermede ve izleme çalışmalarının kapsamını genişletmede önemli fırsatlar sunduğu da vurgulanmıştır.

Yönetim ve politika boyutunda, entegre su kaynakları yönetimi ve ekosistem temelli yaklaşımların, geleneksel mühendislik odaklı yaklaşımlara göre daha kapsayıcı bir çerçeve sunduğu ortaya konmuştur. Havza ölçeğinde su miktarı ve kalitesi, arazi kullanımı, ekosistem ihtiyaçları ve sosyoekonomik taleplerin birlikte ele alınması; çevresel akışların tanımlanması ve hassas su kütlelerinin korunması, geleceğe dönük yönetim stratejilerinin temel unsurları arasında yer almaktadır. Uyarlanabilir yönetim anlayışı ise, belirsizliklerin yüksek olduğu koşullarda, izleme sonuçlarına dayalı olarak yönetim uygulamalarının gözden geçirilmesi ve gerektiğinde güncellenmesi için önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Gelecek perspektifleri açısından bakıldığında, iklim değişikliğinin tatlısu ekosistemleri üzerindeki etkilerinin baskı profillerini köklü biçimde dönüştürdüğü görülmektedir. Sıcaklık artışı, akış rejimindeki düzensizlikler, aşırı hava olayları ve bunlarla birlikte değişen besin yükleri hem su kalitesi hem de ekosistem sağlığı açısından yeni riskler ortaya çıkarmaktadır. Buna karşılık, uzun dönemli izleme programları, veri entegrasyonu, belirsizlik analizleri ve senaryo temelli modellemeler, bu risklerin daha iyi anlaşılması ve yönetilmesi için öncelikli araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, tatlısu kalitesi ve ekosistem sağlığının korunması, yalnızca teknik izleme ve arıtma çözümleriyle sınırlı olmayan, ekosistem temelli, disiplinler arası ve uyarlanabilir bir yönetim yaklaşımını gerektirmektedir. Biyolojik ve fizikokimyasal göstergelerin birlikte kullanıldığı, yeni teknolojilerin izleme ve değerlendirme süreçlerine entegre edildiği, havza ölçeğinde planlama ve katılımcı yönetim anlayışının benimsendiği durumlarda, tatlısu ekosistemlerinin bugünkü ve gelecek kuşaklar için sunduğu ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği daha güçlü biçimde güvence altına alınabilecektir.

Kaynakça

- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: lake and river ecosystems*. gulf professional publishing.
- Koç, C. (2024). Su Kaynakları Yönetiminin Geleceği, Su Güvenliği ve Ortaya Çıkan Sorunlar. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(1), 211-223. <https://doi.org/10.21324/dacd.1359958>.
- Deeksha, & Shukla, A. K. (2022). Ecosystem services: a systematic literature review and future dimension in freshwater ecosystems. *Applied Sciences*, 12(17), 8518.
- Apostolaki, S., Akinsete, E., Koundouri, P., & Samartzis, P. (2020). Freshwater: The importance of freshwater for providing ecosystem services. *Encyclopedia of the World's biomes*, 71-79.
- Reid, A. J., Carlson, A. K., Creed, I. F., Eliason, E. J., Gell, P. A., Johnson, P. T., ... & Cooke, S. J. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological reviews*, 94(3), 849-873.
- Tockner, K. (2021). Freshwaters: global distribution, biodiversity, ecosystem services, and human pressures. In *Handbook of water resources management: Discourses, concepts and examples* (pp. 489-501). Cham: Springer International Publishing.
- Cantonati, M., Poikane, S., Pringle, C. M., Stevens, L. E., Turak, E., Heino, J., ... & Znachor, P. (2020). Characteristics, main impacts, and stewardship of natural and artificial freshwater environments: consequences for biodiversity conservation. *Water*, 12(1), 260.
- Omer, N. H. (2019). Water quality parameters. *Water quality-science, assessments and policy*, 18, 1-34.
- Jaffar, A., M Thamrin, N., Megat Ali, M. S. A., Misnan, M. F., & Mohd Yassin, A. I. (2020). The influence of physico-chemical parameters to determine water quality: A review. *Journal of Electrical And Electronic Systems Research (JEESR)*, 17, 116-121.
- Ayar, M. K., Liang, W., Niazi, Z., & Iftikhar, F. (2025). Insights into the Physico-Chemical Parameters of Surface Water and Their Impact on Water Quality and the Pollution. *Polish Journal of Environmental Studies*.
- Dodds, W. K., & Smith, V. H. (2016). Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams. *Inland Waters*, 6(2), 155-164.
- Kapsalis, V. C., & Kalavrouziotis, I. K. (2021). Eutrophication—A worldwide water quality issue. In *Chemical lake restoration: Technologies, innovations and economic perspectives* (pp. 1-21). Cham: Springer International Publishing.
- Jones, J., & Brett, M. T. (2014). Lake nutrients, eutrophication, and climate change. In *Global environmental change* (pp. 273-279). Springer, Dordrecht.
- Kazancı, N. (2008). Limnolojide Gelişmeler. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 25(4), 365-369.

- SMITH, V.H., "Eutrophication of Freshwater and Coastal Marine Ecosystems A Global Problem", *ESPR-Environmental Science and Pollution Research*, 10, 126-139, 2003.
- Fierro, P., Valdovinos, C., Vargas-Chacoff, L., Bertrán, C., & Arismendi, I. (2017). Macroinvertebrates and fishes as bioindicators of stream water pollution. In *Water quality*. IntechOpen.
- Wu, N., Schmalz, B., & Fohrer, N. (2014). Study progress in riverine phytoplankton and its use as bio-indicator—a review. *Austin Journal of Hydrology*, 1(1), 9.
- Şavran, G., & Küçük, F. (2022). Sucul Canlılarda Ağır Metal Birikimi ve Etkileri. *Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi*, 8(1), 65-78.
- Öztürk, N. A. (2024). *Kıtaçi Yerüstü su Kaynaklarının Kalitesinin Değerlendirilmesi* (Master's thesis, Necmettin Erbakan University (Turkey)).
- Uyanık, S., & Cebe, A. (2017). AB Su Çerçeve Direktifi kapsamında biyolojik kalite unsurları ile su kalitesinin izlenmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2(3), 64-72.
- Klimaszyk, P., & Gołdyn, R. (2020). Water quality of freshwater ecosystems in a temperate climate. *Water*, 12(9), 2643.
- O'Brien, A., Townsend, K., Hale, R., Sharley, D., & Pettigrove, V. (2016). How is ecosystem health defined and measured? A critical review of freshwater and estuarine studies. *Ecological Indicators*, 69, 722-729.
- Booty, W. G., & Lam, D. C. (2018). Freshwater ecosystem water quality modeling. In *Modeling marine systems* (pp. 387-431). CRC Press.
- Sandin, L., & Solimini, A. G. (2009). Freshwater ecosystem structure–function relationships: from theory to application. *Freshwater Biology*, 54(10), 2017-2024.
- Kılçık, F. (2021). Çevre Etiği Çerçevesinde Sucul Ekosistemler ve Biyolojik İzleme. *Tabula Rasa: Felsefe ve Teoloji*, (36), 53-60.
- Demir, A. (2009). Küresel iklim değişikliğinin biyolojik çeşitlilik ve ekosistem kaynakları üzerine etkisi. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi*, 1(2), 37-54.
- Likens, G. E. (1973). Primary production: Freshwater ecosystems. *Human Ecology*, 1(4), 347-356.
- Carpenter, S. R., Fisher, S. G., Grimm, N. B., & Kitchell, J. F. (1992). Global change and freshwater ecosystems. *Annual review of ecology and systematics*, 119-139.
- Likens, G. E. (1975). Primary production of inland aquatic ecosystems. In *Primary productivity of the biosphere* (pp. 185-202). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Large, A. R. G., Pautou, G., & Amoros, C. (1996). Primary production and primary producers. In *The Fluvial Hydrosystems* (pp. 117-136). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Doğan-sağlamtimur, N., & Sağlamtimur, B. (2018). SUCUL ORTAMLARDA ÖTROFİKASYON DURUMU VE SENARYOLARI. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 75-82.
- Yağcı, M. (2010). Göllerde Ötrofikasyon, Kontrolü ve Planktonik Gösterge Türler. *Aquaculture Studies*, 2010(1).
- Dereli, E. M., Ertürk, A., & Çakmakçı, M. (2017). Yüzeysel Sularda Ağır Metallerin Etkileri Ve Ötrofikasyon İle İlişkisi. *Turkish Journal of Aquatic Sciences*, 214-230.
- Lin, Q., Zhang, K., McGowan, S., Capo, E., & Shen, J. (2021). Synergistic impacts of nutrient enrichment and climate change on long-term water quality and ecological dynamics in contrasting shallow-lake zones. *Limnology and Oceanography*, 66(9), 3271-3286.
- Qin, B., Gao, G., Zhu, G., Zhang, Y., Song, Y., Tang, X., ... & Deng, J. (2013). Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 58(9), 961-970.
- Fernández, P., Carrera, G., & Grimalt, J. O. (2005). Persistent organic pollutants in remote freshwater ecosystems. *Aquatic Sciences*, 67(3), 263-273.
- Xu, F. L., Jorgensen, S. E., Shimizu, Y., & Silow, E. (2013). Persistent organic pollutants in fresh water ecosystems. *The Scientific World Journal*, 2013, 303815.
- Amoatey, P., & Baawain, M. S. (2019). Effects of pollution on freshwater aquatic organisms. *Water Environment Research*, 91(10), 1272-1287.
- Choudri, B. S., Charabi, Y., Baawain, M., & Ahmed, M. (2017). Effects of pollution on freshwater organisms. *Water Environment Research*, 89(10), 1676-1703.
- Burton Jr, G. A. (1991). Assessing the toxicity of freshwater sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 10(12), 1585-1627.
- Taylan, Z. S., & Özkoç, H. B. (2007). Potansiyel ağır metal kirliliğinin belirlenmesinde akuatik organizmaların biokullanılabilirliği. *Bahkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 17-33.
- Aktop, Y., & Çağatay, İ. T. (2020). Ağır metallerin balıklarda birikimi ve etkileri. *Menba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, 6(1), 37-44.
- Harper, L. R., Buxton, A. S., Rees, H. C., Bruce, K., Brys, R., Halfmaerten, D., ... & Hänfling, B. (2019). Prospects and challenges of environmental DNA (eDNA) monitoring in freshwater poundsa. *Hydrobiologia*, 826(1), 25-41.
- Taberlet, P., Coissac, E., Hajibabaei, M., & Rieseberg, L. H. (2012). Environmental DNA. *Molecular ecology*, 21(8).
- Bálint, M., Pfenninger, M., Grossart, H. P., Taberlet, P., Vellend, M., Leibold, M. A., ... & Bowler, D. (2018). Environmental DNA time series in ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 33(12), 945-957.
- Tona, A. U., Demir, V., Kuşak, L., & Yakar, M. (2022). Su kaynakları mühendisliğinde CBS'nin kullanımı. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 4(1), 23-33.

- Eşbah, H., Bozkaya, G., & Terzi, F. (2013). Ekolojik Planlama ve Modelleme. *SUNUŞ YAZILARI*, 67.
- Reichert, P., Borchardt, D., Henze, M., Rauch, W., Shanahan, P., Somlyódy, L., & Vanrolleghem, P. A. (Eds.). (2001). *River water quality model* (No. 1). IWA publishing.
- Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., & Arabi, M. (2007). A hydrologic/ water quality model Applicatıl 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43(5), 1223-1236.
- Coşkun, M. A. (2012). *Akarsularda su kalitesi belirleme ve modelleme* (Master's thesis, İnönü University (Turkey)).
- Harmancıoğlu, N. B., Gül, A., & Fıstıkoğlu, O. Entegre Su Kaynakları Yönetimi. Teoııan Meriç, B. (2004). Su kaynakları yönetimi ve Türkiye. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 28(1), 27-38.
- Aküzüm, T., Çakmak, B., & Gökalp, Z. (2010). Türkiye'de su kaynakları yönetiminin değerlendirilmesi. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 3(1), 67-74.
- Raporu, Ö. İ. K. SU KAYNAKLARI YÖNETİMİ VE GÜVENLİĞİ.
- Agarwal, A., de los Angeles, M. S., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., ... & Wright, A. (2000). Integrated water resources management.
- Rahaman, M. M., & Varis, O. (2005). Integrated water resources management: evolution, prospects and future challenges. *Sustainability: science, practice and policy*, 1(1), 15-21.
- Biswa, A. K. (2013). Integrated water resources management: is it working?. In *Integrated Water Resources Management in Latin America* (pp. 5-22). Routledge.
- Jain, S. K., & Singh, V. P. (2023). *Water resources systems planning and management*. Elsevier.
- Tang, X., Wu, M., Yang, W., Yin, W., Jin, F., Ye, M., ... & Scholz, M. (2012). Ecological strategy for eutrophication control. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(2), 723-737.
- Ansari, A. A., Gill, S. S., Lanza, G. R., & Rast, W. (Eds.). (2011). Eutrophication: causes, consequences and control.
- Wohl, E., Lane, S. N., & Wilcox, A. C. (2015). The science and practice of river restoration. *Water Resources Research*, 51(8), 5974-5997.
- Smith, B., Clifford, N. J., & Mant, J. (2014). The changing nature of river restoration. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(3), 249-261.
- Yüksel, İ., Sandalcı, M., Çeribaşı, A. G. G., & Yüksek, Ö. Küresel Isınma Ve İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkileri.
- Pulatsü, S., Demir, N., Özcan, D., Çetin, T., & Sayın, S. İklim Krizinin Sucul Ekosistemler İle Su Ürünleri Üretimine Yansımaları Ve Strateji Önerileri.
- Woodward, G., Perkins, D. M., & Brown, L. E. (2010). Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical*

Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 365(1549), 2093-2106.

- Firth, P., & Fisher, S. G. (Eds.). (2012). *Global climate change and freshwater ecosystems*. Springer Science & Business Media.
- Kernan, M., Battarbee, R. W., & Moss, B. R. (Eds.). (2011). *Climate change impacts on freshwater ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Radinger, J., Britton, J. R., Carlson, S. M., Magurran, A. E., Alcaraz-Hernández, J. D., Almodóvar, A., ... & García-Berthou, E. (2019). Effective monitoring of freshwater fish. *Fish and Fisheries*, 20(4), 729-747.
- Park, Y. S., & Hwang, S. J. (2016). Ecological monitoring, assessment, and management in freshwater systems. *Water*, 8(8), 324.
- Stefanidis, K., & Papastergiadou, E. (2024). Ecological monitoring and assessment of freshwater ecosystems: new trends and future challenges. *Water*, 16(11), 1460.

Bölüm 11

MİKROPLASTİKLERİN İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Ataman Altuğ ATICI¹

¹ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Temel Bilimleri Bölümü, Van, TÜRKİYE. ORCID ID: 0000-0001-8700-8969, atamanaltug@yyu.edu.tr

1. GİRİŞ

Sentetik polimerler olarak üretilen plastikler doğada kendiliğinden bulunmamaktadır. Bunun dışında doğal polimerlerin modifiye edilmiş halini ve çeşitli katkı maddelerini içermektedir. Yaygın bir şekilde kullanılmasının nedenleri arasında hafif ve esnek olmaları, ısı ve elektirik yalıtımı yönünden kullanışlı olmaları ve üretim maliyetlerinin düşük olması gibi çok yönlü kullanım özellikleri sıralanabilir (Bingel ve ark.,1987; Atici ve ark., 2020; Aydın ve ark., 2023; Plastic Europe, 2024; Atıcı, 2025a; Atıcı, 2025b). Dünya genelinde plastik üretimi 2018 yılında 360.7 milyon ton iken bu rakam 2024 yılı verilerine göre 430.9 milyon tona ulaşmıştır (Plastic Europe, 2024).

Her yıl artan plastik tüketimi, hem çok büyük miktarlarda plastik üretimi ile geri dönüştürülmüş ürünlere olan talebin yetersizliğini hem de plastiklerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki doğrudan etkisi nedeniyle artan sağlık risklerini ortaya çıkarmaktadır. Geyer ve ark. (2017) plastik atıkların 2015 yılına kadar yalnızca % 9'unun geri dönüştürüldüğünü, % 12'sinin yakıldığını ve üretilen atıkların çoğunun çöp atılan alanlara gönderildiğini veya çevreye karıştığını bildirmiştir. Plastiklerin yanlış kullanımı nedeniyle plastik atıkların yaygın olması ve yönetimsel sorunlar birçok alanda plastiklerin atık olarak birikmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda plastiklerin aşamalı olarak kullanımdan kaldırılması ve özellikle su ortamlarına salınımının önemli ölçüde azaltılması gerekliliğine olan ilgi giderek artmaktadır (Atici ve ark., 2022; Oleksiuk ve ark., 2023).

İnsan kaynaklı faaliyetler çevreyi öylesine etkilemiştir ki, araştırmacılar tarafından 2000'li yıllardan itibaren "Antropocen" adı verilen yeni, resmi olmayan bir jeolojik çağ tanımlanmıştır (Crutzen ve Stoermer, 2022).

Mikroplastikler konusunda ortaya çıkan endişelerin çoğu, mikroplastiklerin içerdiği kimyasal katkı maddelerinin mikroplastikten ayrılması ile ortaya çıkabilecek risklerden kaynaklanmaktadır (Bakir ve ark., 2014). Aslında plastikler, % 106'ya kadar kirleticiyi yoğunlaştırabilir (Mato ve ark., 2001). Mikroplastikler vücut yüzeyleriyle temas ettiğinde ve emildiğinde bu kirleticiler açığa çıkarak alttaki dokulara ulaşabilir (Browne ve ark., 2011). Üretilen plastiğin ortalama % 4'ü katkı maddelerinden oluşmaktadır (EFSA, 2016). Ancak katkı maddelerinin yüzdesi önemli ölçüde değişebilmekte, hatta bazı durumlarda toplam malzemenin yarısı kadar olabilmektedir (Lithner ve ark, 2011). Sucul ortamlardaki mikroplastikler, kimyasal katkı maddelerine ek olarak, poliklorlu bifeniller (PCB), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) ve DDT gibi organoklorlu pesti-

sitler de dahil olmak üzere kalıcı organik kirleticileri (POP) biriktirebilir (Mato ve ark., 2001; Rochman ve ark., 2015).

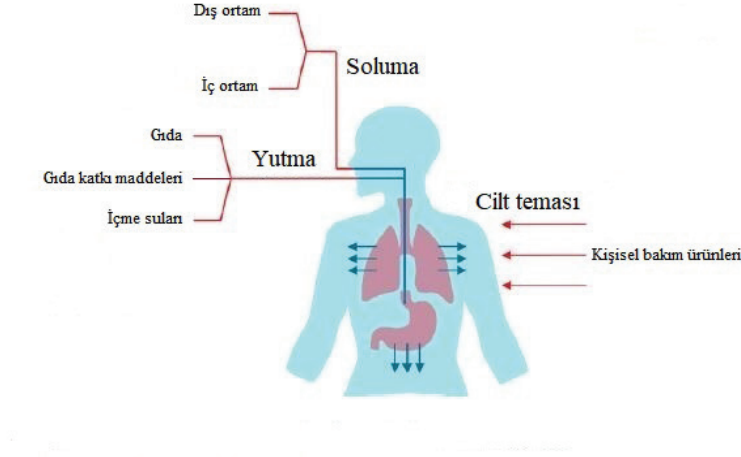
Plastik üretim sürecinde katkı maddesi olarak (örneğin boyalarda, alev geciktiricilerde, dolgu maddelerinde ve stabilizatörlerde) kullanılan veya sucul ortamda mikropplastikler tarafından yüksek konsantrasyonlarda tutulabilen Al, As, Ba, Br, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Pb, Sb, Sn, Ti ve Zn gibi ağır metaller besin zinciri yoluyla sucul canlılara ve insanlara (Barboza ve ark., 2018; Revel ve ark., 2018; Jinhui ve ark., 2019) aktarılabilmektedir. Ayrıca mikropplastiklerin farklı mikrobiyal topluluklar için substrat oluşturabildiği ve canlılar tarafından tüketildiğinde hastalıklar oluşturduğu da belgelenmiştir (Li ve ark., 2022).

Günlük hayatta en yaygın kullanılan plastik polimerler arasında polipropilen (PP), polietilen (PE), polikarbonat (PC), polietilen tereftalat (PET), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS) ve naylon yer almaktadır (Aydın ve ark., 2023; Atıcı, 2025a).

Bu çalışmada, mikropplastik alanında yapılan araştırmalar değerlendirilerek insanların plastik parçacıklara maruz kalma yolları, insan vücudunda tespit edilen plastik parçacıkların dağılımları ve plastik parçacıkların insanlar üzerinde oluşturduğu sağlık etkileri ele alınmıştır.

2. MARUZ KALMA YOLLARI

Özellikle 10 μm 'den küçük boyutta plastiklere maruz kalması insan sağlığı açısından endişe oluşturmakla beraber maruz kalma seviyesi yaş, cinsiyet, beslenme ve yaşam şekline göre değişiklik gösterebilmektedir (Ali ve ark., 2024; Özsoy ve ark., 2024). Yapılan çalışmalar, esas olarak maruz kalma yollarının yutma, solunum ve cilt teması (Şekil 1) ile gerçekleştiğini göstermektedir (Amato-Lourenço ve ark., 2020; Campanale ve ark., 2020; Li ve ark., 2023). Sun ve Wang, 2023).



Şekil 1. İnsanların mikroplastiklere maruz kalma yolları (Sun ve Wang, 2023'ten uyarlanmıştır).

2.1. Yutma Yoluyla Plastik Parçacıkların Alımı

İnsan vücuduna küçük boyutlu plastik parçacıkların girmesinin başlıca yollarından biri, plastikler ile kontamine olmuş olan gıdaların tüketilmesidir. Yapılan çalışmalarda başta su ürünlerinden balıklarda (Güven ve ark., 2017; Atici ve ark., 2021; Gedik ve ark., 2023; Atıcı, 2024), midyelerde (Atici, 2022; Gedik ve Eryaşar, 2020) ve karideslerde (Yücel ve Kılıç, 2025) olmak üzere sofraya tuzu (Gündoğdu, 2018) gibi diğer gıdalarda ve hazır içme sularında (Mason ve ark., 2018) mikroplastikler tespit edilmiştir. Ayrıca insanların, kirlenmiş topraktan mikroplastikleri alan bitkileri tüketmesi ile günde tahmini 80 gram mikroplastik alabileceği rapor edilmiştir (Ebere ve ark., 2019).

2.1.1. Su Ürünleri Tüketimi

Su ürünleri tüketimi, insanların mikroplastik maruziyetinin önemli bir yolunu temsil etmekte olup, dünya çapında yaklaşık 3 milyar insanın hayvansal protein ihtiyacının yaklaşık %20'sini karşılamaktadır. Dünya genelinde su ürünleri tüketimi yılda 20 kg'ın üzerindedir (FAO, 2016). Küçük boyutları nedeniyle mikroplastikler çok çeşitli sucul canlıları tarafından doğrudan yutulabilir (Şekil 2) veya besin zinciri boyunca dolaylı yoldan alınabilir (Cole ve ark., 2013; Aytan ve ark., 2022).



Şekil 2. Türk Somonu (*Oncorhynchus mykiss*)'nin sindirim sisteminde tespit edilen mikroplastikler (ölçek 300 ila 500 μm arasındadır) (Atıcı, 2024).

Mikroplastikler omurgasızlar, kabuklular ve balıklar dahil olmak üzere insan tüketimine yönelik birçok türde bulunmaktadır (Güven ve ark., 2017; Gündoğdu ve ark., 2020; Atıcı ve ark., 2021; Çini Barutçu ve Polat, 2021; Yozukmaz, 2021; Atıcı, 2022; Gedik ve Eryaşar, 2020; Gedik ve ark., 2023; Atıcı, 2024; Atıcı, 2025a; Atıcı, 2025b; Yücel ve Kılıç, 2025).

2.1.2. Şişelenmiş Su Tüketimi

Birçok plastik şişe su markasında mikroplastikler tespit edilmiştir. Mikroplastiklerin, plastik şişelerin kendisinden, şişeleme ve nakliye sürecinden kaynaklandığı düşünülmektedir. İçme suyu arıtımı, mikroplastikler de dahil olmak üzere çeşitli partikülleri gidermede genel olarak etkili olsa da, sistemdeki belirli bileşenlerin plastikten yapıldığını dikkate almak önemlidir (Mintemig ve ark., 2017). Zamanla, bu plastik malzemelerin aşınması veya bozulması, potansiyel olarak içme suyuna mikroplastiklerin karışmasına neden olabilir (WHO, 2019).

Ayrıca, bazı hazır sularda kullanılan şişeler ve kapaklar da plastikten yapılmış olup, bu durum içme suyunda mikroplastik kontaminasyonunun potansiyel bir kaynağı oluşturmaktadır (Oßmann ve ark., 2018; WHO, 2019). Şişelenmiş suyun yanı sıra musluk suyu da dahil olmak üzere çeşitli su kaynakları, insanların mikroplastik alımına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. İnsanların her yıl yaklaşık olarak ortalama 39.000 ila 52.000 mikroplastik parçacık tükettiği tahmin edilmekte ve

musluk suyu toplam alımının yaklaşık 3.000 ila 4.000 adetini (4.34 MP/L) oluşturmaktadır (Chen ve ark., 2023).

Yapılan çalışmalara bakıldığında Mason ve ark. (2018), çeşitli ülkelerden satın alınan 259 adet şişelenmiş suların % 93'ünde en yaygın polimer özelliği PP olan mikroplastik tespit etmişlerdir. Ortalama MP miktarı 10.4 adet/L ($>100 \mu\text{m}$) olurken, çoğunlukla lif tipinde mikroplastik belirlenmiştir. Başka bir çalışma ise Almanya'da gerçekleştirilmiş olup, en yüksek mikroplastik miktarları sırasıyla depozitolu plastik şişelerde 118 MP/L, tek kullanımlık plastik şişelerde 14 MP/L ve içecek kutularında ise 11 MP/L olarak bildirilmiştir. Polimer tipi olarak depozitolu şişelerde PP ve polyester (PES) yaygın olarak bulunurken, diğer şişelerde PE belirlenmiştir. Bu çalışmalar dışında maden sularının da mikroplastik içerdiğine (7.4 MP/L gibi) yönelik çalışmalar bulunmaktadır (Makhdoumi ve ark., 2021; Praveena ve ark., 2022).

Şişelenmiş sular dışında Van ilindeki içme sularında mikroplastik parçacıklarının araştırıldığı çalışmada, su örneklerinde PVC, PE, PP ve PS özellikte mikoplastikler tespit edilmiştir (Ayşin, 2024).

2.1.3. Mikroplastik İçerebilen Diğer Gıdalar

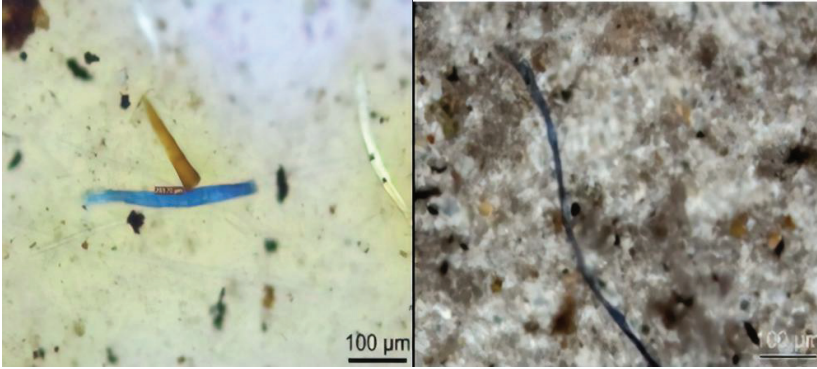
Bal, süt, tuz ve şeker gibi çeşitli gıdaların mikroplastikler ile kontamine olduğuna farklı çalışmalarda rastlanılmıştır. Bu ürünlere işleme veya paketlenme sırasında mikroplastikler bulaşabilmektedir. Başka bir çalışmada ise, farklı Avrupa ülkelerinden alınan bal örnekleri analiz edilmiş ve hepsinde 40-660 MP/kg arasında değişen farklı renklerde lif tipinde mikroplastikler bulunmuştur. Iñiguez ve ark. (2017), İspanya'daki bazı ticari sofr tuzu örneklerinde 50-280 MP/kg arasında değişen ve en sık polimerler tipleri PET, PP ve PE olan mikroplastikler tespit etmişlerdir.

Bangladeş'te ticari olarak satılan şekerlerde ortalama MP miktarı 344 ± 32 adet/kg olurken, çoğunluğu $300 \mu\text{m}$ 'den küçük boyutta olmuştur (Afrin ve ark., 2022). Makhdoumi ve ark. (2023) ise şekerdeki MP miktarını ortalama 58 ± 21 adet/kg olarak bildirmiştir.

Başka bir gıda ürünü olan sütle ilgili yapılan çalışmalarda ise Meksika'da satılan sütlerde ortalama MP miktarı Diaz-Basantes ve ark. (2020) tarafından 40 adet/L (10-100 MP/L arasında) ve Kutralam-Muniasamy ve ark. (2020) tarafından ise 23 adet/L (1-14 MP/L arasında) olarak bulunmuştur.

2.2. Solunum Yoluyla Plastik Parçacıkların Alımı

Mikroplastiklerin insan vücuduna giriş yollarından bir diğeri de soluma yoluyla havadan (Şekil 3) gerçekleşmektedir (Gasperi ve ark., 2018). Yapılan bir çalışma ev tozundan solunan mikroplastik lifleri miktarının aynı öğünde midye tüketiminden kaynaklanan mikroplastik liflerinin yutulmasından daha fazla olduğunu göstermiştir (Catarino ve ark., 2018). Mikroplastikler rüzgarla veya atmosferik birikimlerle taşınmasının yanı sıra tarımsal ve gübreli arazilerin erozyonundan, kurumuş çamurlardan, atık su arıtma tesislerinden, sentetik kumaşlardan, endüstriyel emisyonlardan, yol tozlarından ve deniz aerosollerinden de ortaya çıkabilmesi söz konusudur (Rezaei ve ark., 2019). Okyanuslardaki mikroplastik kirliliğinin yaklaşık % 7'sinin rüzgarlarla taşındığı tahmin edilmektedir (Prata, 2018).



Şekil 3. São Paulo şehrindeki havada bulunan örnek plastik parçacıklar (Amato-Lourenço ve ark., 2020) (Kaydeden Luciana dos Santos Galvão, Kimyasal Analiz Laboratuvarı, Teknolojik Araştırma Enstitüsü (IPT), São Paulo, Brezilya).

150 m²'lik oldukça geniş bir alveolleşme yüzeyine ve 1 µm'den daha küçük çok ince bir doku bariyerine sahip olan insan akciğeri, özellikle nanopartiküllerin kan dolaşımına geçmesine yol açabilir (Lehner ve ark., 2019). Bu durumda havadaki partiküllerin boyutu, solunum sistemine girip giremeyeceklerini belirlemede önemli olup, uzunluğu 5 µm'den az ve çapı 3 µm'den küçük plastik parçacıkların solunma potansiyeli olduğu bildirilmiştir (Gasperi ve ark., 2018). Atmosferde mikroplastiklerin varlığını belgelemeye yönelik yapılan çalışmalarda Amerika'daki bireylerin solunum yoluyla yıllık 74.000 ile 121.000 arasında partiküle maruz kaldığı rapor edilmiştir (Cox ve ark., 2019).

Amato-Lourenço ve ark. (2020) insan akciğerlerinde 5.5 µm'den küçük mikroplastik parçacıklar ve 8.12-16.8 µm boyutunda mikroplastik lifler tespit etmiştir. Akciğer dokusunda tespit edilen mikroplastiklerin

boyutu, atmosferdekilerden daha küçük olmakla beraber, bu çalışma insanların solunum yoluyla mikroplastiklere maruz kalabileceğini bir kez daha doğrulamaktadır.

Paris'te dış ve iç ortam havasının ortalama mikroplastik değerleri sırasıyla 5.4 MP/m^3 ve 0.9 MP/m^3 (Dris ve ark., 2017) iken, *Şanghay*'ın dış ortam havasında ortalama mikroplastik değeri 1.42 MP/m^3 ve boyut ise 23-5000 μm aralığında belirlenmiştir (Liu ve ark., 2019a).

2.3. Cilt Temasıyla Plastik Parçacıkların Alımı

İnsan vücuduna mikroplastiklerin alınabilme ihtimalinin olduğu son maruz kalma yolu, mikro ve nanoplastik içeren sabun, diş macunu, kozmetik ürünleri ile yüz veya vücut peelingleri gibi kişisel bakım ürünlerinin gözenekler yoluyla cilde temas etmesi ya da kirlenmiş sularla yıkama yapılması sırasında olabilir. Ayrıca plastik üretimi ve atık yönetimi gibi sektörlerde çalışan işçiler, doğrudan cilt teması yoluyla mikroplastiklerle temas halindedir. Deri tabakasının içine partiküllerin nüfuz etme durumu 100 nm'den küçük parçacıklarla sınırlı olabileceğinden mikroplastiklerin yerine nanoplastiklerin emiliminin daha olası olduğu vurgulanmaktadır (Revel ve ark., 2018). Bununla beraber maruz kalma seviyesi, cilt gözeneklerinin büyüklüğü ve özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle bireyler arasında değişiklik gösterebilir (Enyoh ve ark., 2020; Emenike ve ark., 2023).

Enyoh ve ark. (2020) yaptıkları araştırmada, yüz yıkama ürünlerinin (% 50) ve yüz peelinglerinin (% 67) önemli seviyede mikro boncuklar içerdiğini belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada ise koruyucu cep telefonu kılıfları (PMPC) kullanım sırasında mikroplastik üretebildiği ve bunların insan eline bulaşabileceği belirtilmiştir.(Li ve ark., 2023).

3. İNSAN VÜCUDUNDA TESPİT EDİLEN MİKROPLASTİKLERİN DAĞILIMI

Mikroplastikler emildikten sonra, partiküller dolaşım sistemine erişebilir, diğer organlara yayılabilir ve potansiyel olarak çeşitli organlara veya dokulara zarar verebilir. Yapılan bir çalışma, trakea içine verilen PE tipi polimerlerin farelerin akciğerlerinde en fazla biriktiğini, bunu sırasıyla kalp, karaciğer ve bağırsakların izlediğini ortaya koymuştur (Han ve ark., 2021).

Mikroplastiklerin yaygın varlığı insan kanında (Leslie ve ark., 2022), beyin, karaciğer ve böbrekte (Horvatits ve ark., 2022; Nihart ve ark., 2024), akciğerlerde (Pauly ve ark., 1998; Liu ve ark., 2019a; Liu ve ark., 2019b; Baeza-Martínez ve ark., 2022a; Baeza-Martínez ve ark., 2022b; Jen-

ner ve ark., 2022; Alpaydin ve ark., 2024), plasentada (Braun ve ark., 2021; Ragusa ve ark., 2021; Liu ve ark., 2023; Zhu ve ark., 2023), idrar ve gaitada (Harvey ve Watts, 2018; Horvatits ve ark., 2022; Pironti ve ark., 2022; Santos ve ark., 2018; Schwabl ve ark., 2019; Smith ve ark., 2018; Sripada ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2021a; Zhang ve ark., 2021b), anne sütünde (Flack ve Shaw, 2003; Halden, 2010; Ragusa ve ark., 2022) ve üreme sisteminde (Fournier ve ark., 2020; Zhao ve ark., 2023a) tespit edilmiştir.

3.1. Akciğer

Pauly ve ark. (1998), insan akciğer dokularında mikropplastiklerin varlığını ilk kez tespit ettiler. Sonraki araştırmalar, insan akciğer dokularında farklı boyutlarda (1.60-5.56 µm) ve farklı kategorilerde (PP, PET ve PS) ve farklı içeriklerde (31 ve 39 mikropplastik) mikropplastikler tespit etmişlerdir (Liu ve ark., 2019a; Liu ve ark., 2019b).

Alpaydin ve ark. (2024) ise akciğer dokusunu yansıtan bronkoalveolar lavaj (BAL) sıvısında ve kanda mikropartiküllerin varlığını, bileşimini ve karakterizasyonu incelenmişlerdir. BAL örneklerinde en sık gözlemlenen MP boyutu 4.19-792.00 µm arasında iken, rengi gri/beyaz olarak tespit edilmiştir. Tanımlanan polimer tipleri ise PA, PES, PVC ve poliüretanlar (PU) olmuştur. Kan örneklerinde ise MP boyutları 13.14 ile 20.29 µm arasında olup, ağırlıklı olarak gri/beyaz ve mavi renkte belirlenmiştir.

3.2. Kan

Yakın zamanda araştırmacılar, insan kanında PP, PET, PS ve polimetil metakrilat (PMMA) polimer özelliğinde mikropartiküllerin varlığını bildirmişlerdir (Leslie ve ark., 2022). Yapılan çalışmada MP'lerin insan kan dolaşımına ulaşabileceği görülmüş olup, mikropartiküllerin boyutu ≥ 700 nm olarak tespit edilmiştir. Kandaki ortalama MP miktarı ise 1.6 µg/mL olarak belirlenmiştir.

3.3. İdrar ve Gaita

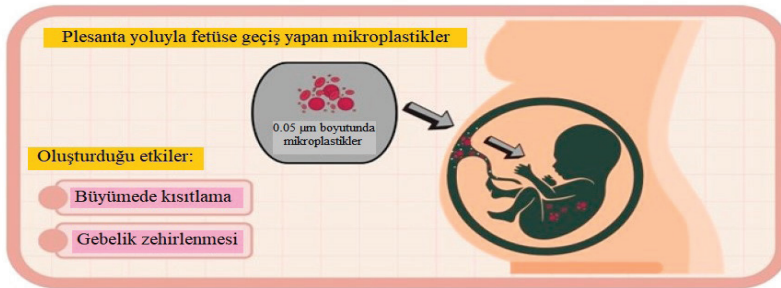
İdrar örnekleri, kimyasalların atılımı hakkında bilgi sağladığı, toplanmasının kolay olduğu, invaziv olmayan ve işlenmesi uygun fiyatlı bir örnek olduğu için insan biyomonitör çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Santos ve ark., 2018). Çeşitli yaşlarda ve cinsiyetlerdeki insanlardan toplanmış idrar örneklerinde 4 ila 15 µm arasında değişen boyutlarda mikropplastikler tespit edilirken erkeklerde PP ve PE, kadınlarda ise PVC ve polietilen vinil asetat (PVA) özellikle polimer belirlenmiştir (Pironti ve ark., 2022). Horvatits ve ark. (2022), ise 3 vakada böbreklerde boyutları 10-20 µm (0-0.3 MP/g) arasında değişen MP tespit etmişlerdir.

İnsanlarda gastrointestinal düzeydeki mikroplastik seviyelerine ilişkin düşünceler, insan dışkıında mikroplastiklerin bulunmasıyla daha da doğrulanmıştır. Gaitada yapılan ilk çalışmalara bakıldığında her 10 g dışkıda, çoğunlukla PE ve PP'den oluşan (boyutları 5 ile 500 mm arasında değişen) yirmi plastik parçacık tespit edilmiştir (Harvey ve Watts, 2018). Böylelikle gerçekten de insan boşaltım sisteminin, yutulan mikro ve nanoplastiklerin %90'ına kadarını uzaklaştırmaktan sorumlu olduğu görülebilmektedir (Smith ve ark., 2018).

Diğer bir çalışmada ise Avrupa ve Asya'da 33-65 yaş arası sağlıklı insanlardan alınan dışkı örneklerinde PP ve PET özellikli ortalama 2 adet mikroplastik tespit edilmiştir (Schwabl ve ark., 2019). Başka bir çalışmada, Çin'de 18-25 yaş arası bireylerden toplanan örneklerin % 95.8'inde MP miktarları 1-36 MP/g arasında bulunurken, PP tipinde polimer en baskın mikroplastik olmuştur (Zhang ve ark., 2021a). Mikroplastiklere maruz kalma konusunda hassas kişiler olarak karşımıza hamile kadınlar ve bebekler çıkmaktadır (Sripada ve ark., 2022). Bebeklerde yapılan çalışmada dışkıdaki mikroplastik (PET polimer özelliğinde) seviyesi 5700-82.000 ng/g arasında iken, yetişkinlerde daha düşük seviyede 2200-16.000 ng/g arasında tespit edilmiştir. Çalışma ile bebeklerin mikroplastiklere daha yüksek seviyede maruz kaldığı belirlenmiştir (Zhang ve ark., 2021b).

3.4. Plasenta

Ragusa ve ark. (2021) ilk kez insan plasentasında 5-10 µm arasında değişen 12 adet plastik özellikte parçacık tespit etmişlerdir. Daha sonraki çalışmalarda ise Zhu ve ark. (2023) 17 plasenta örneğinde boyutları 20.34-307.29 µm arasında değişen mikroplastikleri belirlemişlerdir. Liu ve ark. (2023) da anne ve bebek çiftlerine yönelik yaptıkları çalışmada plasenta, mekonyum, bebek dışkısı, anne sütü ve bebek maması örneklerinde 16 tip mikroplastik tespit etmiştir. Mikroplastiklerin plasentaya geçiş yolu Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Mikroplastiklerin plasenta yoluyla fetüse geçiş yolu (Lin ve ark., 2023'ten uyarlanmıştır).

Çin’de yapılan bir çalışmada ise çeşitli yaşlardaki annelerden alınan 17 plasenta dokusu üzerinde yapılan bir çalışmada, doku başına 0.28-9.55 MP arasında değişen seviyede (ortalama 2.70 ± 2.65 MP/g) mikroplastik belirlenirken, LDIR (laser direct infrared) yöntemiyle toplam 11 farklı plastik polimer türü (PVC [% 43.3], PP [% 14.6], polibütilen süksinat [PBS, % 10.9], PET [% 7.3], PC [% 6.9], PS [% 5.8], PA [% 5.4], polyester elyaf [% 2.9], PE [% 1.4], poliakrilamid [PAM, % 0.7] ve polisülfon [PSF, % 0.7]) tespit edilmiştir (Zhu ve ark., 2023). Almanya’da yapılan çalışmada ise plasenta dokusunda $50 \mu\text{m}$ ’den büyük boyutlarda PE ve PP özellikte polimer bulunurken, merkezi bölgeden toplanan dokuda PE ve PU tespit edilmiştir (Braun ve ark., 2021).

Bilim insanları $150 \mu\text{m}$ ’den küçük sentetik parçacıkların yalnızca % 0.3’ünün emilmesinin beklendiğini, daha düşük bir oranın (% 0.1) ise $10 \mu\text{m}$ ’den büyük parçacıklar içerdiğini ve bu parçacıkların ise hem organlara hem de hücre zarlarına ulaşabileceğini ve plasentayı geçebileceğini tahmin etmektedir (Barboza ve ark., 2018).

3.5. Anne Sütü

Sağlıklı yenidoğanlar için temel besin kaynağı olan anne sütü, anenin beslenme şekline ve beslenme durumuna bağlı olarak içeriğinde farklılık gösteren özel bir besindir (Flack ve Shaw, 2003). İtalya’daki çalışmada, değişken yaşlardaki kadınlardan toplanan anne sütü örneklerinde 0-2.72 MP/g (boyutları $4-9 \mu\text{m}$ [% 47] arasında, $\leq 3 \mu\text{m}$ [% 29] ve $10 < \mu\text{m}$ [% 24] olan) arasında değişen miktarlarda plastik parçacıklar bulunurken, Raman spektroskopisi yöntemi ile PE (% 38), PVC (% 21) ve PP (% 21) özellikte polimerler belirlenmiştir. Anne sütünde mikroplastiklerin tespit edilmesi, yenidoğanlarda mikroplastik kaynağı olarak anne sütünün önemli etkenlerden biri olabileceğini düşündürmektedir (Ragusa ve ark., 2022). Ayrıca plastik ve epoksi reçinede sıklıkla bulunan bisfenol a (BPA)’nın anne sütünde tespit edilmesinin mikroplastikler ile ilişkili olabileceği de bildirilmiştir (Halden, 2010).

3.6. Erkek Üreme Sistemi

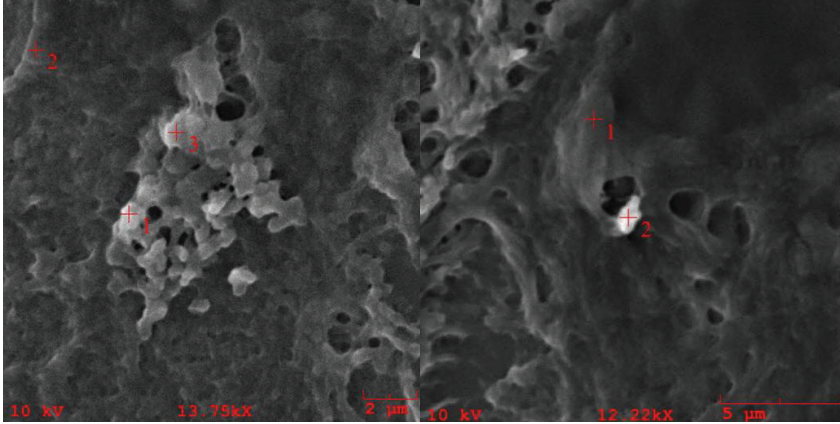
Mikroplastiklerin insan üreme sistemi üzerindeki etkisini inceleyen araştırmalar sınırlı sayıda olmakla birlikte, çok sayıda hayvan çalışmasının sonuçları göz önüne alındığında, mikroplastiklerin insan üreme sistemleri üzerinde zararlı etkileri olabileceği öne sürülmektedir (Fournier ve ark., 2020).

Zhao ve ark. (2023a) tarafından Çin’de farklı yaşlardaki testis donörü üzerinde yapılan bir çalışmada, LDIR yöntemi kullanılarak 6 bireyin 4’ünde ortalama 1.60 ± 15.5 MP/g plastik parçacık bulunmuştur. Aynı ça-

lişmada, farklı yaşlardaki bireylerden alınan 30 sperm örneğinde ise ortalama 0.23 ± 0.45 MP/mL plastik parçacık bildirilmiştir. En baskın olan polimer tipi testislerde PS iken, sperm örneklerinde PE ve PVC olarak belirlenmiştir.

3.7. Beyin, Karaciğer ve Böbrek Dokuları

Nihart ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada insan beyin, karaciğer ve böbrek dokularında bulunan küçük plastik parçacıkların büyük çoğunluğunun PE özellikle polimerlerden oluştuğu rapor edilmiştir. Normal ölü beyin örneklerindeki plastik partiküllerin seviyeleri, karaciğer veya böbreklerde görülen konsantrasyonlardan 7-30 kat daha fazla tespit edilmiş olup, demans vakalarından alınan beyin örneklerindeki plastik parçacıkların miktarı ise daha da yüksek olmuştur. Araştırmacılar beyinde bulunan parçacıkların karbon bazlı olduğunu enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi ile SEM kullanarak doğrulamışlardır (Şekil 5).



Şekil 5. Beyin dokularında tespit edilen karbon bazlı parçacıklar (Nihart ve ark., 2024).

4. MİKROPLASTİKLERİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNE ETKİLERİ

Plastik üretiminde kullanılan katkı maddelerinden özellikle nörolojik sorunlar (öğrenme bozuklukları ve otizm), astım, endokrin sistemi bozucular, çeşitli kanserler (testis, prostat ve meme kanseri gibi), üreme sisteminde bozukluklar (kısırlık ve genital malformasyonlar) ve metabolik sorunlar (diyabet ve obezite) dahil olmak üzere çeşitli hastalıklar ve olumsuz durumlarla ilişkilendirmiştir (Wright ve Kelly, 2017). Ayrıca bu parçacıklar maruz kalma seviyesine bağlı olarak oksidatif strese, sitotoksiteye ve diğer dokulara translokasyona neden olabilmektedirler (Prata ve ark., 2020).

4.1. Yutma Nedeniyle Karşılaşılan Sorunlar

4.1.1. Gastrointestinal Sorunlar

Mikroplastiklere maruz kalmayla ilişkili önemli bir sağlık sorunu olarak gastrointestinal problemler ortaya çıkmıştır. Araştırmalar mikroplastik parçacıkların, kirlenmiş yiyecek veya su yoluyla yutulmasının çeşitli gastrointestinal sorunlara yol açabileceğini öne sürmektedir (Zhao ve ark., 2023b). Bu sorunlar arasında sindirim sisteminin iltihaplanması, kabızlık, irritabl bağırsak sendromu, bağırsak mikrobiyotasının bozulması ve bağırsak geçirgenliğindeki değişiklikler yer alabilir (Zhao ve ark., 2023b; Qiao ve ark., 2019). Ayrıca, mikroplastiklerin sindirim sisteminde biriktiği ve burada fiziksel tahrişe ve tıkanmalara neden olabileceği keşfedilmiştir (Wright ve Kelly, 2017). Mikroplastiklerin gastrointestinal sistemdeki hücresel etkilerinin, adjuvan aktivitelerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir; bu da yüzeylerine adsorbe olan biyomoleküllere karşı bağışıklık tepkisini artırabilecekleri anlamına gelir (Powell ve ark., 2010). Mikroplastik maruziyeti, konakçı organizma ile doğal bağırsak mikrobiyotası topluluğu arasındaki simbiyotik ilişki üzerinde önemli etkilere sahiptir ve disbiyoz olarak bilinen bir bozulmaya yol açar. Disbiyoz, konakçının bağışıklık sistemi üzerinde zararlı etkilere sahip olabilir ve potansiyel olarak kronik hastalıklara, patojenik enfeksiyonlara karşı artan savunmasızlığa ve bağırsak mikrobiyotasının genetik yeteneğinde ve ifadesinde değişikliklere yol açabilir. (Fackelmann ve Sommer, 2019; Deng ve ark., 2020).

Dış macunundaki mikroplastikler ve mikro boncuk parçacıkları bilinçsizce yutulabilir ve gastrointestinal sistem yoluyla emilebilir (Lassen ve ark., 2015). Mikropartiküllerin dönüşümlü olarak yutulması, kromozomlarda değişikliklere neden olabilir ve bu da kısırlık, obezite ve kansere yol açabilir (GESAMP, 2015). Ayrıca mikroplastiklerin bağırsak sistemini kirletmesi, vücudun diğer bölgelerine yayılma açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır (Kor ve Mehdinia, 2020).

Ayrıca Kannan ve Vimalkumar (2021) tarafından plastikler ve içeriğindeki çeşitli katkı maddelerin obeziteye neden olduğu bildirilmiştir.

4.1.2. Endokrin Sisteminin Bozulması

Endokrin sisteminin bozulması, mikroplastiklerin potansiyel etkilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Mikroplastikler, endokrin bozucu bileşikler de dahil olmak üzere çeşitli kimyasalları içerebilir veya dış ortamdan emebilir. Endokrin bozucu bileşikler, endokrin sistemin normal işleyişine müdahale edebilme özelliğinde olan ve organizmalarda sağlık

sorunlarına yol açabilen maddeler olarak tanımlanmaktadır (Surana ve ark., 2022).

Endokrin bozucu bileşikler olarak bilinen BPA, nonilfenol, ftalat esterleri ve oktilfenol gibi bileşikler, plastik üretimi sırasında katkı maddesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir (Wee ve ark., 2022). Mikroplastikler yutulduğunda veya organizmalarla temas ettiğinde serbest duruma geçen bu bileşikler hormonal denge, üreme fonksiyonu, gelişim ve genel sağlık üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Kontrick, 2018).

4.1.3. Patojenlerin Taşınması

Mikroplastikler bakteri ve çeşitli organizmaları kendine yüzeyine çekerek sucul ortamlarda biyofilmlerin oluşmasına neden olabilmektedir (Kirstein ve ark., 2016). Böylelikle “Plastisfer” terimi ilk kez Zettler ve ark. (2013) tarafından deniz ortamlarındaki mikroplastik yüzeylerde yaşayan benzersiz mikrobiyal toplulukları tanımlamak için kullanılmıştır.

Mikroplastikler, patojenik bakteriler için taşıyıcı görevi gördüklerinde, su kaynaklarını ve gıda zincirlerini kirleterek hastalıkların yayılmasına neden olabilirler (Li ve ark., 2022). Yutulduktan sonra, mikroplastikler ve bunlarla ilişkili patojenik bakteriler gastrointestinal sistemde birikecek enfeksiyonlara veya inflamatuvar yanıtlara neden olabilir. Mikroplastiklerde bulunan bazı patojenik bakteriler, insanlarda gastrointestinal hastalıklar, solunum yolu enfeksiyonları ve cilt hastalıklarıyla ilişkilendirilmiştir (Galafassi ve ark., 2021).

Hong Kong’daki atık su arıtma tesislerinde yapılan ve kanalizasyondaki mikroplastiklerin kolonizasyonunu inceleyen bir çalışma, bakteriyel toplulukların ham kanalizasyonda bekletilen polietilen mikro boncukların yüzeylerinde biyofilmler oluştuğunu ve zamanla bakteriyel çeşitlilikte bir artış olduğunu, mikroplastikler üzerindeki bakteriler arasında insan ve balık patojenlerinin bulunduğunu ortaya koymuştur (Lai ve ark., 2022).

Başka bir çalışmada ise Kuzey ve Baltık Denizi’nden toplanan farklı mikroplastik yüzeylerinde *Vibrio parahaemolyticus* türü belirlenmiş ve mikroplastikler üzerindeki *Vibrio* kolonizasyonunun çevredeki deniz suyundan kaynaklanabileceği öne sürülmüştür (Kirstein ve ark., 2016).

4.2. Soluma Nedeniyle Karşılaşılan Sorunlar

4.2.1. Solunum Yolu Sorunları

Havada bulunan mikroplastiklerin solunması solunum ile ilgili sorunlara yol açabilir. Küçük boyutlu bu partiküller solunum yolunda tah-

rişe ve iltihaplanmaya neden olarak öksürük, hırıltı, nefes darlığı gibi semptomlara ve astım gibi önceden var olan solunum rahatsızlıklarının şiddetlenmesine neden olabilir (Abbasi ve ark., 2019; Alpaydin ve ark., 2024). Ayrıca ani bronşiyal reaksiyonlar (astım benzeri), yaygın interstisyel fibrozis ve lif inklüzyonlu granülomlar (ekstrinsik alerjik alveolit, kronik pnömoni), bronşiyal ve peribronşiyal dokuda inflamatuvar ve fibrotik değişiklikler (kronik bronşit) ve interalveolar septa lezyonları (pnömotoraks) da görülebilen rahatsızlıklardır (Prata, 2018).

Daha ince lif özelliğindeki plastikler solunum sistemine solunabilirken, daha uzun liflerin akciğer hücrelerinde kalıcılığı ve toksisitesi artabilmektedir. (Warheit ve ark., 2001). 0.3 μm 'den daha ince ve 10 μm 'den daha uzun olan liflerin daha çok kanserojen etki gösterdiği bildirilmiştir (Wright ve Kelly, 2017). Başka bir çalışmada ise 50 nm boyutundaki polistiren parçacıklarının, akciğer epitel hücreleri ve makrofajlar üzerinde genotoksik ve sitotoksik etkilere yol açtığı belirlenmiştir (Paget ve ark., 2015).

4.2.2. Kardiyovasküler Sorunlar

Çalışmalar, mikroplastiklere maruz kalmanın hipertansiyon, ateroskleroz ve kalp ritmi bozuklukları dahil olmak üzere kardiyovasküler rahatsızlıkların gelişmesine veya kötüleşmesine katkıda bulunabileceğini göstermektedir (Persiani ve ark., 2023). Son araştırmalar, vücut sıvılarında çeşitli şekil ve boyutlarda plastik parçacıkların bulunabileceğini ve bunların birikiminin nihayetinde vasküler hastalığa yol açabileceğini göstermiştir (Kontrick, 2018; Leslie ve ark., 2022).

4.3. Cilt Teması Nedeniyle Karşılaşılan Sorunlar

4.3.1. Cilt Tahrişi

Mikroplastik parçacıklar ciltle temas ettiğinde tahrişe, kızarıklığa, kaşıntıya ve iltihaplanmaya neden olabilir. Bazı mikroplastiklerin aşındırıcı yapısı ve gözenekleri tıkama veya cildin doğal bariyer fonksiyonunu bozma potansiyeli bu olumsuz reaksiyonlara katkıda bulunabilir (Rahman ve ark., 2021). Ayrıca, mikroplastikler cilt tahrişini daha da kötüleştiren katkı maddeleri veya kirleticiler içerebilir (Campanale ve ark., 2020; Kim ve ark., 2021).

PE mikroplastik parçacıkları içeren yüz yıkama jelleri, el temizleyicileri, diş macunları ve diş bakım ürünlerinin kullanımından kaynaklanan sağlık riskleri, Alman Federal Risk Değerlendirme Enstitüsü (BfR, 2015) tarafından değerlendirilmiştir. Yüz maskesi peelinglerinde ve duş ürünlerinde kullanılan mikroplastik parçacıkların 1 μm 'den büyük olduğu ve

bu ürünlerin uzun süreli kullanımının PE ve PP parçacıklarının dokulara emilmesine ve sonuç olarak cilt hasarına neden olduğunu bildirmişlerdir (Lassen ve ark., 2015).

4.3.2. Alerjik Reaksiyon

Ciltle temas eden mikroplastik parçacıklar ayrıca alerjenlere neden olabilir ve bağışıklık tepkilerini tetikleyebilir. Vücudun bağışıklık sistemi bu yabancı parçacıkları zararlı olarak algılayabilir ve histaminler ile diğer iltihaplı maddeleri salgılayarak alerjik semptomlara yol açabilir (Hwang ve ark., 2019; Tiwari ve ark., 2023).

Bu belirtiler arasında kaşıntı, kızarıklık, şişme, kurdeşen ve nadir durumlarda anafilaksi gibi daha ciddi reaksiyonlar da yer alabilir (Patil ve ark., 2022). Yüksek konsantrasyonlarda PP mikroplastiklere maruz kalmanın bağışıklık tepkilerini tetikleyebileceği ve hücrelerde aşırı duyarlılığı artırabileceği gösterilmiştir (Hwang ve ark., 2019).

Plastik üretimi ve atık yönetimi gibi sektörlerde çalışan işçiler, doğrudan cilt teması yoluyla mikroplastiklerle temas edebilirler. Bu maruz kalma cilt tahrişine ve diğer sağlık sorunlarına yol açabilir. Mikroplastik kirliliğinin yaygın olduğu bölgelerde boş zaman aktivitelerine katılan kişiler, ciltleriyle doğrudan temas yoluyla da mikroplastiklere maruz kalabilirler. Bu aktiviteler arasında yüzme, balıkçılık ve tekne gezintisi gibi etkinlikler yer almaktadır (Emenike ve ark., 2023).

Bu mikro tanecikler, ciltte bulunduklarında, bakterilerin cilde girmesine olanak sağlayan küçük açıklıklar oluşturarak cilt yaşlanmasına ve koyu lekelerin oluşmasına yol açabilirler. (Emenike ve ark., 2023).

Mikroplastiklerin deri yoluyla maruz kalması sırasında, bromlu alev geciktiriciler (BFR), bisfenoller (BP), triklosan (TCS) ve ftalatlar dahil olmak üzere bazı tipik plastik katkı maddeleri emilebilir. Çocuklar emeklerken veya oynarken yerdeki mikroplastiklerle temas edebilirler. (Wu ve ark., 2022).

4.4. Üreme Sisteminde Karşılaşılan Sorunlar

Üreme organlarında mikroplastiklerin birikmesi üreme toksisitesine yol açabilir ve üreme kapasitesini etkileyebilir. Mikroplastikler testis iltihabına neden olabilir, testis kan bariyerini tahrip edebilir ve testis sperm anormalliklerine neden olacak şekilde iltihaplanmaya yol açabilir (Jin ve ark., 2021). Bu olaylar sperm sayısında ve hareketliliğinde önemli bir azalmaya ve sperm malformasyon oranında önemli bir artışa yol açar (Hou ve ark., 2021a; Hou ve ark., 2021b).

5. SONUÇ

Plastikler, günlük yaşamımızdaki nesnelerin büyük çoğunluğunu oluşturan değerli, kullanışlı ve faydalı bir malzemedir; ancak günümüz dünyasında, plastiklerin yanlış yönetimi, uygunsuz ve kötüye kullanımı sonucu her yerde bulunabilen plastik atıklar parçalanarak mikropplastiklerin oluşumunda esas teşkil eden kaynaklar olmaktadır. İnsanlarda da gıda zincirinin her aşamasına hakim olmuş durumdadırlar. Başta mikropplastik bulaşmış gıdaların tüketilmesi dışında soluma ve cilt teması ile küçük plastik parçacıkların insan vücuduna alındığını gösteren çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, gerçek konsantrasyonları ise henüz tam olarak bilinmemektedir. Araştırmacılar, 20 μm 'den küçük boyutlu mikropartiküllerin organlara nüfuz edebildiğini, 10 μm 'den küçük mikropartiküllerin ise hücre zarlarına nüfuz edebildiğini ve plasenta bariyerini geçebildiğini bildirmişlerdir. İnsanların mikropplastiklere maruz kalınması sonucu, kanser oluşumu da dahil olmak üzere çeşitli sağlık sorunlarının oluşması küresel boyutta ciddiye alınması gereken bir hal almıştır. Bu nedenle ülkeler tarafından etkin bir atık yönetim planının ele alınması, insanlarda farkındalığın artırılması, çevreye atılan çöp miktarını önemli ölçüde sınırlayacak iyileştirmelerin geliştirmesi ve uygulanması önemlidir.

KAYNAKÇA

- Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F. J., Dominguez, A. O., & Jaafarzadeh, N. (2019). Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environmental Pollution*, 244, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.039>
- Afrin, S., Rahman, M. M., Hossain, M. N., Uddin, M. K., & Malafaia, G. (2022). RETRACTED: Are there plastic particles in my sugar? A pioneering study on the characterization of microplastics in commercial sugars and risk assessment. *Science of The Total Environment*, 837, 155849. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155849>
- Ali, N., Katsouli, J., Marczylo, E. L., Gant, T. W., Wright, S., & De La Serna, J. B. (2024). The potential impacts of micro-and-nano plastics on various organ systems in humans. *EBioMedicine*, 99, 104901. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2023.104901>
- Alpaydin, A. Ö., Uçan, E. S., Köktürk, M., Atamanalp, M., Kalyoncu, Ç., Yiğit, S., ... & Alak, G. (2024). Microplastics, as a risk factor in the development of interstitial lung disease-a preliminary study. *Environmental Pollution*, 363, 125054. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125054>
- Amato-Lourenço, L. F., dos Santos Galvão, L., de Weger, L. A., Hiemstra, P. S., Vijver, M. G., & Mauad, T. (2020). An emerging class of air pollutants: potential effects of microplastics to respiratory human health?. *Science of the Total Environment*, 749, 141676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141676>
- Atıcı, A. A. (2024). *Detection of microplastics in Turkish Salmon purchased from supermarket. I.* International Ankara Scientific Research Congress, Ankara, Turkey. pp. 138-148.
- Atıcı, A. A. (2025b). Some Aquatic Organisms Used For Microplastic Studies in Türkiye's Inland Waters. *Present Insight in Natural Sciences* (pp.207-229), Ankara: İksad Yayınevi.
- Atıcı, A. A. (2022). The first evidence of microplastic uptake in natural freshwater mussel, *Unio stevenianus* from Karasu River, Turkey. *Biomarkers*, 27(2), 118-126. <https://doi.org/10.1080/1354750X.2021.2020335>
- Atıcı, A. A. (2025a). Microplastic Pollution in Surface Waters and Sediments of Urban Lake. In: Kurniawan, T. A. & Anouzla, A. (Eds.). *Handbook of Microplastic Pollution in the Environment: Microplastic Pollution in Aquatic Environments*. (pp. 192-233). Florida: Crc Press-Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781003487555>
- Atıcı, A. A., Sepil, A., & Sen, F. (2020). Evaluation of plastic pollution on the east coast of Zeve Campus (Van) using the clean coast index. *Review of Hydrobiology*, 13(1), 1-10.
- Atıcı, A. A., Sepil, A., & Sen, F. (2021). High levels of microplastic ingestion by commercial, planktivorous *Alburnus tarichi* in Lake Van, Turkey. *Food*

- Additives & Contaminants: Part A*, 38(10), 1767-1777. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.1941304>
- Atıcı, A. A., Sepil, A., Sen, F., & Karagoz, M. H. (2022). First evaluation of microplastic pollution in the surface waters of the Van Bay from Van Lake, Turkey. *Chemistry and Ecology*, 38(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/02757540.2021.2022126>
- Aydın, İ., Terzi, Y., Gündoğdu, S., Aytan, Ü., Öztürk, R. Ç., Atamanalp, M., Alak, G., Sivri, N., Akarsu, C., Atıcı, A. A., Güven, O., Bat, L., Kılıç, E., Öztekin, A., Uçar, A., Sönmez, V. Z., Pash, S., & Kıdeyş, A. E. (2023). Microplastic pollution in Turkish aquatic ecosystems: sources, characteristics, implications, and mitigation strategies. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 23(12). <https://doi.org/10.4194/trjfas24773>
- Ayşin, B. (2024). *Van İli İçme Sularında Mikroplastik Kalıntısının Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Van, s. 71.
- Aytan, U., Esensoy, F. B., & Senturk, Y. (2022). Microplastic ingestion and egestion by copepods in the Black Sea. *Science of The Total Environment*, 806, 150921. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150921>
- Baeza-Martínez, C., Olmos, S., González-Pleiter, M., López-Castellanos, J., García-Pachón, E., Masiá-Canuto, M., Hernández-Blasco, L., & Bayo, J. (2022a). First evidence of microplastics isolated in European citizens' lower airway. *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129439. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129439>
- Baeza-Martínez, C., Zamora-Molina, L., Garcia-Pachon, E., Masiá, M., Hernandez-Blasco, L., & Bayo, J. (2022b). Environmental microplastics in the lower airway of shoe manufacturing workers. *Open Respiratory Archives*, 4(4), 100209. <https://doi.org/10.1016/j.opresp.2022.100209>
- Bakir, A., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2014). Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. *Environmental Pollution*, 185, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.007>
- Barboza, L. G. A., Vethaak, A. D., Lavorante, B. R., Lundebye, A. K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>
- BfR (2015) Microplastic Particles in Food. BfR Opinion No. 013/2015 of 30 April 2015. English summary of the report Mikroplastikpartikel in Lebensmitteln, Stellungnahme Nr. 013/2015 des BfR vom 30. April 2015. German Federal Institute for Risk Assessment.
- Bingel, F., Avsar, D. & Unsal, M. (1987). A note on plastic materials in trawl catches in the north-eastern Mediterranean. *Meeresforschung*, 31(3-4), 227-233.
- Braun, T., Ehrlich, L., Henrich, W., Koeppel, S., Lomako, I., Schwabl, P., & Liebmann, B. (2021). Detection of microplastic in human placenta and

- meconium in a clinical setting. *Pharmaceutics*, 13(7), 921. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13070921>
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175-9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Catarino, A. I., Macchia, V., Sanderson, W. G., Thompson, R. C., & Henry, T. B. (2018). Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environmental Pollution*, 237, 675-684. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.069>
- Chen, Y. C., Chen, K. F., Lin, K. Y. A., Su, H. P., Wu, D. N., & Lin, C. H. (2023). Evaluation of toxicity of polystyrene microplastics under realistic exposure levels in human vascular endothelial EA. hy926 cells. *Chemosphere*, 313, 137582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137582>
- Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Goodhead, R., Moger, J., & Galloway, T. S. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6646-6655. <https://doi.org/10.1021/es400663f>
- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F., & Dudas, S. E. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068-7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- Crutzen, P. J., & Stoermer, E. F. (2022). The ‘anthropocene’(2000). In *Paul J. Crutzen and the anthropocene: A new epoch in Earth’s History* (pp. 19-21). Cham: Springer International Publishing.
- Çini Barutçu, E., & Polat, N. (2021). Detection of Microplastics in the Digestive System of Prussisan Carp (*Carassius gibelio*) Inhabiting Mert River (Samsun, Turkey). 6. *International Congress on Environmental Research and Technology (ICERAT’21)*, Adana, Tukey. pp. 36-37.
- Deng, Y., Yan, Z., Shen, R., Wang, M., Huang, Y., Ren, H., Zhang, Y., & Lemos, B. (2020). Microplastics release phthalate esters and cause aggravated adverse effects in the mouse gut. *Environment International*, 143, 105916. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105916>
- Diaz-Basantes, M. F., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2020). Microplastics in honey, beer, milk and refreshments in Ecuador as emerging contaminants. *Sustainability*, 12(14), 5514. <https://doi.org/10.3390/su12145514>
- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453-458. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

- Ebere, E. C., Wirnkor, V. A., & Ngozi, V. E. (2019). Uptake of microplastics by plant: a reason to worry or to be happy. *World Science News*, 131, 256-267.
- EFSA. (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *Efsa Journal*, 14(6), e04501.
- Emenike, E. C., Okorie, C. J., Ojeyemi, T., Egbemhenghe, A., Iwuzor, K. O., Saliu, O. D., ... & Adeniyi, A. G. (2023). From oceans to dinner plates: The impact of microplastics on human health. *Heliyon*, 9(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20440>
- Enyoh, C. E., Shafea, L., Verla, A. W., Verla, E. N., Qingyue, W., Chowdhury, T., & Paredes, M. (2020). Microplastics exposure routes and toxicity studies to ecosystems: an overview. *Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 35(1), e2020004. <https://doi.org/10.5620/eaht.e2020004>
- Fackelmann, G., & Sommer, S. (2019). Microplastics and the gut microbiome: how chronically exposed species may suffer from gut dysbiosis. *Marine Pollution Bulletin*, 143, 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.030>
- FAO. The state of the worlds fisheries and aquaculture; 2016;4-10.
- Flack, S. & Shaw, V. (2003). INFANTS | breast- and bottle-feeding. In: Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. pp. 3288-3293. Elsevier.
- Fournier, S. B., D'Errico, J. N., Adler, D. S., Kollontzi, S., Goedken, M. J., Fabris, L., Yurkow, E. J., & Stapleton, P. A. (2020). Nanopolystyrene translocation and fetal deposition after acute lung exposure during late-stage pregnancy. *Particle and Fibre Toxicology*, 17(1), 55. <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00385-9>
- Galafassi, S., Sabatino, R., Sathicq, M. B., Eckert, E. M., Fontaneto, D., Dalla Fontana, G., ... & Di Cesare, A. (2021). Contribution of microplastic particles to the spread of resistances and pathogenic bacteria in treated wastewaters. *Water Research*, 201, 117368. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117368>
- Gasperi, J., Wright, S. L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., ... & Tassin, B. (2018). Microplastics in air: are we breathing it in?. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>
- Gedik, K., & Eryaşar, A. R. (2020). Microplastic pollution profile of Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis*) collected along the Turkish coasts. *Chemosphere*, 260, 127570. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127570>
- Gedik, K., Eryaşar, A. R., Emanet, M., Şahin, C., & Ceylan, Y. (2023). Monthly microplastics change in European anchovy's (*Engraulis encrasicolus*) gastrointestinal tract in the Black Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 194, 115303. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115303>
- GESAMP. (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. In: Kershaw PJ (ed) (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of

- Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep Stud GESAMP No. 90, pp 96.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gündoğdu, S. (2018). Contamination of table salts from Turkey with microplastics. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 35(5), 1006-1014. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1447694>
- Gündoğdu, S., Cevik, C., & Ataş, N. T. (2020). Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tracts of some edible fish species along the Turkish coast. *Turkish Journal of Zoology*, 44(4), 312-323. <https://doi.org/10.3906/zoo-2003-49>
- Güven, O., Gökdağ, K., Jovanović, B., & Kıdeyş, A. E. (2017). Microplastic litter composition of the Turkish territorial waters of the Mediterranean Sea, and its occurrence in the gastrointestinal tract of fish. *Environmental Pollution*, 223, 286-294. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.025>
- Halden, R. U. (2010). Plastics and health risks. *Annual Review of Public Health*, 31(1), 179-194. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.012809.103714>
- Han, Y., Song, Y., Kim, G. W., Ha, C., Lee, J., Kim, M., ... & Heo, Y. (2021). No prominent toxicity of polyethylene microplastics observed in neonatal mice following intratracheal instillation to dams during gestational and neonatal period. *Toxicological Research*, 37(4), 443-450. <https://doi.org/10.1007/s43188-020-00086-7>
- Harvey, F., & Watts, J. (2018). Microplastics found in human stools for the first time. *The Guardian*, 22.
- Horvatits, T., Tamminga, M., Liu, B., Sebode, M., Carambia, A., Fischer, L., ... & Fischer, E. K. (2022). Microplastics detected in cirrhotic liver tissue. *EBioMedicine*, 82, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.104147>
- Hou, B., Wang, F., Liu, T., & Wang, Z. (2021). Reproductive toxicity of polystyrene microplastics: In vivo experimental study on testicular toxicity in mice. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124028. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124028>
- Hou, J., Lei, Z., Cui, L., Hou, Y., Yang, L., An, R., ... & Zhang, L. (2021). Polystyrene microplastics lead to pyroptosis and apoptosis of ovarian granulosa cells via NLRP3/Caspase-1 signaling pathway in rats. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 112012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112012>
- Hwang, J., Choi, D., Han, S., Choi, J., & Hong, J. (2019). An assessment of the toxicity of polypropylene microplastics in human derived cells. *Science of the Total Environment*, 684, 657-669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.071>
- Iñiguez, M. E., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2017). Microplastics in Spanish table salt. *Scientific Reports*, 7(1), 8620. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09128-x>

- Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., Cowen, M., Tentzeris, V., & Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of the Total Environment*, 831, 154907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907>
- Jin, H., Ma, T., Sha, X., Liu, Z., Zhou, Y., Meng, X., ... & Ding, J. (2021). Polystyrene microplastics induced male reproductive toxicity in mice. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123430. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123430>
- Jinhui, S., Sudong, X., Yan, N., Xia, P., Jiahao, Q., & Yongjian, X. (2019). Effects of microplastics and attached heavy metals on growth, immunity, and heavy metal accumulation in the yellow seahorse, *Hippocampus kuda* Bleeker. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110510. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110510>
- Kannan, K., & Vimalkumar, K. (2021). A review of human exposure to microplastics and insights into microplastics as obesogens. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 724989. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.724989>
- Kılıç, E., Yücel, N., & Şahutoğlu, S. M. (2022). First record of microplastic occurrence at the commercial fish from Orontes River. *Environmental Pollution*, 307, 119576. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119576>
- Kim, J., Maruthupandy, M., An, K. S., Lee, K. H., Jeon, S., Kim, J. S., & Cho, W. S. (2021). Acute and subacute repeated oral toxicity study of fragmented microplastics in Sprague-Dawley rats. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 228, 112964. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112964>
- Kirstein, I. V., Kirmizi, S., Wichels, A., Garin-Fernandez, A., Erler, R., Löder, M., & Gerds, G. (2016). Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on microplastic particles. *Marine Environmental Research*, 120, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.07.004>
- Kontrick, A. V. (2018). Microplastics and human health: Our great future to think about now. *Journal of Medical Toxicology*, 14(2), 117-119. <https://doi.org/10.1007/s13181-018-0661-9>
- Kor, K., & Mehdiinia, A. (2020). Neustonic microplastic pollution in the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110665. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110665>
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks - Are they immune from microplastics contamination?. *Science of the Total Environment*, 714, 136823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136823>
- Lai, K. P., Tsang, C. F., Li, L., Yu, R. M. K., & Kong, R. Y. C. (2022). Microplastics act as a carrier for wastewater-borne pathogenic bacteria in sewage. *Chemosphere*, 301, 134692. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136823>
- Lassen, C., Hansen, S. F., Magnusson, K., Hartmann, N. B., Jensen, P. R., Nielsen, T. G., & Brinch, A. (2015). Microplastics: occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark. Environmental Protection Agency. <http://www.eng.mst.dk/>

- Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A., & Rothen-Rutishauser, B. (2019). Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environmental Science & Technology*, 53(4), 1748-1765. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05512>
- Leslie, H. A., Van Velzen, M. J., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Li, H., Luo, Q., Zhao, S., Zhao, P., Yang, X., Huang, Q., & Su, J. (2022). Watershed urbanization enhances the enrichment of pathogenic bacteria and antibiotic resistance genes on microplastics in the water environment. *Environmental Pollution*, 313, 120185. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120185>
- Li, Q., Yuan, M., Chen, Y., Jin, X., Shangguan, J., Cui, J., ... & Wang, Y. (2023). The neglected potential source of microplastics from daily necessities: A study on protective mobile phone cases. *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129911. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129911>
- Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G., & Song, M. (2023). Potential health impact of microplastics: a review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects. *Environment & Health*, 1(4), 249-257. <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>
- Lin, Y. D., Huang, P. H., Chen, Y. W., Hsieh, C. W., Tain, Y. L., Lee, B. H., ... & Shih, M. K. (2023). Sources, degradation, ingestion and effects of microplastics on humans: a review. *Toxics*, 11(9), 747. <https://doi.org/10.3390/toxics11090747>
- Lithner, D., Larsson, Å., & Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of the Total Environment*, 409(18), 3309-3324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>
- Liu, K., Wang, X., Fang, T., Xu, P., Zhu, L., & Li, D. (2019a). Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of the Total Environment*, 675, 462-471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>
- Liu, K., Wu, T., Wang, X., Song, Z., Zong, C., Wei, N., & Li, D. (2019b). Consistent transport of terrestrial microplastics to the ocean through atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 53(18), 10612-10619. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03427>
- Liu, S., Guo, J., Liu, X., Yang, R., Wang, H., Sun, Y., ... & Dong, R. (2023). Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: A pilot prospective study. *Science of the Total Environment*, 854, 158699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158699>
- Makhdoumi, P., Amin, A. A., Karimi, H., Pirsaeheb, M., Kim, H., & Hossini, H. (2021). Occurrence of microplastic particles in the most popular Iranian bottled mineral water brands and an assessment of human exposure. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101708. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101708>

- Makhdoumi, P., Pirsahab, M., Amin, A. A., Kianpour, S., & Hossini, H. (2023). Microplastic pollution in table salt and sugar: Occurrence, qualification and quantification and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 119, 105261. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105261>
- Mason, S. A., Welch, V. G., & Neratko, J. (2018). Synthetic polymer contamination in bottled water. *Frontiers in Chemistry*, 6, 389699. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00407>
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., & Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science & Technology*, 35(2), 318-324. <https://doi.org/10.1021/es0010498>
- Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G., Primpke, S., & Gerdt, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108, 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015>
- Nihart, A. J., Garcia, M. A., El Hayek, E., Liu, R., Olewine, M., Kingston, J. D., ... & Campen, M. J. (2025). Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nature Medicine*, 31(4), 1114-1119. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>
- Oleksiuk, K., Krupa-Kotara, K., Grajek, M., Wypych-Ślusarska, A., Głogowska-Ligus, J., & Słowiński, J. (2023). Health risks of environmental exposure to microplastics. *Journal of Education, Health and Sport*, 13(1), 79-84. <https://doi.org/10.12775/JEHS.2023.13.01.012>
- Oßmann, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H., & Dicke, W. (2018). Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*, 141, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>
- Özsoy, S., Gündoğdu, S., Sezigen, S., Tasalp, E., Ikiz, D. A., & Kideys, A. E. (2024). Presence of microplastics in human stomachs. *Forensic Science International*, 364, 112246. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.112246>
- Paget, V., Dekali, S., Kortulewski, T., Grall, R., Gamez, C., Blazy, K., ... & Lacroix, G. (2015). Specific uptake and genotoxicity induced by polystyrene nanobeads with distinct surface chemistry on human lung epithelial cells and macrophages. *PloS one*, 10(4), e0123297. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123297>
- Patil, P. B., Maity, S., & Sarkar, A. (2022). Potential human health risk assessment of microplastic exposure: current scenario and future perspectives. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(12), 898. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10539-1>
- Pauly, J. L., Stegmeier, S. J., Allaart, H. A., Cheney, R. T., Zhang, P. J., Mayer, A. G., & Streck, R. J. (1998). Inhaled cellulosic and plastic fibers found in human lung tissue. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention: A Publication of the American Association for Cancer Research, Cosponsored by the American Society of Preventive Oncology*, 7(5), 419-428.

- Persiani, E., Cecchetti, A., Ceccherini, E., Gisone, I., Morales, M. A., & Vozzi, F. (2023). Microplastics: a matter of the heart (and vascular system). *Biomedicine*, 11(2), 264. <https://doi.org/10.3390/biomedicine11020264>
- Pironti, C., Notarstefano, V., Ricciardi, M., Motta, O., Giorgini, E., & Montano, L. (2022). First evidence of microplastics in human urine, a preliminary study of intake in the human body. *Toxics*, 11(1), 40. <https://doi.org/10.3390/toxics11010040>
- Plastic Europe. (2024). Available online: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- Powell, J. J., Faria, N., Thomas-McKay, E., & Pele, L. C. (2010). Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract. *Journal of Autoimmunity*, 34(3), J226-J233. <https://doi.org/10.1016/j.jaut.2009.11.006>
- Prata, J. C. (2018). Airborne microplastics: consequences to human health?. *Environmental Pollution*, 234, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.043>
- Prata, J. C., Da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Praveena, S. M., Ariffin, N. I. S., & Nafisyah, A. L. (2022). Microplastics in Malaysian bottled water brands: Occurrence and potential human exposure. *Environmental Pollution*, 315, 120494. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120494>
- Qiao, R., Deng, Y., Zhang, S., Wolosker, M. B., Zhu, Q., Ren, H., & Zhang, Y. (2019). Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish. *Chemosphere*, 236, 124334. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.065>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., ... & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O. P., Achari, G., & Slobodnik, J. (2021). Potential human health risks due to environmental exposure to nano-and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. *Science of the Total Environment*, 757, 143872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143872>
- Revel, M., Châtel, A., & Mouneyrac, C. (2018). Micro (nano) plastics: a threat to human health?. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.003>
- Rezaei, M., Riksen, M. J., Sirjani, E., Sameni, A., & Geissen, V. (2019). Wind erosion as a driver for transport of light density microplastics. *Science of the Total Environment*, 669, 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.382>

- Rochman, C. M., Tahir, A., Williams, S. L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J. T., ... & Teh, S. J. (2015). Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific Reports*, 5(1), 14340. <https://doi.org/10.1038/srep14340>
- Santos, M. dos., Soares, M. C. F., Baisch, P. R. M., Baisch, A. L. M., & da Silva Júnior, F. M. R. (2018). Biomonitoring of trace elements in urine samples of children from a coal-mining region. *Chemosphere*, 197, 622-626. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.082>
- Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M., Reiberger, T., & Liebmann, B. (2019). Detection of various microplastics in human stool: a prospective case series. *Annals of Internal Medicine*, 171(7), 453-457. <https://doi.org/10.7326/M19-0618>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H. U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375-386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>
- Sripada, K., Wierzbicka, A., Abass, K., Grimalt, J. O., Erbe, A., Röllin, H. B., ... & Wagner, M. (2022). A children's health perspective on nano-and microplastics. *Environmental Health Perspectives*, 130(1), 015001. <https://doi.org/10.1289/EHP9086>
- Sun, A., & Wang, W. X. (2023). Human exposure to microplastics and its associated health risks. *Environment & Health*, 1(3), 139-149. <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00053>
- Surana, D., Gupta, J., Sharma, S., Kumar, S., & Ghosh, P. (2022). A review on advances in removal of endocrine disrupting compounds from aquatic matrices: Future perspectives on utilization of agri-waste based adsorbents. *Science of the Total Environment*, 826, 154129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154129>
- Tiwari, B. R., Lecka, J., Pulicharla, R., & Brar, S. K. (2023). Microplastic pollution and associated health hazards: Impact of COVID-19 pandemic. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 34, 100480. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100480>
- Warheit, D. B., Hart, G. A., Hesterberg, T. W., Collins, J. J., Dyer, W. M., Swaen, G. M. H., ... & Kennedy, G. L. (2001). Potential pulmonary effects of man-made organic fiber (MMOF) dusts. *Critical Reviews in Toxicology*, 31(6), 697-736. <https://doi.org/10.1080/20014091111965>
- Wee, S. Y., Aris, A. Z., Yusoff, F. M., Praveena, S. M., & Harun, R. (2022). Drinking water consumption and association between actual and perceived risks of endocrine disrupting compounds. *NPJ Clean Water*, 5(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00176-z>
- WHO, Microplastics in Drinking-Water, 2019.

- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: a micro issue?. *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634-6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
- Wu, P., Lin, S., Cao, G., Wu, J., Jin, H., Wang, C., ... & Cai, Z. (2022). Absorption, distribution, metabolism, excretion and toxicity of microplastics in the human body and health implications. *Journal of Hazardous Materials*, 437, 129361. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129361>
- Yang, Z., Wang, M., Feng, Z., Wang, Z., Lv, M., Chang, J., ... & Wang, C. (2023). Human microplastics exposure and potential health risks to target organs by different routes: A review. *Current Pollution Reports*, 9(3), 468-485. <https://doi.org/10.1007/s40726-023-00273-8>
- Yozukmaz, A. (2021). Investigation of microplastics in edible wild mussels from İzmir Bay (Aegean Sea, Western Turkey): A risk assessment for the consumers. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112733. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112733>
- Yücel, N., & Kılıç, E. (2025). Occurrence and human exposure risk of microplastics in commercially important shrimp species from Northeastern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117796. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117796>
- Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137-7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L., & Kannan, K. (2021b). Occurrence of polyethylene terephthalate and polycarbonate microplastics in infant and adult feces. *Environmental Science & Technology Letters*, 8(11), 989-994. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, N., Li, Y. B., He, H. R., Zhang, J. F., & Ma, G. S. (2021a). You are what you eat: Microplastics in the feces of young men living in Beijing. *Science of the Total Environment*, 767, 144345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144345>
- Zhao, Q., Zhu, L., Weng, J., Jin, Z., Cao, Y., Jiang, H., & Zhang, Z. (2023a). Detection and characterization of microplastics in the human testis and semen. *Science of the Total Environment*, 877, 162713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162713>
- Zhao, Y., Liu, S., & Xu, H. (2023b). Effects of microplastic and engineered nanomaterials on inflammatory bowel disease: a review. *Chemosphere*, 326, 138486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138486>
- Zhu, L., Zhu, J., Zuo, R., Xu, Q., Qian, Y., & An, L. (2023). Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy. *Science of the Total Environment*, 856, 159060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159060>

Bölüm 12

OTOLİT MİKROYAPISI

Celal ATEŞ¹, İsmail REİS²

1 Prof. Dr. Celal ATEŞ; Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Avlama ve İşleme Teknolojisi Bölümü; Kötekli 48000/ Menteşe/Muğla ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7336-0387>

2 Araş. Gör. Dr. İsmail REİS; Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Avlama ve İşleme Teknolojisi Bölümü; Kötekli 48000/ Menteşe/Muğla ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4599-6780>

1. Giriş

Balık otolitleri, bireyin yaşamı boyunca büyüyerek çevresel ve fizyolojik süreçleri kaydeden kalsiyum karbonat yapılar olarak balık biyolojisi çalışmalarında önemli bir yere sahiptir (Pannella, 1971; Campana & Neilson, 1985). Özellikle otolit mikroyapısı, günlük veya dönemsel olarak oluşan büyüme artımlarının incelenmesine olanak tanıyarak balıkların yaş tayini, büyüme hızı, erken yaşam evreleri ve yaşam öyküsü stratejilerinin ayrıntılı biçimde ortaya konmasını sağlar (Brothers vd., 1976; Jones, 1986; Campana, 1990).

Otolit mikroyapısı çalışmaları başlangıçta larval balıklarda günlük yaş tayini amacıyla geliştirilmiş, ilerleyen yıllarda juvenil ve erişkin bireylerde de güvenilir biçimde uygulanabileceği gösterilmiştir (Pannella, 1974; Lough vd., 1982; Laroche vd., 1982). Günümüzde bu yaklaşım; stok ayrımı, mortalite tahminleri, çevresel değişkenlerin büyüme üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi ve balıkçılık yönetimine bilimsel veri sağlanması açısından vazgeçilmez bir yöntem haline gelmiştir (Essig & Cole, 1986; Houde, 1987; Campana, 1990).

2. Otolitlerin Biyolojik ve Kimyasal Yapısı

Teleost balıklarda üç çift otolit bulunur: *sagittae*, *lapilli* ve *asterisci* (Campana & Neilson, 1985; Pannella, 1980). Bu otolitler denge ve işitme fonksiyonlarında rol oynamakla birlikte, yaş ve büyüme çalışmalarında en yaygın olarak sagittal otolitler kullanılmaktadır (Bagenal & Tesch, 1978; Campana & Neilson, 1985). Bunun temel nedeni, sagittal otolitlerin diğer otolit tiplerine kıyasla daha büyük olmaları, daha düzenli artımlar sergilemeleri ve mikroyapı okumalarına daha yüksek düzeyde olanak tanımalarıdır (Pannella, 1971; Jones, 1986). Otolitler esas olarak aragonit formunda kalsiyum karbonattan oluşur ve mineral faz ile organik matrisin ardışık olarak çökmesi sonucunda mikroyapı artımları meydana gelir (Pannella, 1980; Campana, 1990). Bu mikroyapısal oluşum süreci, balığın metabolik aktiviteleri ve çevresel koşullara karşı yüksek derecede duyarlıdır (Campana, 1983; Neilson & Geen, 1982). Sıcaklık, besin bolluğu, metabolik hız ve stres gibi faktörler otolit büyümesini doğrudan etkileyerek artım genişliği ve düzenliliğinde değişimlere yol açar (Geffen, 1982; Campana, 1984). Bu özellikleri nedeniyle otolit mikroyapısı, yalnızca bireyin yaşının belirlenmesinde değil, aynı zamanda yaşam süresi boyunca maruz kaldığı çevresel koşulların dolaylı bir biyolojik kaydı olarak da değerlendirilmektedir (Kalish, 1989; Thresher vd., 1989).

3. İnceleme ve Analiz

Otolit mikroyapı araştırmaları alanı, 1970'lerin başından bu yana olağanüstü bir büyüme yaşamış ve şu anda erken yaşam öyküsü, yaş, büyüme, balıkların toplanması, göç, ölüm oranı ve stok yapısı üzerine yüzlerce çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Alan büyümeye ve gelişmeye devam ederken, otolit mikroyapı incelemesinin artık balıkçılık biyolojisinde önemli ve kabul görmüş bir teknoloji olduğu tartışmasızdır. Otolit mikroyapı çalışmalarıyla ilişkili birçok teknik ve prosedürü derleyip özetlemek için ilk çabayı temsil etmektedir. Örnek toplamadan veri analizine kadar tüm olaylar dizisi, çoğu tür ve duruma uygulanabilecek şekilde kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Varyasyon bölümleri hem yayınlanmış hem de yayınlanmamış prosedürleri içermekte olup, hem yeni başlayanlar hem de deneyimli araştırmacılar için değerli kılmaktadır.

Bu çalışmalar, otolit mikroyapısı ile ilişkili teknik ve prosedürleri örnek toplamadan veri analizine kadar sistematik biçimde özetlemek için yapılan ilk çalışmayı temsil etmektedir. Bugüne kadarki incelemeler, otolitteki periyodik özelliklerin oluşumunun teorik temeline odaklanmıştır. Daha önceki birkaç çalışma belirli türler veya prosedürler için teknik protokoller sunmuş olsa da, hiçbiri örnek toplamadan veri analizine kadar olayların tam sırasını, çoğu türe ve duruma uygulanabilecek kadar kapsamlı bir biçimde tanımlamaya çalışmamıştır. Otolit mikroyapısı teknikleri ve prosedürlerinin ayrıntılı açıklamalarını sunmak ve otolit mikroyapısı araştırmasının tüm aşamaları için tercih edilen yaklaşımları önermektir. Otolit mikroyapı çalışmalarının o dönemde bile hızla yaygınlaştığı göz önüne alındığında, yeni araştırmacılara uygun teknikleri seçmelerinde ve doğru şekilde uygulamalarında yardımcı olacak bazı tavsiyelerde bulunmanın zamanının geldiğini görüldü. Otolit artım tekniğinin kullanımını gerektiren yeni araştırmalar tasarlayan yeni araştırmacıların, tüm bölümleri sunuldukları sırayla okumaları tavsiye edilir. Ayrıca, otolit mikroyapı çalışmalarının planlanması ve yürütülmesinde dikkate alınması gereken bazı önemli konuları da özetlemektedir.

4. Otolit Artırım Tekniğinin Geliştirilmesi ve Uygulanması

Otolit artırım tekniği, balıkların yaşam öyküsünü günlük çözünürlükle ortaya koyabilen, biyolojik olarak temellendirilmiş ve deneysel olarak doğrulanmış güçlü bir yöntemdir. Doğru uygulandığında, balıkçılık bilimi ve yönetimi açısından vazgeçilmez bilgiler sunmaktadır.

4.1. Otolit Artış Tekniğinin Tarihçesi

Büyüme halkaları, balıkların yaşının belirlenmesinde uzun süredir kullanılan temel biyolojik göstergelerden biridir. Omurgalılarda yıllık

halkaların yaş tayininde kullanımına ilişkin en eski örnekler, yılan balıklarının yaşının belirlenmesine yönelik çalışmalarla birlikte 1759 yılına kadar uzanmaktadır (Hederstrom, 1959). Balıklarda pulların yaş tayini amacıyla kullanımı ise ilk kez 1888 yılında rapor edilmiştir (Carlander, 1987). Otolitlerin yaş belirlemede kullanımı, Reibisch'in 1899 yılında *Pleuronectes platessa*'da halka şeklindeki yapıları gözlemlemesiyle başlamış olup, bu bulgu daha sonra Ricker (1975) tarafından derlenmiştir.

Bununla birlikte, halka sayımına dayalı yöntemler, henüz ilk halkalarını oluşturmamış genç bireylerde ya da büyümenin daha düzenli ve halka oluşumunun belirsiz olduğu tropikal ve derin deniz balıklarında güvenilir yaş tahmini yapılmasına olanak tanımamıştır. Günlük artım tekniğinin geliştirilmesi, günlük yaşın doğrudan tahmin edilmesine imkân sağlayarak bu sınırlamaların aşılmasını mümkün kılmıştır. Bu teknik 1970'li yılların başında geliştirilmiş ve izleyen yirmi yıl içinde balık biyolojisi çalışmalarında yaygın biçimde kabul görmüştür.

Pannella (1971), ılıman su balıklarının otolit halkaları arasında yaklaşık 360 adet düzenli artım gözlemlemiş ve bu yapıların otolit mikroyapısındaki günlük değişimleri temsil ettiğini öne sürmüştür. Daha sonra Pannella (1974), yetişkin tropikal balıklarda da günlük artımlara benzer yapılar gözlemlemiş; ayrıca bu artımların, Ay döngüsüyle çakışan yaklaşık 14 günlük daha geniş ölçekli bir ritimle ilişkili olabileceğini belirtmiştir. Bu bulgular, günlük artım tekniğinin potansiyelini ortaya koyarak bilim camiasında hızla ilgi görmesine yol açmıştır.

Tekniğin geçerliliği kısa sürede deneysel olarak da doğrulanmıştır. Struhsaker ve Uchiyama (1976), Hawaii nehu balığının larva ve juvenil bireylerini sahadan yakalayarak laboratuvar koşullarında büyütmüş, elde ettikleri büyüme eğrilerini otolit artım sayımlarıyla ilişkilendirerek günlük artım oluşumunu doğrulamış ve bu verileri farklı resif alanları arasındaki büyüme hızı farklılıklarını ortaya koymak için kullanmıştır. Aynı dönemde Brothers ve çalışma arkadaşları (1976), günlük artım tekniğinin larva ve genç balıklarda yaşam öyküsü olaylarının yaşı ve zamanlamasının belirlenmesinde etkili bir araç olduğunu göstermiştir.

Bu erken çalışmalar, tekniğin hızla yaygınlaşmasına öncülük etmiş ve özellikle 1980'li yıllarda günlük yaş tayinine dayalı yayın sayısında belirgin bir artış gözlenmiştir (Şekil 1). Günümüzde kullanılan birçok uygulama ve karşılaşılan yöntemsel güçlük, bu ilk dönemde yapılan çalışmalar sırasında tanımlanmıştır. Taubert ve Coble (1977), günlük artım tekniğini tatlı su balıklarına uygulamış ve kısa gün uzunluğu ile düşük sıcaklıkların güneş balıklarında günlük artım oluşumunu önemli ölçüde baskıladığını ortaya koymuştur.

1978 yılında yapılan çalışmalar, iki önemli haliç türü olan Atlantik gümüş balığı ve *Fundulus heteroclitus*'un da günlük artımlar oluşturduğunu göstermiştir (Barkman, 1978; Radtke, 1978). Farklı otolit tiplerini karşılaştıran Barkman (1978), sagitta ve lapillus'un yaş tayininde kullanılabilir olduğunu, buna karşın asteriscus'un güvenilir sonuçlar vermediğini belirtmiştir. Bu durum, asteriscus'un birçok türde ontogenetik olarak daha geç oluşmasıyla açıklanmaktadır. Methot ve Kramer (1979) ise, sahada yakalanan hamsi larvalarına Gompertz büyüme eğrileri uygulayarak doğal ortamdaki büyüme hızlarını tahmin etmiştir.

Bu monografide ele alınan güvenilirlik, otolit tipi seçimi, saha uygulamaları, günlük artım oluşum mekanizmaları ve çözünürlük sınırlamaları gibi sorunların büyük bir bölümü, günlük artım tekniğinin erken dönem uygulamalarında tanımlanmıştır. Pannella her ne kadar bu tekniği erişkin bireylerdeki halka oluşumlarını incelemek amacıyla kullanmaya başlamış olsa da, yöntem esas olarak daha önce güvenilir biçimde yaşlandırılmayan erken yaşam evrelerinde yaygın biçimde uygulanmıştır.

5. Yaş ve Büyüme Tekniklerine Genel Bakış

Yaş ve büyüme bilgisi, balıkçılık biliminin temel bileşenlerinden biridir. Yaşamın erken evrelerinde yaş yapısına ilişkin bilgiler, çevresel değişkenlerin büyüme ve hayatta kalma üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına olanak tanıyarak, balık tutma başarısını belirleyen süreçlerin daha net biçimde ortaya konmasını sağlar. Yetişkin bireylerde ise yaş ve büyüme verileri; balıkçılığın stoklar üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, uygulanan yönetim politikalarının etkinliğinin ölçülmesi, yaşam öyküsü olaylarının yorumlanması ve sürdürülebilir kullanım ilkeleri doğrultusunda verimin en üst düzeye çıkarılması açısından kritik öneme sahiptir.

Yaş ve büyüme, farklı yöntemler kullanılarak belirlenebilir. Bu yöntemler arasında balıkların kapalı ortamlarda büyütülmesi, doğumdan itibaren yetiştirilmesi, yaş bilgisini kaydeden sert yapıların incelenmesi ve biyokimyasal analizler yer almaktadır. Ancak bu yöntemlerin uygulanabilirliği, türün yaşam alanına ve yaşam döngüsündeki evresine bağlı olarak değişmektedir. Çoğu durumda, vahşi populasyonlardaki balıkların yaşının belirlenmesi gerekmekte ve bu amaçla yaş bilgisini kodlayan kalsifiye yapıların incelenmesi tercih edilmektedir.

Yaş bilgisini taşıyan başlıca yapılar kemikler (yüzgeç ışınları, omurlar, kleithrum ve solungaç kemikleri), pullar ve otolitlerdir. Çoğu balık türü için otolitler, yaşın belirlenmesinde en güvenilir yapılar olarak kabul edilmektedir. Otolitler, genç bireylerde günlük, daha ileri yaşlarda ise yıllık örüntüler sergileyerek yaşam öyküsü olaylarının kalıcı bir kaydını

oluşturur. Ayrıca deneysel çalışmalar, stres koşulları altında otolitlerin emilmediğini göstermiştir; bu durum, diğer sert yapılarda her zaman geçerli değildir.

Pullar, kaybolabilmeleri ve yeniden oluşabilmeleri, ayrıca ileri yaşlarda birikimlerinin durabilmesi nedeniyle yaş tayininde güvenilir bulunmamaktadır. Bu özellikler, özellikle yaşlı bireylerde hatalı yaş tahminlerine yol açabilmektedir. Ayrıca pullar çoğu türde günlük büyüme örüntülerini kaydetmez ve bir yaştan altındaki balıkların yaşlandırılmasında kullanılamaz (Szedlmayer vd., 1991). Buna karşın pulların temel avantajı, çıkarılmalarının balığın ölümüne neden olmaması ve hızlı bir şekilde elde edilebilmeleridir. Diğer kemik yapılar bazı türlerde otolitlere benzer doğruluk sağlayabilse de, güvenilirlikleri türlere göre değişmekte ve günlük yaş tayininde kullanımlarına ilişkin sınırlı kanıt bulunmaktadır.

Literatür genel olarak, otolitlere dayalı yaş tayininin diğer yöntemlere kıyasla daha güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Genç balıkların günlük yaşlarının, otolit artımları dışında bir yöntemle belirlenmesindeki güçlük, günlük artım tekniğinin neden bu denli yaygın biçimde benimsendiğini açıkça göstermektedir. Otolit mikroyapısının yaş ve büyüme çalışmalarında tercih edilmesinin birçok önemli nedeni vardır. Otolitler, yaşamın erken evrelerindeki günlük olayları ve yaşam süresince meydana gelen dönemsel büyüme halkalarını tutarlı biçimde kaydeden tek yapıdır.

Son yıllarda bilgisayar tabanlı görüntü analiz sistemlerinin geliştirilmesiyle birlikte, artım tanımlama, günlük ve yıllık halka sayımları ile artım genişliği ölçümleri daha hızlı ve daha hassas hâle gelmiştir. Bu sistemler sayesinde elde edilen veriler kısa sürede analiz edilmekte, görselleştirilmekte ve yorumlanabilmektedir. Bununla birlikte, otolit mikroyapı analizinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Otolitlerin çıkarılabilmesi için balığın öldürülmesi gerekmektedir. Ayrıca metamorfoz döneminde aksesuar primordia oluşumu, yaşlı bireylerde artımların silikleşmesi veya otolit kenarlarında sıkışması gibi durumlar, okuma işlemini zorlaştırabilmektedir. Otomasyon olanaklarına rağmen, yöntem hâlen zaman alıcıdır, özel donanım (bilgisayarlı görüntü sistemleri ve bazı durumlarda taramalı elektron mikroskobu) gerektirmekte ve deneyimli personel ihtiyacı doğurmaktadır.

Günlük artım tekniği yalnızca kemikli balıklarla sınırlı değildir. Volk (1986), bu tekniği deniz lampreylerinin statolitlerinde kullanarak halka şeklindeki yaş yapısını ortaya koymuştur. Deniz lampreyleri agnathanlar olup pullara, kemiklere veya dikenlere sahip değildir; buna rağmen otolitlere benzer statolit yapıları yaş tayini için kullanılabilir. Günlük halka birikiminin doğrulanabilmesi hâlinde, bu yaklaşımın diğer omur-

gasız gruplar için de uygulanabilir olabileceği düşünülmektedir. Nitekim Hurley vd. (1985), kısa yüzgeçli kalamarların statolitlerinde günlük artım oluşumunu doğrulamış, Jackson (1989) ise tropikal bir kafadanbacaklının yaşam öyküsü olaylarını statolit mikroyapısını kullanarak analiz etmiştir.

5.1. Yaş tayini

Sahadan yakalanan genç balıklarda yaş tahmini yapılabilmesi için iki temel bilginin bilinmesi gerekmektedir: (i) ilk artım oluşumunun yaşı ve (ii) artım sayımlarının doğruluğu. İlk artımın hangi yaşta birikmeye başladığı en güvenilir biçimde, bireylerin laboratuvar koşullarında yetiştirilmesiyle belirlenebilir. Alternatif olarak, artım oluşumunun yumurtadan çıkışta, yumurta kesesi emilimi sırasında ya da laboratuvar ortamında yetiştirilen bireylerde ilk artımın gözlemlendiği gelişim evresinde başladığı varsayılabilir. Ancak bu tür varsayımlar her zaman geçerli olmayabilir ve türden türe değişkenlik gösterebilir (Jones, 1986). Varsayımın geçerli olmadığı durumlarda, yaş tahminleri sistematik biçimde yanlı sonuçlar verecektir.

Günlük artımların gerçekten günlük olarak oluşup oluşmadığı da literatürde tartışmalı bir konu olmuştur. Bazı araştırmacılar, artımların her zaman günlük olarak birikmediğini veya artım birikim hızının bireyin büyüme hızıyla yakından ilişkili olduğunu bildirmiştir (Geffen, 1982; Lough vd., 1982; McGurk, 1984). Geffen (1982), Atlantik ringa balığı (*Clupea harengus*) larvalarında artımların yalnızca büyüme hızının yaklaşık 10,4 mm/gün olduğu koşullarda günlük olarak oluştuğunu rapor etmiştir. Benzer şekilde McGurk (1987), Pasifik ringa balığı larvalarına ait veriler üzerinde yaptığı çalışmalarda, günlükten daha düşük artım birikim oranlarının söz konusu olabileceğini göstermiştir. Günlük olmayan artım birikimi, sahada yakalanan bireylerden elde edilen büyüme verilerine eğri uydurulması yoluyla hamsi ve diğer bazı türlerde de rapor edilmiştir (Methot & Kramer, 1979; Laroche vd., 1982; Campana, 1984).

Bu çalışmalarda taramalı elektron mikroskopunun (SEM) kullanımı, günlük olmayan artım birikiminin kesin olarak doğrulanmasına her zaman olanak tanımamıştır. Bununla birlikte Campana ve arkadaşları (1987), büyüme hızının yaklaşık 0,4 mm/gün olduğu koşullarda oluşan artım genişliklerinin, ışık mikroskopunun çözünürlük sınırlarının altında kalabileceğini ve bu nedenle artımların görünmeyebileceğini belirtmiştir. Nitekim Jones ve Brothers (1987), aç bırakılmış çizgili levrek (*Morone saxatilis*) larvalarının otolitlerinde oluşan çok dar günlük artımların ışık mikroskobu ile tespit edilemediğini, ancak SEM kullanılarak açık biçimde gözlemlenebildiğini göstermiştir.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, günlük artım birikiminin -aşırı stres koşulları dışında- büyük ölçüde evrensel bir süreç olduğu, ancak artım genişliğinin çevresel ve fizyolojik koşullara bağlı olarak mikroskobik çözünürlük sınırlarının altına düşebileceği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, yaş tahminlerinde kullanılan mikroskobik tekniklerin çözünürlük kapasitesi ve bireyin büyüme koşulları, günlük artım analizlerinin doğruluğunu doğrudan etkileyen kritik unsurlar olarak değerlendirilmelidir.

6. Otolit Artış Tekniğinden Elde Edilen Bilgiler

Bu bölümde, otolit mikroyapısını kullanan araştırmacıların 1985 yılından itibaren elde ettikleri başlıca araştırma bulguları sunulmaktadır. Daha erken dönemde tamamlanan çalışmaların kapsamlı değerlendirmeleri için okuyucuların Campana ve Neilson (1985) ile Jones (1986) tarafından yapılan incelemelere başvurması önerilmektedir.

6.1. Büyüme

Her bir büyüme bandının genişliği üzerinden ölçülen günlük otolit büyümesi, günlük somatik büyümenin tahmin edilmesinde kullanılabilmektedir. Balıkçılık biyolojisinde bu amaçla iki temel ilişki tanımlanmaktadır:

- (i) otolit boyutu ile balık boyutu arasındaki allometrik ilişki ve
- (ii) bireysel ya da popülasyon düzeyinde günlük uzunluk veya ağırlık artışıyla ifade edilen büyüme oranı.

Otolit boyutu ile balık boyu arasındaki allometrik ilişki izometrik (doğrusal ve orantılı) olabileceği gibi eğrisel bir yapı da gösterebilir. Geriye dönük büyüme analizlerinin uygulanabilmesi için öncelikle bu ilişkinin güvenilir biçimde ortaya konması gerekmektedir. Teorik olarak, söz konusu allometrik ilişki bilindiğinde balığın önceki yaşlardaki boyutları yalnızca otolit ölçümlerine dayanarak hesaplanabilir. Ancak uygulamada bu tür geri hesaplamalar çeşitli metodolojik güçlükler içermektedir.

Öncelikle, geçmişteki balık boylarının güvenilir biçimde tahmin edilebilmesi için uygun geri hesaplama algoritmalarının seçilmesi gereklidir. İkinci olarak, otolit büyümesi ile balık büyümesi arasındaki ilişki, özellikle zayıf büyüme gösteren bireylerde ayrışma gösterebilir ve bu durumda tek bir allometrik modelin kullanımı geçerliliğini yitirir (Secor & Dean, 1989). Üçüncü olarak, asimetrik otolitlerde otolit boyutu ile balık boyu arasındaki ilişki, artım genişliklerinin ölçüldüğü standart bir kesit düzlemi ile ilişkilendirilmelidir. Çoğu durumda otolit tüm uzunluğu

boyunca tek bir kesitin okunması mümkün olmadığından, farklı okuma yolları tercih edilmekte; bu da artım genişliklerinin hem allometriye hem de ölçüm açısına bağlı olarak değişmesine neden olmaktadır. Bu tür durumlarda artım genişliklerinin geometrik özelliklere göre standartlaştırılması gerekmektedir. Ancak bu yaklaşımlar henüz yaygın biçimde uygulanmamış olup, söz konusu sorunlar çözülene kadar artım genişliklerinin kullanımı bazı durumlarda sınırlı kalmaktadır.

Bireysel yaş ve uzunluk verileri elde edildiğinde, popülasyon düzeyinde somatik büyüme eğrileri oluşturulabilmektedir. Erken yaşam evrelerine ait büyüme verileri, yetişkin balıklara kıyasla daha farklı modellerle tanımlanmaktadır. Yetişkin bireylerin büyümesi çoğunlukla von Bertalanffy büyüme modeli ile ifade edilirken, larva ve juvenil evrelerde büyüme üstel (Struhsaker & Uchiyama, 1976), lojistik veya Gompertz (Brothers vd., 1976; Lough vd., 1982; Laroche vd., 1982) ya da doğrusal modellerle (Townsend & Graham, 1981; Jones, 1986) tanımlanabilmektedir. Bu erken evrelerde, üst asimptota sahip büyüme eğrilerinin kullanılmasından kaçınılması önemlidir; zira büyümenin durduğu izlenimi çoğu zaman hızlı büyüyen bireylerin örnekleme araçlarından kaçması sonucu oluşan örnekleme yanlışlığından kaynaklanmaktadır.

Teorik olarak, balığın tüm yaşam döngüsü boyunca büyüme hızındaki değişimler çevresel parametrelerle ilişkilendirilebilir. Ancak pratikte bu ilişkiyi ortaya koymak güçtür; çünkü popülasyonlar içsel heterojenlik gösterir ve çevresel değişimlerin büyüme üzerindeki etkileri çoğu zaman kümülatif niteliktedir. Ayrıca balıklar, farklı yaşam evrelerinde çevresel değişkenlere farklı duyarlılıklar göstermektedir. Larval evrede büyümeyi ciddi biçimde etkileyen çevresel değişimler, juvenil bireyler tarafından daha iyi tolere edilebilmektedir.

Geleneksel olarak büyüme, zaman içinde uzunluk-frekans dağılımlarındaki modların izlenmesi yoluyla tahmin edilmiştir. Ancak bu yöntem, sürekli yumurtlamanın ve bireyler arası büyüme farklılıklarının bulunduğu durumlarda kohortların ayrıştırılmasını zorlaştırmaktadır. Otolitlerden elde edilen günlük yaş bilgisi bu sorunun aşılmasında önemli bir avantaj sağlamaktadır (McGurk, 1987). Son yıllarda büyüme analizlerinde zaman serisi analizleri, yaş-sıcaklık büyüme modelleri (Campana & Hurley, 1989) ve kohort izleme teknikleri gibi daha gelişmiş yöntemler kullanılmaya başlanmıştır.

Otolit artım tekniği, stoklara özgü büyüme hızlarındaki farklılıkların ortaya konmasında da etkili bir araçtır. Örneğin Watanabe vd. (1988), Pasifik saury balığında coğrafi büyüme farklılıklarını günlük yaşlandırma yöntemiyle ortaya koymuş ve türün kısa ömürlü olduğuna dair güçlü

kanıtlar sunmuştur. Bu tür çalışmalar, özellikle kısa ömürlü veya tropikal balıklarda büyüme tahminlerinin iyileştirilmesinde günlük yaşlandırma tekniklerinin önemini açıkça göstermektedir.

Son olarak, otolit mikroyapısına dayalı büyüme verileri su ürünleri yetiştiriciliğinde de uygulama alanı bulmaktadır. Kültür ve vahşi popülasyonlar arasındaki büyüme oranlarının karşılaştırılması, yetiştiricilik koşullarının verimliliğinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle yaşamın ilk yılında büyümenin hangi koşullar altında hızlandırılabileceğinin belirlenmesi, ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır.

6.2. Mortalitenin Belirlenmesi

Otolit artım tekniği, özellikle erken yaşam evrelerindeki bireylerde mortalite oranlarının nicel olarak tahmin edilmesine olanak sağlayan en güvenilir yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Larva ve juvenil balıklarda günlük yaşın doğru biçimde belirlenebilmesi, kohort bazında yaş dağılımlarının oluşturulmasını ve buna bağlı olarak günlük veya dönemsel mortalite oranlarının hesaplanmasını mümkün kılmaktadır (Essig & Cole, 1986; Houde, 1987). Bu yaklaşım, erken yaşam evrelerinde meydana gelen yüksek ve değişken mortalitenin, stok dinamikleri üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Otolit mikroyapısı kullanılarak elde edilen yaş verileri, bireylerin yakalanma zamanındaki yaşları ile popülasyon içindeki yaş frekanslarının karşılaştırılmasına imkân tanımakta; böylece hayatta kalma oranları ve yaşa bağlı mortalite desenleri güvenilir biçimde ortaya konabilmektedir. Özellikle çevresel koşullara duyarlı olan larval dönemlerde, sıcaklık, besin mevcudiyeti ve hidrodinamik süreçlerin mortalite üzerindeki etkileri, otolit artım analizleri aracılığıyla dolaylı olarak değerlendirilebilmektedir (Houde, 1987; Campana, 1990). Bu yönüyle otolit artım tekniği, erken yaşam evrelerinde “kritik dönem” hipotezinin test edilmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

6.3. Stok Yapısının ve Popülasyon Bağlantılarının Belirlenmesi

Otolit mikroyapısı, balık stoklarının yapısal özelliklerinin ve farklı popülasyonlar arasındaki bağlantıların belirlenmesinde de yaygın biçimde kullanılmaktadır. Günlük artım genişliği ve büyüme örüntülerindeki mekânsal ve zamansal farklılıklar, bireylerin farklı üreme alanlarından veya çevresel koşullardan kaynaklanan ayrı stoklara ait olabileceğine işaret edebilmektedir (Campana vd., 1989a; Lough vd., 1982). Bu tür mikroyapısal farklılıklar, özellikle larval sürüklenme ve tutulma süreçlerinin değerlendirilmesinde önemli bilgiler sunmaktadır.

Otolit artım analizleri, larvaların doğdukları alanlar ile juvenil ve erişkin evrelerde yakalandıkları bölgeler arasındaki bağlantıların kurulmasına olanak tanıyarak, populasyon bağlantısallığının (connectivity) anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu bilgiler, stok ayırımı çalışmalarında genetik ve otolit mikrokimyası gibi yöntemlerle birlikte kullanıldığında, balık stoklarının sınırlarının daha doğru biçimde tanımlanmasına yardımcı olmaktadır (Kalish, 1990; Mulligan vd., 1987). Dolayısıyla otolit mikroyapısına dayalı stok yapısı analizleri, ekosistem temelli balıkçılık yönetimi yaklaşımlarının geliştirilmesi açısından kritik bir rol üstlenmektedir.

6.4. Yaşam Tarihi Olayları

Otolit günlük olayları kaydettiği için, metamorfoz veya habitat değişikliği gibi birçok yaşam tarihi olayı, otolitlerin genişliklerindeki ve elementel kompozisyonlarındaki değişikliklerle yansıtılacaktır. Birçok araştırmacı, bu olayların zamanlamasının ve ilişkili büyüme değişikliklerinin, otolitleri kontrol işaretleri ve kompozisyonlarındaki değişiklikler açısından inceleyerek tahmin edilebileceğini fark etmiştir. İlk örneklerden biri, pelajik larvalardan demersal yetişkin resif habitatına geçişin incelenmesidir.

7. Sonuç

Otolit mikroyapısı ve buna dayalı olarak geliştirilen otolit artırım tekniği, balıkların yaş, büyüme ve yaşam öyküsü dinamiklerini yüksek zamansal çözünürlükle ortaya koyabilen en güvenilir biyolojik yöntemlerden biridir. Günlük artımların biyolojik temellerinin anlaşılması, metodolojik yaklaşımların standartlaştırılması ve mikroskobik analiz tekniklerindeki ilerlemeler sayesinde, bu yöntem erken yaşam evrelerinden erişkin bireylere kadar geniş bir uygulama alanı kazanmıştır. Otolit artırım tekniği, yalnızca bireysel yaş ve büyüme tahminleri için değil; stok ayırımı, çevresel değişkenlerin büyüme üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi ve balıkçılık yönetimine bilimsel girdi sağlanması açısından da kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, yalancı artımlar, türler arası farklılıklar ve okuma belirsizlikleri gibi sınırlılıklar, yöntemin dikkatli ve çok yönlü bir yaklaşımla uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Günümüzde otolit mikroyapısının mikrokimya, izotop analizi ve sayısal görüntüleme teknikleriyle entegrasyonu, yöntemin analitik gücünü daha da artırmaktadır. Bu gelişmeler, otolit mikroyapısının gelecekte ekosistem temelli balıkçılık yönetimi ve iklim değişikliği araştırmalarında merkezi bir rol üstleneceğini göstermektedir.

Literatür

- Bagenal, T. B., & Tesch, F. W. (1978). Age and growth. In T. Bagenal (Ed.), *Methods for assessment of fish production in fresh waters* (IBP Handbook No. 3, 3rd ed., pp. 101–136). London, UK: Blackwell Scientific Publications.
- Barkman, R. C. (1978). The use of otolith growth rings to age young Atlantic silversides, *Menidia menidia*. *Transactions of the American Fisheries Society*, 107, 790–792.
- Beamish, R. J., & McFarlane, G. A. (1983). The forgotten requirement for age validation in fisheries biology. *Transactions of the American Fisheries Society*, 112, 735–743.
- Bouain, A., & Siau, Y. (1988). A new technique for staining fish otoliths for age determination. *Journal of Fish Biology*, 32, 977–978.
- Brothers, E. B., Mathews, C. P., & Lasker, R. (1976). Daily growth increments in otoliths from larval and adult fishes. *Fishery Bulletin*, 74, 1–8.
- Brothers, E. B., & McFarland, W. N. (1981). Correlations between otolith microstructure, growth, and life history transitions in newly recruited French grunts (*Haemulon flavolineatum*). *Rapports et Procès-Verbaux des Réunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 178, 369–374.
- Campana, S. E. (1983). Feeding periodicity and the production of daily growth increments in otoliths of steelhead trout (*Salmo gairdneri*) and starry flounder (*Platichthys stellatus*). *Canadian Journal of Zoology*, 61, 1591–1597.
- Campana, S. E. (1984). Interactive effects of age and environmental modifiers on the production of daily growth increments in otoliths of plainfin midshipman (*Porichthys notatus*). *Fishery Bulletin*, 82, 165–177.
- Campana, S. E., & Neilson, J. D. (1985). Microstructure of fish otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42, 1014–1032.
- Campana, S. E., Gagné, J. A., & Munro, J. (1987). Otolith microstructure of larval herring (*Clupea harengus*): Image or reality? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44, 1922–1929.
- Campana, S. E., & Hurley, P. C. F. (1989). An age- and temperature-mediated growth model for cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) larvae in the Gulf of Maine. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46, 603–613.
- Campana, S. E. (1990). How reliable are growth back-calculations based on otoliths? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47, 2219–2227.
- Carlander, K. D. (1987). A history of scale age and growth studies of North American freshwater fish. In R. C. Summerfelt & G. E. Hall (Eds.), *Age and growth of fish* (pp. 3–14). Iowa State University Press, Ames.
- Castonguay, M. (1987). Growth of American and European eel *leptocephali* as revealed by otolith microstructure. *Canadian Journal of Zoology*, 65, 875–878.

- Chang, W. Y. B. (1982). A statistical method for evaluating the reproducibility of age determination. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39, 1208–1210.
- Crecco, V. A., & Savoy, T. F. (1985). Effects of biotic and abiotic factors on growth and relative survival of young American shad (*Alosa sapidissima*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42, 1640–1648.
- Crecco, V. A., & Savoy, T. F. (1987). Review of recruitment mechanisms of the American shad: The critical period and match–mismatch hypotheses. *American Fisheries Society Symposium*, 1, 455–468.
- Eckmann, R., & Rey, P. (1987). Daily increments on the otoliths of larval and juvenile *Coregonus* spp., and their modification by environmental factors. *Hydrobiologia*, 148, 137–143.
- Essig, R. J., & Cole, C. F. (1986). Methods of estimating larval fish mortality from daily increments in otoliths. *Transactions of the American Fisheries Society*, 115, 34–40.
- Geffen, A. J. (1982). Otolith ring deposition in relation to growth rate in herring (*Clupea harengus*) and turbot (*Scophthalmus maximus*) larvae. *Marine Biology*, 71, 317–326.
- Gutierrez, E., & Morales-Nin, B. (1986). Time series analysis of daily growth in *Dicentrarchus labrax* L. otoliths. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 103, 163–179.
- Haake, P. W., Wilson, C. A., & Dean, J. M. (1982). A technique for the examination of otoliths by SEM with application to larval fishes. In C. F. Bryan, J. V. Connor, & F. M. Truesdale (Eds.), *Proceedings of the Fifth Annual Larval Fish Conference* (pp. 12–15). Baton Rouge, LA: LSU Press.
- Hederstrom, H. (1959). Observations on the age of fishes. Report of the Institute of Freshwater Research Drottningholm, 40, 161–164.
- Houde, E. D. (1987). Fish early life dynamics and recruitment variability. *American Fisheries Society Symposium*, 2, 17–29.
- Hurlbert, S. H. (1984). Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs*, 54, 187–211.
- Hurley, G. V., Odense, P. H., O'Dor, R. K., & Dawe, E. G. (1985). Strontium labelling for verifying daily growth increments in the statolith of the short-finned squid (*Illex illecebrosus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42, 380–383.
- Jackson, G. D. (1989). The use of statolith microstructures to analyze life-history events in the small tropical cephalopod *Idiosepius pygmaeus*. *Fishery Bulletin*, 87, 265–272.
- Jones, C. (1986). Determining age of larval fish with the otolith increment technique. *Fishery Bulletin*, 84, 91–103.
- Jones, C., & Brothers, E. B. (1987). Validation of the otolith increment aging technique for striped bass (*Morone saxatilis*) larvae reared under suboptimal feeding conditions. *Fishery Bulletin*, 85, 171–178.

- Jones, C. M. (1992). Development and application of the otolith increment technique. In D. K. Stevenson & S. E. Campana (Eds.), *Otolith microstructure examination and analysis* (Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences No. 117, pp. 1–11). Ottawa, Canada: Department of Fisheries and Oceans.
- Kalish, J. M. (1989). Otolith microchemistry: Validation of the effects of physiology, age and environment on otolith composition. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 132, 151–178.
- Kalish, J. M. (1990). Use of otolith microchemistry to distinguish the progeny of sympatric anadromous and non-anadromous salmonids. *Fishery Bulletin*, 88, 657–666.
- Laroche, J. L., Richardson, S. L., & Rosenberg, A. A. (1982). Age and growth of a euronectid, *Parophrys vetulus*, during the pelagic larval period in Oregon coastal waters. *Fishery Bulletin*, 80, 93–104.
- Lough, R. G., Pennington, M., Bolz, G. R., & Rosenberg, A. A. (1982). Age and growth of larval Atlantic herring, *Clupea harengus* L., in the Gulf of Maine–Georges Bank region based on otolith growth increments. *Fishery Bulletin*, 80, 187–200.
- McGurr, M. D. (1984). Ring deposition in the otoliths of larval Pacific herring, *Clupea harengus pallasii*. *Fishery Bulletin*, 82, 113–120.
- McGurr, M. D. (1987). Age and growth of Pacific herring larvae based on length-frequency analysis and otolith ring number. *Environmental Biology of Fishes*, 20, 33–47.
- Methot, R. D., Jr., & Kramer, D. (1979). Growth of northern anchovy, *Engraulis mordax*, larvae in the sea. *Fishery Bulletin*, 77, 413–423.
- Mulligan, T. J. (1987). Identification of white perch (*Morone americana*) stocks in Chesapeake Bay based on otolith composition and mitochondrial DNA analysis (Doctoral dissertation). University of Maryland, College Park, MD.
- Mulligan, T. J., Martin, F. D., Smucker, R. A., & Wright, D. A. (1987). A method of stock identification based on the elemental composition of striped bass (*Morone saxatilis* [Walbaum]) otoliths. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 114, 241–248.
- Neilson, J. D., & Geen, G. H. (1982). Otoliths of chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*): Daily growth increments and factors influencing their production. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39, 1340–1347.
- Neilson, J. D., Geen, G. H., & Borrom, D. (1985a). Estuarine growth of juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) as inferred from otolith microstructure. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42, 899–908.
- Neilson, J. D., Geen, G. H., & Borrom, D. (1985b). Variability in dimensions of salmonid otolith nuclei: Implications for stock identification and microstructure interpretation. *Fishery Bulletin*, 83, 81–89.

- Pannella, G. (1971). Fish otoliths: Daily growth layers and periodical patterns. *Science*, 173, 1124–1127.
- Pannella, G. (1974). Otolith growth patterns: An aid in age determination in temperate and tropical fishes. In T. B. Bagenal (Ed.), *The ageing of fish* (pp. 28–39). Surrey, England: Unwin Brothers Ltd.
- Pannella, G. (1980). Growth patterns in fish sagittae. In D. C. Rhoads & R. A. Lutz (Eds.), *Skeletal growth of aquatic organisms: Biological records of environmental change* (pp. 519–560). New York, NY: Plenum Press.
- Peterman, R. M. (1990). Statistical power analysis can improve fisheries research and management. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47, 2–15.
- Radtke, R. L. (1978). The formation and growth of otoliths in the estuarine fish, *Fundulus heteroclitus* (Doctoral dissertation). Columbia University, South Carolina.
- Radtke, R. L. (1984). Formation and structural composition of larval sniped mullet otoliths. *Transactions of the American Fisheries Society*, 133, 186–191.
- Radtke, R. L. (1989). Strontium–calcium concentration ratios in fish otoliths as environmental indicators. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 92, 189–193.
- Rice, J. A. (1987). Reliability of age and growth-rate estimates derived from otolith analysis. In R. C. Summerfelt & G. E. Hall (Eds.), *Age and growth of fish* (pp. 167–176). Ames, IA: Iowa State University Press.
- Ricker, W. E. (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations (Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada No. 191). Ottawa, Canada: Fisheries Research Board of Canada.
- Savoy, T. F., & Crecco, V. A. (1988). The timing and significance of density-dependent and density-independent mortality of American shad (*Alosa sapidissima*). *Fishery Bulletin*, 86, 467–482.
- Secor, D. H., & Dean, J. M. (1989). Somatic growth effects on the otolith–fish size relationship in young pond-reared striped bass (*Morone saxatilis*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46, 113–121.
- Stevenson, D. K., & Campana, S. E. (Eds.). (1992). Otolith microstructure examination and analysis (Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences No. 117). Ottawa, Canada: Department of Fisheries and Oceans.
- Struhsaker, P., & Uchiyama, J. H. (1976). Age and growth of the nehu, *Stolephorus purpureus* (Pisces: Engraulidae), from the Hawaiian Islands as indicated by daily growth increments of sagittae. *Fishery Bulletin*, 74, 9–17.
- Szedlmayer, S., Szedlmayer, M. M., & Sieracki, M. E. (1991). Automated enumeration by computers of age-0 weakfish (*Cynoscion regalis*) scale circuli. *Fishery Bulletin*, 89, 337–340.
- Taubert, B. D., & Coble, D. W. (1977). Daily rings in otoliths of three species of *Lepomis* and *Tilapia mossambica*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 34, 332–340.

- Thresher, R. E., Harris, G. P., Gunn, J. S., & Clementson, L. A. (1989). Phytoplankton production pulses and episodic settlement of a temperate marine fish. *Nature*, 341, 641–643.
- Townsend, D. W., & Graham, J. J. (1981). Growth and age structure of larval Atlantic herring (*Clupea harengus harengus*) in the Sheepscot River estuary, Maine, as determined by daily growth increments in otoliths. *Fishery Bulletin*, 79, 123–130.
- Uchiyama, J. H., Burch, R. K., & Kram, S. A., Jr. (1986). Growth of dolphins, *Coryphaena hippurus* and *C. equiselis*, in Hawaiian waters as determined by daily increments on otoliths. *Fishery Bulletin*, 84, 186–191.
- Victor, B. C. (1982). Daily otolith increments and recruitment in two coral-reef wrasses, *Thalassoma bifasciatum* and *Halichoeres bivittatus*. *Marine Biology*, 71, 203–208.
- Volk, E. C. (1986). Use of calcareous otic elements (statoliths) to determine age of sea lamprey ammocoetes (*Petromyzon marinus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43, 718–722.
- Watanabe, Y., Butler, J. L., & Mori, T. (1988). Growth of Pacific saury, *Cololabis saira*, in the northeastern and northwestern Pacific Ocean. *Fishery Bulletin*, 86, 489–498.

Bölüm 13

SU EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK- AĞIR METAL İLİŞKİSİ

*Doç. Dr. Adem Yavuz SÖNMEZ, Arş. Gör. Dr. Yiğit
TAŞTAN*

Giriş

Denizel ortamlar, doğal kaynakların sürdürülebilirliği ve biyolojik çeşitliliğin korunması açısından küresel düzeyde kritik öneme sahip sistemlerdir. Ancak son yıllarda, bu karmaşık ve hassas ekosistemler insan kaynaklı kirlilik baskısı altında ciddi bozulmalarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu bozulmaların başında hem miktar hem de yaygınlık açısından dikkat çeken mikroplastik kirliliği ile ağır metal kontaminasyonu yer almaktadır. Son dönem araştırmalar, bu iki kirletici sınıfının yalnızca kendi başlarına değil, aynı zamanda birlikte etkileşim içerisinde olduklarında çevre ve organizmalar üzerinde daha karmaşık ve çoğunlukla sinerjik etkiler doğurduklarını göstermektedir (Rochman vd., 2013; Liu vd., 2022).

Mikroplastikler, 5 mm'den küçük plastik parçacıklar olarak tanımlanır ve iki ana kaynaktan türemektedir: birincil mikroplastikler (kozmetik ürünler, tekstil mikrolifleri) ve ikincil mikroplastikler (büyük plastik atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik ayrışması sonucu oluşan parçacıklar) (Andrady, 2011; Cole vd., 2011). Bu partiküller, yüksek özgül yüzey alanı, hidrofobiklik, dayanıklılık ve çeşitli yüzey fonksiyonel grupları sayesinde çevresel kirleticiler için potansiyel bir taşıyıcı (vektör) görevi görebilmektedir.

Ağır metaller ise (örneğin kurşun [Pb], kadmiyum [Cd], civa [Hg], krom [Cr], çinko [Zn], bakır [Cu]) denizel ortamlarda yaygın olarak bulunan, biyobirikim yapabilen ve biyolojik olarak parçalanamayan toksik elementlerdir (Wright vd., 2013). Bu metaller, endüstriyel deşarjlar, gemi boyaları, kentsel atıklar ve tarımsal akışlarla denizel sistemlere taşınmakta; çözünmüş veya partikül formda bulunarak sedimentler ve organizmalar arasında kompleks bir döngü oluşturmaktadır (Holmes vd., 2012).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin bu metal iyonlarını adsorbe etme kapasitesine sahip olduğunu ve bu özelliğin mikroplastikleri mobil bir ağır metal taşıyıcısına dönüştürdüğünü ortaya koymuştur (Brennecke vd., 2016; Gao vd., 2021). Özellikle yaşlanmış veya yüzeyi biyofilm ile kaplanmış mikroplastikler, çevredeki metallerle daha kuvvetli etkileşim gösterebilmektedir (Li vd., 2022). Bu durum, deniz canlılarının mikroplastik-metal komplekslerini sindirmesi sonucu ortaya çıkan biyolojik etkileri hem toksikolojik açıdan hem de gıda güvenliği bağlamında oldukça önemli kılmaktadır (Bhagat vd., 2020).

Öte yandan, mikroplastiklerin yüzeyinde kolonileşen mikrobiyal topluluklar, yani plastisfer, bu sürecin yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda biyokimyasal olarak da aktif bir sistem olduğunu göstermektedir. Plastisfer mikroorganizmalarının hem mikroplastiklerin bozunmasında hem

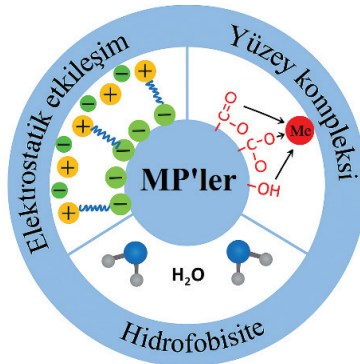
de ağır metal iyonlarının biyosorpsiyonunda rol oynayabildiği gösterilmiştir (Mishra vd., 2024).

Bu literatür derlemesi, söz konusu karmaşık etkileşim ağını ayrıntılı biçimde analiz etmeyi hedeflemektedir. Konu temel olarak; mikroplastiklerin fiziksel/kimyasal özellikleri ve çevresel dağılımları, farklı polimer tiplerinin ağır metal adsorpsiyon kapasiteleri, yaşlanma, UV maruziyeti ve biyofilm oluşumunun adsorpsiyon üzerindeki etkileri, plastisferin mikrobiyal çeşitliliği ve bu çeşitliliğin metal tutunumuna katkısı, mikroplastik-metal komplekslerinin deniz canlıları üzerindeki toksikolojik etkileri, gıda zinciri boyunca mikroplastik-metal taşınımı ve potansiyel insan sağlığı riskleri, ulusal ve uluslararası izleme, denetim ve yönetmelikler çerçevesinde değerlendirme, biyoteknolojik çözüm yaklaşımları ve sürdürülebilir arıtma stratejileri kapsamalarında incelenecektir.

Bu bağlamda, mikroplastiklerin ağır metallerle olan etkileşiminin yalnızca ekolojik boyutta değil, aynı zamanda halk sağlığı, çevre politikaları ve endüstriyel yönetim açısından da çok katmanlı bir sorun olduğu ortaya konulacaktır.

Mikroplastiklerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri ile Ağır Metal Adsorpsiyon Yetenekleri

Mikroplastikler, farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde çevresel kirleticilerle, özellikle de ağır metallerle yüksek etkileşim kapasitesine sahiptir. Bu kapasite, büyük ölçüde mikroplastiklerin polimer türüne, yüzey alanına, fonksiyonel gruplarına ve yaşlanma derecesine bağlıdır (Gao vd., 2021; Liu vd., 2022). Özellikle denizel ortamlarda maruz kaldıkları fotooksidasyon, biyolojik bozunma ve mekanik aşınma, mikroplastiklerin yüzey yapısını değiştirerek ağır metal adsorpsiyonunu artırabilir (Li vd., 2022).



Şekil 1. MP'ler ve ağır metaller arasındaki adsorpsiyon mekanizmasının şematik diyagramı (Li vd., 2022).

Mikroplastikler çoğunlukla polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), poliamid (PA) ve polietilen tereftalat (PET) gibi sentetik polimerlerden oluşur. Bu polimerlerin yapısal ve kimyasal özellikleri, ağır metal iyonlarıyla kurdukları bağların türünü ve gücünü belirler. Polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi apolar polimerler, hidrokarbon zincirleri nedeniyle düşük yüzey enerjisine sahiptir. Bu nedenle metal iyonlarıyla doğrudan elektrostatik etkileşimleri zayıftır; fakat yaşlanma ile yüzeyde polar gruplar oluştuğunda bu kapasite artar (Zhou vd., 2020).

Örneğin, PA polimeri, yüzeyinde bulunan amin (NH_2) ve karboksil ($-\text{COOH}$) grupları sayesinde Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} gibi katyonik ağır metallerle koordinatif bağlar kurabilmektedir. PS ise aromatik yapısı sayesinde $\pi-\pi$ etkileşimleri aracılığıyla bazı metal kompleksleriyle etkileşime girebilir. PVC’de bulunan polar klor atomları ise yüzey yük dengesini değiştirerek metal adsorpsiyon kapasitesini artırabildiği bildirilmiştir (Gao vd., 2021).

Yapılan bir başka çalışmada ise yaşlanma sonrası tüm polimerlerde adsorpsiyon kapasitesinde önemli artışlar gözlemlendiği ve bu artışın, yüzey fonksiyonel gruplarında meydana gelen değişimler ve porozitenin artmasıyla izah edildiği rapor edilmiştir (Li vd., 2022).

Benzer şekilde Holmes vd. (2012), İngiltere kıyılarından toplanan polimer reçine peletlerinin yüzeyinde Pb ve Cd gibi metallerin biriktiğini rapor etmiş ve adsorpsiyon düzeylerinin polimer türüne göre farklılık gösterdiğini belirtmiştir.

Bununla birlikte porozite, pürüzlülük ve hidrofobiklik gibi yüzey özelliklerinin de adsorpsiyon yeteneğine etkileri olduğu çeşitli çalışmalarla ortaya koyulmuştur.

Mikroplastiklerin metal iyonlarıyla etkileşimi, büyük ölçüde yüzey alanı ve porozite ile ilişkilidir. Daha yüksek yüzey alanına sahip polimerler, metal iyonları için daha fazla bağlanma noktası sunar. Örneğin, yaşlanma sonucu oluşan çatlaklar, gözenekler ve yüzey oksidasyonu metal adsorpsiyonunu artırmaktadır (Holmes vd., 2012).

Gao vd. (2021) tarafından derlenen çalışmalarda, yüzey alanı (SSA) yüksek olan mikroplastiklerin, özellikle yaşlandırılmış PE ve PS, Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} gibi iyonları daha hızlı ve güçlü adsorbe ettiği gösterilmiştir. Ayrıca hidrofobik etkileşimler, özellikle polietilen ve polipropilen gibi apolar polimerlerde yüzey bazlı adsorpsiyon mekanizmalarının temel bileşeni olabileceği bildirilmiştir.

Bir diğer faktör olan yüzeydeki fonksiyonel gruplar, metal iyonlarıyla elektrostatik etkileşimler, yüzey kompleksasyonu, ligand değişimi gibi mekanizmalar aracılığıyla bağ kurar. Bu bağlar çoğunlukla şu şekildedir: Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} gibi iyonlar: Ligand kompleksasyonu ile $-\text{COOH}$ ve $-\text{OH}$ gruplarına bağlanır, Pb^{2+} ve Cd^{2+} : Yüzey negatif yüklerle elektrostatik çekim oluşturur, Cr (özellikle CrO_4^{2-} olarak): pH'a bağlı olarak H-bağı veya elektrostatik çekimle yüzeye bağlanabilir (Li vd., 2022).

Freundlich izoterm modeli, mikropplastik metal etkileşimlerinin çoğunlukla çok katmanlı adsorpsiyon mekanizmalarına dayandığını göstermektedir (Liu vd., 2022). Langmuir izoterminden farklı olarak, bu model heterojen yüzeylerde gerçekleşen adsorpsiyonları tanımlar.

Mikropplastiklerin ağır metallere karşı gösterdiği seçicilik yalnızca polimer özelliklerinden değil, aynı zamanda metal iyonunun fizikokimyasal özelliklerinden de etkilenir. Bu özellikler arasında:

İyonik çap: Daha küçük çaplı iyonlar gözenekli yüzeylere daha kolay difüze olabilir,

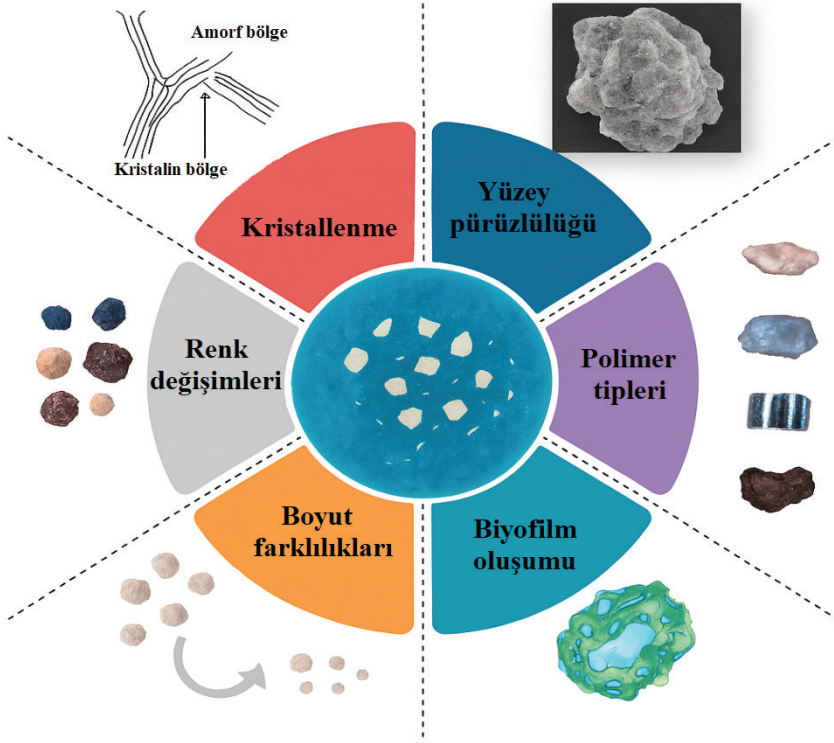
Yük yoğunluğu: Yüksek yük yoğunluğuna sahip iyonlar (örneğin Cr^{3+} , Fe^{3+}), yüzey fonksiyonel grupları ile daha güçlü kompleksler oluşturur,

Ligand afinitesi: Cu^{2+} gibi geçiş metallerinin $-\text{NH}_2$ ve $-\text{COOH}$ gruplarına karşı afinitesi yüksektir,

Özellik kazanımı: pH gibi çevresel faktörler, metalin çözeltideki formunu etkiler (örneğin CrO_4^{2-} vs Cr^{3+}), bu da adsorpsiyon mekanizmasını doğrudan değiştirir (Gao vd., 2021; Liu vd., 2022).

Örneğin Zhou vd. (2020), Cd^{2+} iyonunun yaşlandırılmış PS yüzeyine Pb^{2+} iyonuna göre daha yüksek oranda bağlandığını gözlemlemiştir. Bu, Cd^{2+} iyonunun daha küçük çapı ve yüzeye daha yakın kompleks oluşturma eğilimiyle ilişkilendirilmiştir.

Gerçek denizel sistemlerde ağır metaller çoğunlukla birden fazla türde bulunur. Dolayısıyla metal-metal rekabeti de önemli hale gelmektedir. Liu vd. (2022), Cu^{2+} ve Cr(VI) iyonlarının aynı anda var olduğu bir sistemde, Cu^{2+} iyonunun Cr(VI) 'in PA üzerindeki adsorpsiyonunu baskıladığını, PE üzerinde ise artırdığını göstermiştir. Bu durum, polimerin iyonlarla kurduğu bağ türünün metal spesifikliğine ne denli bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Mikroplastik özelliklerinin ağır metal adsorpsiyonu ile ilişkisi (Liu vd., 2022).

Tüm bunlardan dolayı mikroplastiklerin metal adsorpsiyonunda birçok faktörün etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Mikroplastiklerin Yaşlanma Süreci ve Ağır Metal Adsorpsiyonu Üzerindeki Etkileri

Mikroplastiklerin çevrede uzun süre varlık göstermesi, onların fiziksel ve kimyasal olarak “yaşlanmasına” yol açar. Bu süreç, metal iyonlarının mikroplastik yüzeyine tutunmasında önemli değişiklikler yaratır. Yaşlanma, doğal ortamda genellikle üç ana mekanizma aracılığıyla meydana gelir: fotooksidatif yaşlanma, termal oksidasyon ve biyolojik yaşlanma. Deniz ortamlarında UV ışınımı, tuzluluk, sıcaklık değişimleri ve mikrobiyal aktivite gibi faktörler, bu yaşlanma türlerinin eşzamanlı işleyişine zemin hazırlar (Gao vd., 2021).

Yaşlanma sonucu mikroplastiklerin yüzeyinde oksidasyonla birlikte polar fonksiyonel gruplar özellikle hidroksil ($-OH$), karbonil ($-C=O$) ve

karboksil ($-\text{COOH}$) ortaya çıkar. Bu gruplar, metal iyonları ile ligand-metal kompleksleri oluşturma kapasitesine sahiptir (Liu vd., 2022). Örneğin yaşlanmamış PE genellikle hidrofobiktir ve metal iyonlarını zayıf düzeyde adsorbe ederken, yaşlanmış PE yüzeyindeki $-\text{COOH}$ grupları, Cu^{2+} , Zn^{2+} gibi katyonlarla kuvvetli koordinasyon bağları kurabilirler (Holmes vd., 2012).

Yaşlanmış mikroplastiklerde gözlenen çatlaklar, gözenekler ve yüzey pürüzlülüğü, metal iyonlarının yüzeye daha fazla temas etmesine olanak tanır. Li ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, yaşlanma sonrası PS mikroplastiklerin Cr(VI) adsorpsiyon kapasitesinde %118'lik bir artış rapor edilmiştir. Bu değişim, yaşlanma ile oluşan yeni aktif bölgelerle ilişkilendirilmiştir.

Benzer şekilde Gao vd. (2021), yaşlandırılmış PE'nin yüzey alanının %35 oranında arttığını ve bunun Cr^{3+} ve Pb^{2+} iyonlarının adsorpsiyon kapasitesini yaklaşık iki katına çıkardığını raporlamıştır.

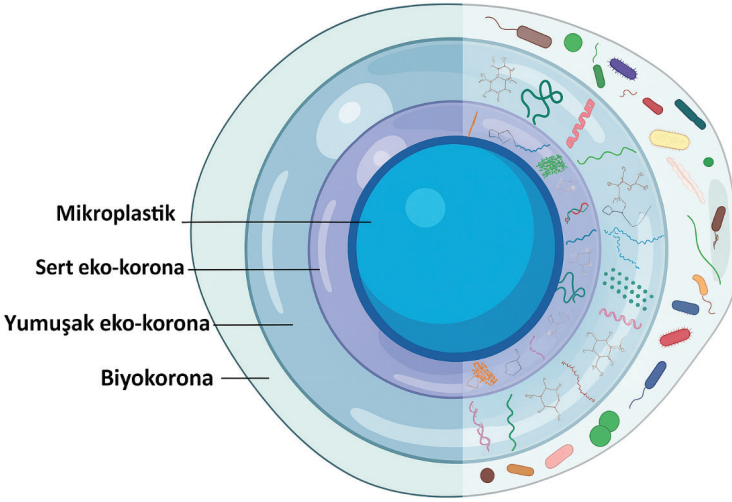
Yaşlanma süreci, mikroplastiklerin adsorpsiyon davranışını termodinamik açıdan da değiştirir. Liu vd. (2022), yaşlanma sonrası metal iyonlarının mikroplastiklere bağlanmasının daha çok Freundlich izotermi ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu, adsorpsiyonun çok katmanlı, heterojen yüzeylerde gerçekleştiği anlamına gelir. Öte yandan, yaşlanmamış mikroplastiklerde genellikle Langmuir izotermi egemendir; bu model tek katmanlı adsorpsiyonu tanımlar.

Yaşlanma ile birlikte mikroplastikler yalnızca adsorpsiyon kabiliyetine sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda çevrede bir metal taşıyıcı ("mobilizasyon vektörü") haline gelir. Özellikle tuzluluk ve pH değişimleri gibi çevresel stres faktörleri, bu komplekslerin desorpsiyonunu tetikleyerek metallerin yeniden çözünür hale gelmesine neden olabilir (Gao vd., 2021).

Bu durum, mikroplastik-metal komplekslerinin stabilitesinin ekotoksikolojik risk analizinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Plastisfer Mikrobiyomu ve Ağır Metal Etkileşimleri

Mikroplastikler deniz ortamına girdikten kısa süre sonra, yüzeyleri mikrobiyal koloniler tarafından istila edilir. Bu kolonilerden oluşan mikrobiyal topluluklar "plastisfer" olarak adlandırılır ve sadece mikroplastiklerin ekolojik kaderini değil, aynı zamanda ağır metallerle olan etkileşimlerini de belirleyici hale getirir (Zettler vd., 2013). Plastisfer, deniz suyundaki çözünmüş organik maddeyi, tuzları ve kirleticileri etkileyen aktif bir mikrobiyal niş oluşturur.



Şekil 3. *Plastisfer, bir mikroplastik parçacığı saran üç katmandan oluşur. Birinci katman, sıkıca yapışmış doğal organik madde içeren sert eko-koronadan oluşur. Yumuşak eko-korona, sert eko-koronaya gevşekçe bağlı doğal organik maddeden oluşur. Son olarak, biyo-korona, çok çeşitli mikrobiyal türleri barındıran hücre dışı polisakkarit bazlı bir biyofilmden oluşur (Kanter, 2022).*

Plastisfer, mikroplastik yüzeyinde kolonileşen prokaryotik ve ökaryotik mikroorganizmaların oluşturduğu kompleks bir topluluktur. Mishra ve arkadaşları (2024), mikroplastik yüzeyinde bulunan mikroorganizmaların, çevre suyundakinden taksonomik ve işlevsel olarak belirgin şekilde farklılaştığını rapor etmiştir. Bu toplulukların en baskın üyeleri arasında *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria* ve *Cyanobacteria* bulunur.

Bazı plastisfer bakterileri, plastikteki katkı maddelerini kullanarak büyüyebilirken; bazıları da polimer yapılarını parçalayan hidrolitik enzimler üretmektedir (ör. esterazlar, oksidazlar). Bu durum, mikroplastiklerin çevresel bozunum sürecini hızlandırabilir.

Mikrobiyal hücre zarları ve hücre dışı polimerik maddeler (HPM), negatif yüklü işlevsel gruplar içerir: Bunlar karboksil, hidroksil, fosfat ve amino gruplarıdır. Bu gruplar, ağır metallerle elektrostatik çekim, iyon değişimi veya kompleksasyon yoluyla etkileşebilir (Behera ve Das, 2023). Bu süreç “biyosorpsiyon” olarak adlandırılır.

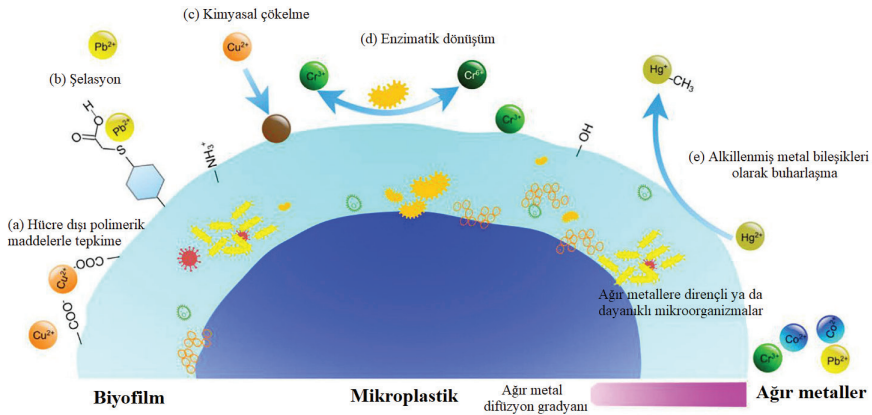
Örneğin, bazı bakteriler Cu^{2+} ve Pb^{2+} iyonlarını HPM yapıları sayesinde bağlayarak toksisiteden korunabilir. Bu aynı zamanda mikroplastik-metal komplekslerinin çevresel taşınım stabilitesini arttırabilir, çünkü mikrobiyal örtü metalleri daha kararlı hale getirir.

Bazı plastisfer üyeleri, ağır metallerin redüksiyonu, metilasyonu veya kompleksasyonu ile onları toksik olmayan formlara dönüştürebilir. Örneğin: *Desulfovibrio* türleri, suda çözünür Cr(VI) iyonlarını toksisitesi düşük Cr(III) formuna indirir. *Pseudomonas* ve *Bacillus* türleri, Cd^{2+} ve Pb^{2+} iyonlarını hücre dışı polimerik maddelerde bağlayarak hücre içine girişlerini engeller. *Shewanella* cinsi, Mn ve Fe iyonlarını redükleyerek metal çökeltisi oluşturabilir (Behera ve Das, 2023). Bu tür aktiviteler, plastisferin sadece pasif bir “film” değil, aktif bir biyokimyasal filtre işlevi gördüğünü göstermektedir.

Holmes vd. (2012), İngiltere açıklarında bulunan mikroplastik örneklerinin yüzeyinde oluşan biyo-film tabakasının Pb^{2+} adsorpsiyon kapasitesini %70 oranında artırdığını ortaya koymuştur. Bu artış, hem mikrobiyal hücre duvarındaki aktif bölgelerle hem de HPM tabakası ile ilişkilendirilmiştir.

Mishra vd. (2024) ise, plastisferdeki bakterilerin metal adsorpsiyon verimliliğinin polimer türüne göre farklılaştığını; PET ve PA gibi polimerlerde daha yoğun mikrobiyal koloni gelişimiyle birlikte daha yüksek adsorpsiyon oranları görüldüğünü raporlamıştır.

Plastisferde yoğunlaşan metaller, mikroplastiklerin sindirilmesiyle birlikte organizmalara geçebilir. Bu durum, trofik geçiş açısından önemlidir. Ayrıca plastisfer mikroorganizmaları bazı durumlarda patojenik olabilir; bu da deniz canlıları ve nihayetinde insanlar için ikincil riskler oluşturur (Mishra vd., 2024).



Şekil 4. Mikroplastikler ve ağır metaller arasındaki etkileşimlerde rol oynayan biyofilm mekanizmaları. (a) Matristeki hücre dışı polimerik maddeler ile tepkime; (b) proteinler ve peptitlerle şelasyon; (c) kimyasal veya biyolojik ajanlar yoluyla çökeltme; (d) enzimatik dönüşüm; (e) alkillenmiş metal bileşiklerini olarak buharlaşma (Liu vd., 2021).

Mikroplastik-Ağır Metal Komplekslerinin Deniz Canlıları Üzerindeki Toksikolojik Etkileri

Denizel organizmalar, yaşam döngülerinin bir bölümünde kaçınılmaz olarak mikroplastiklere ve çözünmüş kirleticilere maruz kalırlar. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar, mikroplastiklerin yüzeyine adsorbe olmuş ağır metallerin deniz canlıları üzerindeki toksik etkilerini daha da artırdığını göstermektedir (Bhagat vd., 2020). Bu birleşik kirletici formundaki mikroplastik-metal kompleksi hem taşıyıcılık fonksiyonu hem de biyoyararlanabilirliği artırma potansiyeli nedeniyle giderek daha fazla ilgi çekmektedir.

Mikroplastikler, deniz canlıları tarafından besin zannedilerek yutulabilir. Bu sırada yüzeylerinde adsorbe olmuş ağır metaller, sindirim sıvıları (düşük pH, enzimatik ortam) sayesinde desorbe olarak organizmanın dokularına geçebilir (Gao vd., 2021). Bu süreç, yalnızca metal iyonlarının biyoalımını değil, aynı zamanda gıda zinciri boyunca taşınmasını da kolaylaştırır.

Örneğin mavi midye (*Mytilus edulis*) üzerinde yapılan bir çalışmada, PE mikroplastiklerle birlikte verilen Pb^{2+} iyonlarının dokularda birikiminin, yalnızca Pb^{2+} maruziyetine göre %65 daha yüksek olduğu bulunmuştur (Holmes vd., 2012).

Bununla birlikte MP-metal komplekslerine maruz kalan deniz canlılarında birçok toksikolojik etkilerin olduğu yapılan çeşitli çalışmalarla bildirilmiştir (Bhagat vd., 2020; Amelia vd., 2021). Bunlar;

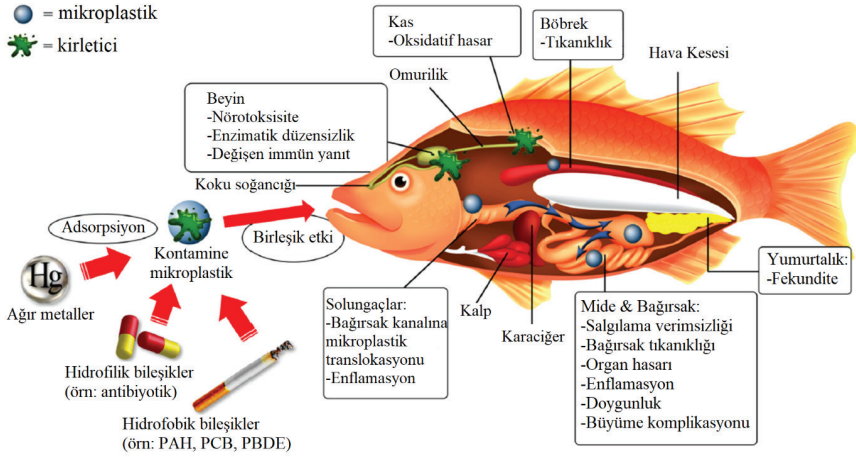
Oksidatif stres: Karaciğer dokusunda ROS üretiminin artması, lipid peroksidasyonu,

Genotoksisite: DNA hasarı, mikronükleus oluşumu,

Enzim aktivitesi bozulması: Glutasyon S-transferaz, süperoksit dismutaz gibi antioksidan enzimlerin aktivitesinde azalma,

Hücre morfolojisi değişiklikleri: Hepatosit çekirdek deformasyonları, solungaç epitel bozulmaları,

Davranışsal etkiler: Yönelim bozukluğu, beslenme süresinin değişmesi, düşük yüzme performansdır.



Şekil 5. Deniz organizmaları üzerinde mikroplastik ve kirleticilerin birleşik etkilerinin gösterimi (Amelia vd., 2021).

Birleşik kirleticilerin (mikroplastik + metal) etkisi her zaman artan değildir; bazen sinerjistik, bazen de antagonistik olabilir. Bu etki tipi; maruziyet süresi, organizma türü, metal tipi ve mikroplastik türü gibi birçok parametreye bağlıdır.

Liu vd. (2022), Cr(VI) ve PE mikroplastiklerin birlikte verildiği *Artemia salina* örneklerinde mortalite oranının her iki kirleticinin ayrı ayrı etkisinden belirgin şekilde yüksek olduğunu raporlamıştır. Bu durum sinerjistik etkiye örnektir.

Buna karşın, bazı çalışmalarda mikroplastiklerin metal iyonlarını bağlayarak biyoerişilebilirliği azalttığı, dolayısıyla toksisiteyi düşürdüğü de bildirilmiştir (Gao vd., 2021). Bu durum genellikle yüksek dozda mikroplastik ve düşük pH gibi koşullarda gözlenmiştir.

Mikroplastik-metal komplekslerinin deniz organizmalarında birikmesi, potansiyel olarak insan besin zincirine taşınma riskini beraberinde getirir. Özellikle midye, istiridye ve küçük pelajik balıklar gibi doğrudan tüketilen türlerde bu risk yüksektir.

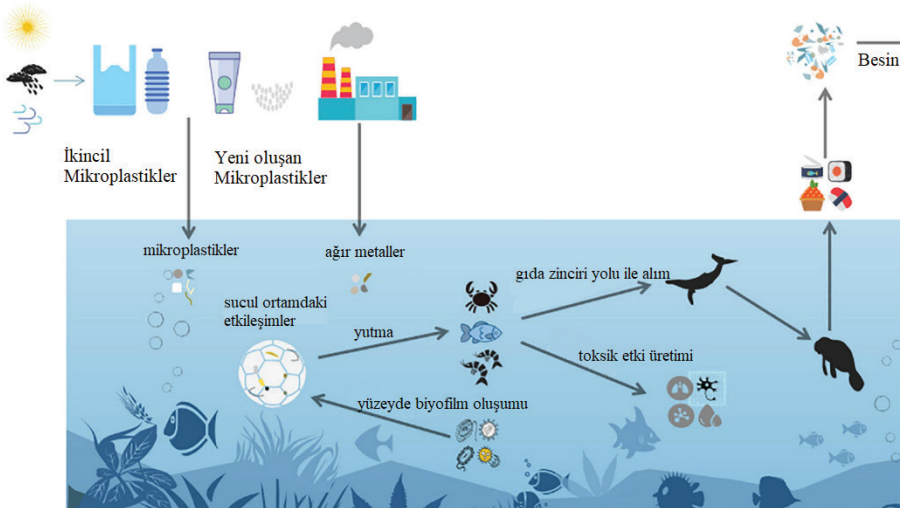
Bhagat vd. (2020), ticari olarak satılan deniz ürünlerinde hem mikroplastik hem de metal kalıntılarına rastlandığını; bu kombinasyonun insan hücreleri üzerinde de oksidatif stres oluşturabileceğini vurgulamıştır.

Tüm bunlardan hareketle bileşik kirleticilerin toksik etkileri sucul ekosistemlerden en düşük yapıları organizmalardan en yüksek yapıları organizmalara kadar farklı düzeylerde olabilmekte ve besin zinciri vasıtasıyla

canlılar arasında yayılabilmektedir. Bu da bu kompleks kirleticinin olası zararlarını daha da üst seviyelere çıkarmaktadır.

Gıda Güvenliği, İnsan Sağlığı ve Regülasyonlar: Mikroplastik-Ağır Metal Komplekslerinin Risk Değerlendirmesi

Mikroplastikler ve bunlara bağlanmış ağır metallerin deniz ürünleri üzerinden insan vücuduna geçme riski, son yıllarda bilimsel ve politik düzeyde giderek daha fazla tartışma konusu haline gelmiştir (GESAMP, 2016; EFSA, 2016). Bu bileşik kirleticiler, yalnızca çevre sağlığını değil, doğrudan gıda güvenliği ve insan sağlığı politikalarını da ilgilendiren bir tehdit oluşturur.



Şekil 6. Ağır metaller ve MP'lerin ekolojik riskleri (Liu vd.,2021).

Mikroplastik-metal komplekslerinin insana geçişinde en önemli kaynaklardan biri deniz ürünleri tüketimidir. Özellikle kabuklu deniz canlıları (örneğin midye, istiridye) vücutlarında filtreleme yoluyla mikroplastikleri ve bağlı metalleri biriktirir. Bu tür canlılar genellikle bütün olarak (bağırsakları ile birlikte) tüketildiğinden, maruziyetin doğrudan gerçekleşebileceği bildirilmektedir (Bhagat vd., 2020).

EFSA (2016)'nin raporuna göre, Avrupa genelinde bireylerin yılda ortalama 11.000 adet mikropplastik partikül tükettiği tahmin edilmektedir. Bu partiküllerin ne kadarının metal taşıdığı tam olarak bilinmemekle birlikte, toksikolojik sınır değerlerin çok düşük olması nedeniyle uzun vadeli etkiler göz ardı edilmemelidir.

Mikroplastik–metal kompleksleri için klasik doz–yanıt eğrileri, tekil kirleticiler için tanımlandığı gibi geçerli değildir. Çünkü bu kompleksler dinamik, ortam koşullarına bağlı olarak çözünürlüğü değişen yapılardır (Liu vd., 2022). Ayrıca mikroplastik boyutu, şekli ve yaşlanma durumu, metalin türü, oksidasyon durumu (örneğin Cr(VI) - Cr(III)), kompleksin gastrointestinal çözünürlüğü gibi birçok parametre toksisiteyi etkilemektedir. Behera ve Das (2023), özellikle plastisfer kaynaklı biyo-transformasyonun toksisiteyi artırabileceğini ve bu parametrenin de değerlendirme sistemlerine dahil edilmesi gerektiğini önermiştir.

GESAMP (2016) ve UNEP (2021) bu alanda “yüksek belirsizlik” vurgusu yapmış ve özellikle bileşik etki analizlerinin eksikliği nedeniyle mevcut risk değerlendirme modellerinin yetersiz olduğunu belirtmiştir.

Mevcut yasal düzenlemeler, çoğunlukla mikroplastikler ve ağır metaller için ayrı ayrı sınır değerler öngörmektedir. Ancak mikroplastik–metal kompleksleri için birleşik maruziyet limitleri, biyoerişilebilirlik odaklı standartlar veya gıdada adsorbe metal–mikroplastik konsantrasyon limitleri bulunmamaktadır.

Avrupa Birliği Deniz Stratejisi Çerçeve Direktifi çerçevesinde deniz çöplerinin azaltılmasına yönelik hedefler belirlenmiştir. Ancak mikroplastik–metal komplekslerinin doğrudan regülasyonu yapılmamıştır.

Türkiye 2021 ve 2023 tarihli “Deniz Çöpleri Strateji Belgesi ve Eylem Planı” çerçevesinde mikroplastikler ele alınmakta, ancak ağır metallerle birleşik formlarına dair açık bir düzenleme bulunmamaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023).

FAO’nun 2022 yılında yayımlanan raporunda, bu tür kirleticilerin potansiyel risk taşıdığı, ancak “veri eksikliği” nedeniyle öneri yapılamadığı bildirilmiştir (Garrido Gamarro ve Costanzo, 2022).

Buradan hareketle yeni risk değerlendirme sistemleri için; Mikroplastik–metal kompleksleri için birleşik risk limitlerinin tanımlanması, biyoerişilebilirlik esaslı analiz metodolojilerinin geliştirilmesi, gıda güvenliği laboratuvarlarında standart mikroplastik–metal tarama protokollerinin oluşturulması ve polimer türü ve metal tipi temelinde toksisite haritalanması gibi yaklaşımların benimsenmesi ve hayata geçirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Mikroplastiklerin deniz ortamındaki kalıcılığı, yalnızca bir fiziksel kirlilik problemi olmaktan çıkmış; kimyasal, biyolojik ve toksikolojik

sonuçları olan çok boyutlu bir çevre sorunu haline gelmiştir. Bu yapay polimer parçacıkları, yüzeylerinde ağır metaller gibi inorganik toksik maddeleri adsorbe edebilme kapasiteleri sayesinde, birer kirletici taşıyıcı vektör olarak işlev görmektedirler. Dahası, plastisfer adı verilen mikrobiyal yaşam formasyonlarıyla biyolojik olarak da aktif hale gelmekte; metallerin biyosorpsiyonu, biyotransformasyonu ve taşınımı süreçlerinde önemli rol oynamaktadırlar.

Bu bölümde, mikroplastiklerin farklı polimer yapılarına göre ağır metal adsorpsiyon kapasitesinin nasıl değiştiği, yaşlanma süreçlerinin bu kapasiteyi nasıl etkilediği, plastisferin bu sürece nasıl katkı sağladığı ve bu kompleks yapıların deniz canlıları ile insanlar üzerindeki potansiyel etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Buradan hareketle politika-izleme-tedbir bağlamında çeşitli önerilere yer verilmiştir.

1. Bilimsel Bilgi Boşlukları

Mevcut literatür, mikroplastik-metal komplekslerinin oluşumu ve davranışı hakkında önemli bilgiler sunsa da çok sayıda belirsizlik sürmektedir:

Gerçek deniz ortamındaki dinamik koşullar altında bu komplekslerin kararlılığı, laboratuvar bulgularıyla sınırlıdır.

Metal türleşmesi (örn. $\text{Cr(VI)} \leftrightarrow \text{Cr(III)}$) gibi kimyasal formlar, toksik etkileri kökten değiştirebilir; ancak bu dönüşümler nadiren incelenmiştir.

Sindirim sıvılarında komplekslerin desorpsiyon kinetiği ve metalin biyoerişilebilirliği, canlı organizmalarda sistematik olarak çalışılmamıştır. Özellikle hem plastiklerin hem de bu iki kirleticinin ne kadarının sindirilebildiği veya ne kadarının organizma bünyesinden atıldığı konuları muammadır.

Plastisferin taksonomik ve fonksiyonel yapısı, yaşlanma süreciyle nasıl evrimleşir? Bu sorunun cevabı halen sınırlı moleküler veriye dayanmaktadır. Bu çalışmaların çoğaltılarak çeşitlendirilmesi ve plastisfere dair bilinmeyenlerin ortaya koyulması gerekmektedir.

Çoklu kirleticilerin etkileşimi (örn. mikroplastik + Cd + pestisit gibi) gibi karmaşık maruziyet senaryoları, hâlâ geniş çaplı deneylerle test edilmemiştir.

Özellikle mikroplastiklerin hangi düzeylerinin sucul canlılar üzerinde toksik etki oluşturduğu, insanlar üzerinde hangi maruziyet düzeylerinin toksik etki oluşturduğuna ilişkin herhangi bir referans veri veya indeks

bulunmayışı bilimsel çalışmaların havada kalmasına neden olmaktadır. Bu referans verilerin acilen oluşturulması gerekmektedir.

2. Politika ve Yönetmelik Açısından Açıklar

Yasal çerçeve hâlâ bu bileşik kirletici türünü (mikroplastik-metal kompleksi) tanımlamaktan uzaktır. Mevcut düzenlemeler çoğunlukla mikroplastikleri ve ağır metalleri ayrı ayrı ele almakta, bu ikisinin etkileşimine dair sınırlı referans içermektedir.

Risk değerlendirme sistemleri, birleşik etkilerin sinerjistik veya antagonistik doğasını hesaba katmamaktadır. Gıda güvenliği protokolleri, deniz ürünlerinde bu kompleks formdaki kirleticilerin taranmasını zorunlu kılmamaktadır.

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde maruziyet ve etki izleme altyapısı yetersizdir. Bu durum hem tüketici sağlığını riske atmakta hem de politik karar alma süreçlerinin bilimsel temelden yoksun ilerlemesine neden olmaktadır.

3. Geleceğe Yönelik Araştırma ve Teknolojik Yaklaşımlar

Bu kompleks çevre sorununu çözmek için çok yönlü araştırmalara ve yenilikçi çözümlere ihtiyaç vardır:

Biyoerişilebilirlik temelli toksikoloji modellerin oluşturulması: Mikroplastik-metal komplekslerinin sindirim sıvılarındaki davranışını modelleyen deney sistemleri geliştirilmesi ve bu sayede sindirilebilirlik düzeyinin belirlenmesi, bu kirleticiler bağlamında toksisitenin belirlenmesi açısından önemlidir.

Omik teknolojileriyle plastisfer analizi: Metagenomik, metaproteomik ve metabolomik yaklaşımlarla mikrobiyal toplulukların fonksiyonel rollerine dair derinlemesine verilerin elde edilmesi bu birleşik kirlilik unsurunun anlaşılmasında önemli bir ivme kazandıracaktır.

Akıllı adsorban teknolojileri: Mikroplastik-metal komplekslerini ortamdan seçici olarak uzaklaştıran biyo-tabanlı veya nanomalzeme destekli filtre sistemleri geliştirilmesi su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilirliği açısından önemlidir.

Yapay zekâ destekli tahmin sistemleri: Trofik geçiş, birikim, toksisite senaryolarını çoklu değişkenle modelleyerek risk analizlerinin hızlandırılması, karar alma mekanizmaları açısından önemli bir araç olacaktır.

Nihai olarak mikroplastik-ağır metal etkileşimi, yalnızca çevre bilimlerinin değil; toksikoloji, mikrobiyoloji, malzeme bilimi, gıda güvenliği ve çevre politikası gibi çok sayıda disiplinin kesişiminde yer almaktadır. Bu bağlamda bilim insanlarına düşen görev, bu kesişimlerdeki bilgi boşluklarını doldurmak; politika yapıcılara düşen görev ise bilimsel verilere dayalı, proaktif ve bütüncül düzenlemeleri hayata geçirmektir.

Kaynaklar

- Amelia, T. S. M., Khalik, W. M. A. W. M., Ong, M. C., Shao, Y. T., Pan, H. J., & Bhupalan, K. (2021). Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00405-4>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Behera, S., & Das, S. (2023). Environmental impacts of microplastic and role of plastisphere microbes in the biodegradation and upcycling of microplastic. *Chemosphere*, 334, 138928. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138928>
- Bhagat, J., Nishimura, N., & Shimada, Y. (2020). Toxicological interactions of microplastics and environmental contaminants: Current knowledge and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 123913. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123913>
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I., & Canning-Clode, J. (2016). Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 178, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- EFSA. (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 14(6), e04501. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501>
- Gao, X., Hassan, I., Peng, Y., Huo, S., & Ling, L. (2021). Behaviors and influencing factors of the heavy metals adsorption onto microplastics: A review. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128777. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128777>
- Garrido Gamarro, E., & Costanzo, V. (2022). *Microplastics in food commodities – A food safety review on human exposure through dietary sources*. Food Safety and Quality Series No. 18. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2392en>
- GESAMP. (2016). *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: Part two of a global assessment*. (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Reports and Studies No. 93
- Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. (2012). Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. *Environmental Pollution*, 160, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.052>

- Kanter, T. D. (2022). *Microbe-microplastic axis: Microplastics as both microbial toxin and tool* (Öğrenci Tezi, Utrecht Üniversitesi).
- Li, Y., Zhang, Y., Su, F., Wang, Y., Peng, L., & Liu, D. (2022). Adsorption behaviour of microplastics on the heavy metal Cr(VI) before and after ageing. *Chemosphere*, 302, 134865. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134865>
- Liu, S., Huang, J., Zhang, W., Shi, L., Yi, K., vd. (2022). Microplastics as a vehicle of heavy metals in aquatic environments: A review of adsorption factors, mechanisms, and biological effects. *Journal of Environmental Management*, 302, 113995. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113995>
- Liu, S., Shi, J., Wang, J., Dai, Y., Li, H., Li, J., ... & Zhang, P. (2021). Interactions between microplastics and heavy metals in aquatic environments: A review. *Frontiers in Microbiology*, 12, 652520. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.652520>
- Mishra, S., Dash, D., & Das, A. P. (2024). Aquatic microbial diversity on plastisphere: Colonization and potential role in microplastic biodegradation. *Geomicrobiology Journal*, 41(4), 312–323. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2209750>
- Rochman, C. M., Hoh, E., Hentschel, B. T., & Kaye, S. (2013). Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to five types of plastic pellets: Implications for plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(3), 1646–1654. <https://doi.org/10.1021/es303700s>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Türkiye deniz çöpleri eylem planı ve stratejisi*.
- UNEP. (2021). *From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. Nairobi. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/36963>
- Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
- Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the “Plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137–7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>
- Zhou, Y., Yang, Y., Liu, G., He, G., & Liu, W. (2020). Adsorption mechanism of cadmium on microplastics and their desorption behavior in sediment and gut environments: The roles of water pH, lead ions, natural organic matter and phenanthrene. *Water Research*, 184, 116209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116209>

Bölüm 14

OZON: SU ÜRÜNLERİNDE UYGULAMALAR

Levent İZCİ¹

¹ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Avlama ve İşleme Teknolojisi Bölümü, Isparta, Türkiye. ORCID ID: 0000-0001-7142-8782, leventizci@isparta.edu.tr

1. GİRİŞ

Gıda güvenliği günümüzün önemli sorunlarından biridir. Gıda yoluyla bulaşan hastalıklarla giderek daha fazla karşılaşilmektedir. Bu nedenle gıda endüstrisi uygun alternatif dekontaminasyon yöntemleri arayışı içindedir. Ozon ise umut vadeden çok yönlü dezenfektanlar arasında yerini almıştır (Perry ve Yousef, 2011).

Ozon (O_3) güçlü oksidasyon etkiye sahiptir (Güzel Seydim vd., 2004; Naito ve Takahara, 2006; Giménez vd., 2024; Zhang vd., 2025). Ozonun toksisitesi, konsantrasyonu ve maruz kalma süresiyle ilişkilidir (Pascual vd., 2007). Ozonun güçlü, belirgin bir kokusu vardır. Düşük dozlarda insanlar için tehlikeli bir gaz olmayıp oda sıcaklığında hızlı bir şekilde parçalanır (Güzel Seydim vd., 2004; Parray vd., 2025). Ozonun gıda endüstrisinin birçok alanında uygulama imkanı bulan güçlü antimikrobiyal bir ajan olması ve kendiliğinden parçalanarak ortamda kalıntı bırakmadan uzaklaştırılabilir olması, gıda endüstrisinde kullanımını güvenilir hale getirmektedir (Kuşçu ve Pazır, 2004). Ozonun yapısı ona önemli reaktivlik özellik kazandırır (Parray vd., 2025). Ozon sahip olduğu özellikler ile ürün kalitesini önemli ölçüde korur ve raf ömrünü uzatır (Pandiselvam vd., 2019).

Ozon, gıda endüstrisinde yüzey hijyeni, ekipman, ambalaj, suların dezenfeksiyonu gibi alanlarda kullanılmaktadır (Ekici vd., 2006). ABD Gıda ve İlaç Dairesinin (FDA) gıdalarla doğrudan temas için kimyasal ve antimikrobiyal bir katkı maddesi olarak Genel Olarak Güvenli (GRAS) olarak ilan etmesinden çok sonra gıda endüstrisi için kabul edilmiştir (Okpala vd., 2015). Gıda endüstrisi ozon kullanımına, getirdiği avantajlar bakımından son yıllarda ilgi duymuştur. Ayrıca ozon özellikleriyle işleme suyunun yeniden kullanılmasını olanaklı hale getirebilir ve çevre dostu uygulamalar sağlayabilir (Kim vd., 2003). Ozon ve ozon kaynaklı oksidanlar su ürünleri yetiştiricilik ünitelerinde (balık, kabuklu ve canlı yem) hayvan sağlığının ve refahının korunması için uygun dozlarda/konsantrasyonlarda kullanılarak hijyen ve su kalitesinin iyileştirilmesinde kullanılabilir (Powell ve Scolding, 2018).

Ozonun gıda endüstrisinde sulu ve gaz şeklinde veya birlikte kullanılabilir. Ozon sistem bileşenleri; gaz, ozon jeneratörü, elektrik kaynağı, kontaktör, reaktör, fazla gaz giderme ünitesi ve ozon analizöründen oluşabilir (Brodowska vd., 2018). Ozonlama, çevreye zarar vermeden gıda tedarik zincirinin sürdürülmesine yardımcı olan bir teknolojidir (Dubey vd., 2022). Güçlü oksitleyici özelliğe sahip ozon, her aşamada sürekli denetim altında olmalı ve çalışanların güvenliğini sağlamak için ekipman bakımları sıkı bir şekilde yapılmalıdır (Perry ve Yousef, 2011).

Bu bölümde, günümüzde gıda endüstrisinde yoğun kullanım alanı bulan “Ozon Uygulaması”nın su ürünlerinde kullanım olanakları değerlendirilecektir.

2. OZON VE TARİHSEL SÜREÇ

Ozon, C. F. Schonbein tarafından keşfedilmiş ve ilk olarak 1907 yılında Nice’de su arıtımında, 1910 yılında da ticari amaçla kullanılmıştır (Parray vd., 2025). 1910 yılında Almanya’da et paketlenme tesisinde, 1936’da Fransa’da kabuklularda, 1972’de Almanya’da kullanım suyunun arıtılmasında, 1977’de Rusya’da kabuklu yumurtalarda *Salmonella*’nın azaltılmasında, 1982’de Amerika Birleşik Devletleri’nde şişelenmiş su için GRAS olarak, 1997’de ise gıda işleminde GRAS olarak ilan edilmiş, 2001’de de FDA gıdalarda; balık, et ve kümes hayvanları da dahil olmak üzere gıda ürünleriyle doğrudan temas halinde kullanımı onaylamıştır (Sopher vd., 2002; Gonçalves, 2009). Günümüzde de gıda ve diğer sektörlerde ilgi görmekte ve konuyla ilgili çalışmalar devam etmektedir.

3. OZON KAYNAĞI VE ÜRETİMİ

Ozon doğal olarak atmosferde oluşur ve yeryüzünü UV-B ve UV-C ışınlarından korur. Ozon, atmosferik koşullarda oksijen (O_2) molekülünün bir oksijen atomu ile birleşmesiyle oluşur (Sivrioğlu, 2016). Ozon üretimi “Korona Deşarjı”, “Fotokimyasal” ve “Elektrokimyasal” olarak gerçekleşmektedir (da Silva vd., 2003; Sivrioğlu, 2016; Mottan vd., 2022; Dubey vd., 2022). Ozon, depolanamadığından dolayı kullanım sırasında devamlı üretilmesi gerekir. Ozonun üretiminde gıda endüstrisinde maliyet etkinliklerinden dolayı Korona Deşarjı ve Ultraviyole en çok tercih edilen yöntemler arasındadır (Dubey vd., 2022).

4. OZON KULLANIMININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Ozon birçok alanda kullanılmakta olup kullanım alanlarına göre avantaj ve dezavantaja sahip güçlü bir dezenfektandır.

Avantajları;

- Uygulama sonrası kalıntı riskinin olmaması (Naito ve Takahara, 2006; Horvitz ve Cantalejo, 2014),
- Termal olmayan dezenfeksiyon yöntemi olması (Giménez vd., 2024),
- Gram pozitif ve Gram negatif bakteriler, virüsler ve mantarlar üzerinde etkili olması (Kim vd., 2003; Mottan vd., 2022; Giménez vd., 2024),

- Balıkların pazarlama kalitesine olumlu etkisinin olması (Gonçalves, 2009),
- Ozon kullanımının sağladığı esneklik, taze ürünler gibi kolayca zarar görebilen ürünlerde uygulanmasına olanak vermesi (Perry ve Yousef, 2011),
- Gaz ve sıvı halde uygulanabilmesi (Horvitz ve Cantalejo, 2014),
- Mikotoksinleri etkisizleştirerek yok edebilir özellikler taşıması (Mottan vd., 2022; Sujayasree vd., 2022; Zhang vd., 2025),
- Birçok alanda kullanılabilir özellik taşıması (Zhang vd., 2025),

Dezavantajları;

- Et yüzey rengini değiştirebilir (Giménez vd., 2024).
- Yağ dokularında acılaşmaya neden olabilir (Perry ve Yousef, 2011; Giménez vd., 2024).
- Kullanım yerine göre doz/konsantrasyon ve uygulama yönteminin belirlenmesinin gerekliliği (Powell ve Scolding, 2018),
- Çalışan güvenliği açısından gerekli kontrollerin sıklıkla yapılması (Perry ve Yousef, 2011).
- Kararlılığı ve üretim maliyetinin yüksek olmasından kaynaklı zorluklar (Zhang vd., 2025),
- Uygun ekipman gerektirmesi (Pandiselvam vd., 2019).

5. OZON VE SU ÜRÜNLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

Su ürünleri sektörü gıda güvenliği için hijyen ve sanitasyon kuralları çerçevesinde üretim yapmak ve bunun sürdürülebilirliğini sağlamak zorundadır. Bunun için su ürünleri sektörü de diğer sektörlerde olduğu gibi her bir gelişmeyi yakından takip etmektedir. Ozon uygulaması da su ürünleri sektörünün yakından takip ettiği ve yaygınlaştırmaya çalıştığı teknolojiler arasındadır.

Su ürünlerinde ölümle birlikte kaçınılmaz olarak aerobik bakteriler çoğalarak bozulma sürecini hızlandırır. Bu nedenle, su ürünlerinin kalitesini artıracak işleme teknolojilerinin uygulanması zorunlu hale gelir (Anchang vd., 2025). Ozon konsantrasyonunun işlenen ürüne, mikroorganizmalara ve çevre koşullarına bağlı olarak değerlendirilmesi önemlidir (Naito ve Takahara, 2006; Giménez vd., 2024). Ozon uygulama-

sı diğer işleme teknikleriyle uygulanabilir ve etkili sonuçlar alınabilir (Giménez vd., 2024). *Oncorhynchus nerka* ve *Loligo pealei* türlerinde ozon kullanımıyla tadında herhangi bir değişim olmaksızın bakteri yükünün azaltılarak raf ömrünün uzatılabileceği saptanmıştır (Blogoslawski ve Stewart, 2011). Qian vd. (2022) somon balığında (*Salmo salar*) ozon uygulamasında doz ve maruz kalma sürelerinin etkilerini incelemiş ve somon kalitesini korumak için ozon uygulamasının umut verici olduğunu ifade ederek, ozon konsantrasyonundan çok uygulama süresinin önemine vurgu yapmışlardır.

Collichthys niveatus balığının kalitesinin değerlendirildiği bir çalışmada, ozon ve sulu buz uygulamasının birlikte balıkçılık endüstrisinde diğer soğutma yöntemleri gibi kullanılabileceği ve gıda güvenliği açısından da etkisine değinilmiştir (Chen vd., 2016). Kalkan balığının (*Psetta maxima*) soğuk muhafazasında ozonlanmış sulu buzun kullanımı araştırılmış ve kalkan balığının raf ömrünün uzatılmasında bu kombinasyonun kullanılabileceği belirtilmiştir (Campos vd., 2006). Farklı buz uygulamalarının *Pseudosciaena crocea* balıklarının raf ömrüne etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada, ozonlanmış sulu buzun *P. crocea*'nın kalitesinin korunmasında ve raf ömrünü uzatılmasında umut verici bir teknik olduğu ifade edilmiştir (Zhao vd. 2022).

Farklı türlerde su ürününün (*Merluccius merluccius*, *Aristeus antennatus*, *Arnoglossus laterna* ve *Eledone moschata*) kalitesinin korunmasına yönelik yapılan çalışmada, ozon ve soğutma teknolojilerinin birlikte uygulamasının raf ömrü üzerinde etkili olduğu tespit edilmiş ve uygulamanın ürüne göre belirlenmesinin gerektiği belirtilmiştir (Aponte vd., 2018).

Ozon su ürünleri kapalı devre yetiştiricilik sistemlerinde biyolojik karbon, bulanıklık, alg, renk, koku ve tattan kurtulmak için kullanılabilir. Ancak gereğinden fazla ozon konsantrasyonları biyofiltre üzerindeki mikrobiyal filmler ve balık stoklarında zarara ve popülasyon kaybına neden olabilir (Saqib vd., 2024). Spiliotopoulou vd. (2018) su ürünleri yetiştiricilik sistemlerinde güvenli ve etkili bir arıtma için kullanılacak ozon dozunu önceden belirlenmesi gerektiğinin önemine dikkat çekmiştir.

Ekonomik değere sahip süs balığı türü olan *Betta splendens*'in mikrobakteriyozise karşı hassas oluşu ve önleyici çözüm arayışları çerçevesinde suyun dezenfeksiyonunda ozon nanokabarcıklarının etkinliği araştırılmıştır. Yapılan testler, çoklu ilaca dirençli ve patojenik *Mycobacterium chelonae* suşuna karşı önemli dezenfekte etkisinin olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışma, uygulamanın *M.chelonae*'ya maruz kalan beta balıklarının hayatta kalma oranlarını artırdığını ve beta balıklarının hastalık

kontrollünde umut verici bir yaklaşım olduğunu göstermiştir (Dinh-Hung vd., 2024).

Balık işleyen bir tesiste çeşitli işleme alanlarında gaz ve sulu ozon uygulamasının son ürünlerdeki mikrobiyal yük üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir. Ozonlu su ile durulama, yıkamanın mikrobiyal yükte önemli bir azalma sağlayabileceği, gaz halindeki ozonun ortam kokusunu azaltarak daha uygun bir ortam sağlayabileceği sonucuna varılmıştır (Sopher vd., 2007).

Suda bazı patojenik bakterilerin yüksek olması yetiştiriciliği yapılan balıklarda hastalıklara neden olabilmektedir. Bu konuda Nil tilapia (*Oreochromis niloticus*) balığında ozon nanokabarcık arıtma yöntemi denenecek elde edilen sonuçlar ışığında, bu yöntemin su ürünleri yetiştiricilik sistemlerindeki patojen bakterilerin azaltılmasında umut verici olduğu ve yetiştiricilik balıklarında bakteriyel hastalık salgınlarının riskinin azaltılmasında da faydalı olabileceği ifade edilmiştir (Jhunkeaw vd., 2021). Nil tilapiası ile yapılan başka bir araştırmada da, bütün balığa ve filetolara farklı süre ve konsantrasyonlarda ozonlu suya daldırma uygulamasıyla bazı kalite özellikleri değerlendirilmiştir. Bütün balığın mikrobiyolojik düzeyinin azaltılmasında en fazla 1,5 ppm'de 15 dakika, filetolarda ise 1 ve 1.5 ppm'in etkili olduğu tespit edilmiş olup filetolarda pH veya renk uygulamadan etkilenmemiş, TBARS (Tiyobarbiturik asit reaktif maddeleri) değerindeki artışla lipid oksidasyon sürecinde küçük bir etkisinin olduğu belirlenmiştir (de Mendonça Silva ve Gonçalves, 2017).

Gelman vd. (2005), Canlı *O. niloticus* balıklarına ozon uygulanmasının depolama (0 ve 5 °C) sırasında balıkların raf ömrüne etkisini belirlemeye yönelik yaptığı çalışmada, ön ozon uygulamasının raf ömrüne olumlu etkide bulunduğunu tespit etmiş ve ozon uygulamasıyla 0 °C'de depolama işleminin birlikte başka balıklar için de raf ömrünün uzatılmasında değerlendirilebileceğine vurgu yapmıştır. Agustini vd.(2017), *O. niloticus* ve *Scomberomorus rastrelliger* balıklarının ozon ve buzlu suyun birlikte uygulanmasının kalite üzerine etkilerini incelemişler ve uygulamanın depolama sürecinde kalitenin korunmasında etkili olduğunu saptamışlardır.

Crowe vd. (2012), lipid miktarı yüksek balıklarda ozon uygulamasının etkilerini araştırmışlar, Atlantik somon filetolarına *Listeria innocua* enjekte ederek endüstriyel sistem kurgulanarak sprey şeklinde ozonlu (1 mg/L ve 1,5 mg/L) su uygulamışlardır. 1,5 mg/L'ye kadar ozonlu sprey uygulamalarının soğuk depolamada (4 °C) lipid oksidasyonu seviyesinde önemli artışlara neden olmadan aerobik bakteri yükünü ve *L. innocua* sayısını önemli ölçüde azalttığını saptamışlardır. Nur vd. (2018) buzdo-

labında balık raf ömrü üzerine yaptıkları araştırmada, uskumru balığı buzdolabına yerleştirilerek günde iki kez ozona maruz bırakılmış ve aynı marka ve özellikteki buzdolabında muhafaza edilen uskumru balıklarına da herhangi bir ozon uygulaması yapılmamıştır. Toplam uçucu bazik azot (TVB-N) üzerinden yapılan değerlendirmede, ozon kullanımının kalitenin korunmasında etkili olduğu ve soğutma sistemlerinde enerji tasarrufu sağlayabileceği ifade edilmiştir.

Hypophthalmichthys nobilis kasında geosmin giderimi için farklı ozon teknikleri kullanılmış, ozonlu su işleminin balık proteininin fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra çamurumsu tadı ortadan kaldırmada ozon flotasyonuna göre daha hafif bir oksidasyon protokolü olduğu belirlenmiştir (Zhang vd., 2016).

Sulu ortamda ozona maruz bırakılan alabalıklarda mikroorganizma yükünün azaldığı, yağ, protein, nem, renk ve lezzet üzerinde herhangi bir değişiklik yaratmadığı ve raf ömrünü uzattığı belirlenmiştir (Dehkordi ve Zokaie, 2010).

Pandalus borealis'in soğuk zincir taşınması sırasında mikrobiyal bozulma, kalitesini ve pazarlanmasını olumsuz etkileyebilir. Bu kapsamda UV-Ozon dezenfeksiyonu karideslere uygulanmış, uygulamanın mikrobiyal yükü önemli düzeyde azalttığı, tazelik süresini uzatması yanında besin içeriği ve duyuşal özelliklerle birlikte gıda güvenliğinde de bir olumsuzluk yaratmadığı belirlenmiştir. Bu uygulama, su ürünlerinin soğuk zincir taşınmasında umut verici olarak değerlendirilmiştir (Li vd., 2025).

Hasat sonrası minimal düzeyde ozon uygulanarak buzda muhafaza edilen Pasifik beyaz karidesin (*Litopenaeus vannamei*) bazı kalite özellikleri ve raf ömrü değerlendirilmiştir. Minimal ozon uygulaması ve buzun birlikte kullanımının karideslerin raf ömrünü uzatabileceği sonucuna varılmıştır (Okpala, 2015). Lipid otooksidasyonu su ürünleri için önemli sorunlar arasında gösterilmektedir. Karides gibi kabuklu su ürünlerinde lipid hasarını azaltmada ozonun kullanılabileceği belirtilmiştir (Okpala, 2016).

Rong vd. (2010), ozonlu su ve kitosan uygulamasının soğuk muhafaza (5 ± 1 °C) sürecinde Pasifik istiridyelerinin (*Crassostrea gigas*) raf ömrüne etkisini incelemişler ve yapılan analizler sonucunda örnek grupları arasında ozon ve kitosanın birlikte uygulandığı grubun en fazla raf ömrüne sahip olduğunu saptamışlardır. Ling vd. (2022), ozonlu suyun ultra yüksek basınç ile birleştirilmesinin yayın balığı (*Lctalurus punctatus*) filetolarının buzdolabında muhafazasında kalitesine olumlu yansıdığını belirtmişlerdir. Modifiye atmosferik paketlenme (MAP) ile ozonun birlik-

te uygulanmasının, *Mullus surmuletus* balıklarının raf ömrünü uzattığı, kalitenin korumasında uygulanabilir bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Bono ve Badalucco, 2012).

Jumbo kalamar (*Dosidicus gigas*) kolay bozulan ürünler arasındadır. Bu nedenle soğuk muhafaza öncesi dekontaminasyonu için ozonlu mikro kabarcık su kullanarak gerçekleştirilen çalışmada, 3 dakika daldırma uygulamasının kalamarlarda mikroorganizma gelişimini azalttığı depolama süresince renk değişimini geciktirdiği tespit edilmiştir. Genel olarak bu uygulamanın kalamarların kalitesini değiştirmeden önleyici bir tedbir olabileceğine işaret edilmiştir (Lin vd., 2023).

Ozon gazı hafif asitli elektrolize suyun somon balığının dokusunda meydana gelen değişimler konusunda yapılan çalışmada, ozon gazı ve hafif asidik elektrolize suyun birlikte uygulamasının soğuk depolama sırasında somon kas proteinlerinin bozulmasını etkili bir şekilde geciktirdiği gösterilmiş ve çalışmaların detaylandırılmasının gerekliliğine dikkat çekilmiştir (Qian vd., 2024).

Avcılık sonrası mezgit balıklarının (*Merluccius merluccius*) korunmasında arıtılmış ve ozonlanmış su, yıkama suyunda ve pelet buz üretiminde kullanılmış, balıklar teknede buzlu kutularda soğuk depoda (3 °C) limana ulaşincaya kadar (18 gün), kıyıya çıktıktan sonra da 2 °C'de 12 gün tutulmuştur. Bu şekilde mezgit balıklarının işlenmesinin geleneksel muhafaza (Deniz suyu ve buz) yönteminden daha etkili olduğu belirtilmiş olup, balıkların avlanma anından itibaren bu şekilde işlenmesinin, satış noktalarında daha yüksek ticari değerde pazarlanabileceği ve daha uzun raf ömrüne sahip olacağı belirtilmiştir (Pastoriza vd., 2008).

Nil tilapisi bazı kokulardan dolayı tüketicilerce bu türden üretilen ürünlerin reddedilmesine neden olabilir. Bunun için güçlü oksitleyici özelliğe sahip, kalıntı bırakmayan güvenli kullanılabilirliği olan ozonun *O. niloticus* kıymasına uygulandığı bir çalışmada, ozon uygulamasının kıymadaki yağ ve protein içeriğinde hafif bir etkiye neden olduğu ifade edilmiş, 30 dakikalık ozon flotasyon uygulamasının balık kaynaklı kötü kokuyu ideal olarak azalttığı saptanmıştır (Phermthong vd., 2021).

6. SONUÇ

Sağlıklı ve güvenilir gıdaya ulaşabilmek tüketicilerin, bu ürünleri üretmekte sektörün önemseddiği konular arasındadır. Ozon, çevre dostu bir dezenfektan olup birçok alanda kullanılmaktadır. Su ürünleri endüstrisinde ozonun kullanımı özellikle de mikroorganizmaların giderilmesinde güçlü bir dezenfektan olması ve en önemlilerinden biri de uygulama sonrasında kalıntı bırakmamasıyla dikkat çekmiş ve geçtikçe yaygınlaş-

mıştır. Ozonun kullanılmasında dikkate alınması gerekenler arasında; ozon konsantrasyonu, uygulamanın yapıldığı malzemenin türü, çevre koşulları, mikroorganizmalar, üründe bulunan kirleticiler dikkate alınması gerekenler olarak sıralanabilir (Dubey vd., 2022). Ozonun farklı teknolojilerle birlikte uygulanabilirliğiyle elde edilen sonucun daha etkili olabileceği çıkarımı yapılabilir. Elde edilen bilgiler ışığında ozon uygulamasının ürün bazında değerlendirilerek, sektör için yol gösterebilecek optimizasyon çalışmalarının yapılması ozonun daha etkili kullanımına olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Agustini, T. W., Nur, M., & Kusdiyantini, E. (2017). Application of ozone-slurry ice combined system for maintaining the freshness of red tilapia and short-bodied mackerel during cold storage. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20(2), 424-431.
- Anchang, M. M., Hassani, M. I., Okoyeuzu, C. F., Karimidastjerd, A., Bono, G., & Okpala, C. O. R. (2025). Ozone treatment and quality control of shrimp. In *Postharvest Technologies and Quality Control of Shrimp*. Academic Press.
- Aponte, M., Anastasio, A., Marrone, R., Mercogliano, R., Peruzy, M. F., & Murru, N. (2018). Impact of gaseous ozone coupled to passive refrigeration system to maximize shelf-life and quality of four different fresh fish products. *LWT - Food Science and Technology*, 93, 412-419.
- Blogoslawski, W. J., & Stewart, M. E. (2011). Some ozone applications in seafood. *Ozone: Science & Engineering*, 33(5), 368-373.
- Bono, G., & Badalucco, C. (2012). Combining ozone and modified atmosphere packaging (MAP) to maximize shelf-life and quality of striped red mullet (*Mullus surmuletus*). *LWT - Food Science and Technology*, 47(2), 500-504.
- Brodowska, A. J., Nowak, A., & Śmigielski, K. (2018). Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2176-2201.
- Campos, C. A., Losada, V., Rodríguez, Ó., Aubourg, S. P., & Barros-Velázquez, J. (2006). Evaluation of an ozone-slurry ice combined refrigeration system for the storage of farmed turbot (*Psetta maxima*). *Food Chemistry*, 97(2), 223-230.
- Chen, J., Huang, J., Deng, S., & Huang, Y. (2016). Combining ozone and slurry ice to maximize shelf-life and quality of bighead croaker (*Collichthys niveatus*). *Journal of Food Science and Technology*, 53(10), 3651-3660.
- Crowe, K. M., Skonberg, D., Bushway, A., & Baxter, S. (2012). Application of ozone sprays as a strategy to improve the microbial safety and quality of salmon fillets. *Food Control*, 25(2), 464-468.
- da Silva, L. M. D., Santana, M. H., & Boodts, J. F. (2003). Electrochemistry and green chemical processes: electrochemical ozone production. *Química Nova*, 26, 880-888.
- Dehkordi, B. M., & Zokaie, N. (2010). Extension of fish shelf life by ozone treatment. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 62, 150-152.
- de Mendonça Silva, A. M., & Gonçalves, A. A. (2017). Effect of aqueous ozone on microbial and physicochemical quality of Nile tilapia processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), e13298.
- Dinh-Hung, N., Dong, H. T., Senapin, S., Shinn, A. P., Linh, N. V., Dien, L. T., Soontara, C., Hirano, I., Chatchaiphan, S., & Rodkhum, C. (2024). Using

- ozone nanobubbles to mitigate the risk of mycobacteriosis in Siamese fighting fish (*Betta splendens*). *Aquaculture*, 581, 740390.
- Dubey, P., Singh, A., & Yousuf, O. (2022). Ozonation: An evolving disinfectant technology for the food industry. *Food and Bioprocess Technology*, 15(9), 2102-2113.
- Gelman, A., Sachs, O., Khanin, Y., Drabkin, V., & Glatman, L. (2005). Effect of ozone pretreatment on fish storage life at low temperatures. *Journal of Food Protection*, 68(4), 778-784.
- Giménez, B., Zaritzky, N., & Graiver, N. (2024). Ozone treatment of meat and meat products: A review. *Frontiers in Food Science and Technology*, 4, 1351801.
- Gonçalves, A. A. (2009). Ozone: an emerging technology for the seafood industry. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 52, 1527-1539.
- Guzel-Seydim, Z. B., Greene, A. K., & Seydim, A. C. (2004). Use of ozone in the food industry. *LWT-Food Science and Technology*, 37(4), 453-460.
- Horvitz, S., & Cantalejo, M. J. (2014). Application of ozone for the postharvest treatment of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(3), 312-339.
- Jhunkeaw, C., Khongcharoen, N., Rungrueng, N., Sangpo, P., Panphut, W., Thapinta, A., Senapin, S., St-Hilaire, S., & Dong, H. T. (2021). Ozone nanobubble treatment in freshwater effectively reduced pathogenic fish bacteria and is safe for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 534, 736286.
- Ekici, L., Sağdıç, O., & Kesmen, Z. (2006). Gıda endüstrisinde alternatif bir dezenfektan: ozon. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1(1), 47-57.
- Kim, J. G., Yousef, A. E., & Khadre, M. A. (2003). Ozone and its current and future application in the food industry. *Advances in Food and Nutrition Research*, 45, 167-218.
- Kuşçu, A., & Pazır, F. (2004). Gıda endüstrisinde ozon uygulamaları. *Gıda*, 29(2), 123-129.
- Li, Y., Zhang, L., He, Y., Zhang, L., Liu, X., & Shang, N. (2025). Effect of UV-Ozone disinfection on the quality of Northern shrimp (*Pandalus borealis*) under sudden state of cold chain transportation. *Food and Bioprocess Technology*, 150, 285-295.
- Lin, C. M., Herianto, S., Hsieh, C. W., Shih, M. K., Ciou, J. Y., Huang, J. C., Liu, T.T., Chen, H.L., & Hou, C. Y. (2023). Coupling ozone with microbubbles (OMB) water for food disinfection: Effects on microbiological safety, physicochemical quality, and reducing pink discoloration of jumbo squid (*Dosidicus gigas*). *Journal of Cleaner Production*, 418, 138036.
- Ling, Y., Zhou, M., Qiao, Y., Xiong, G., Wei, L., Wang, L., Wu, W., Shi, L., Ding, A., & Li, X. (2022). Effects of ozone water combined with ultra-high pressure on quality and microorganism of catfish fillets (*Lctalurus punctatus*) during refrigeration. *Frontiers in Nutrition*, 9, 880370.

- Mottan, S., Gupta, N., Sood, M., Bandral, J. D., & Anju Bhat, J. S. (2022). A review on ozone technology in food industry. *The Pharma Innovation Journal*, 11(6), 759-764.
- Naito, S., & Takahara, H. (2006). Ozone contribution in food industry in Japan. *Ozone: Science and Engineering*, 28(6), 425-429.
- Nur, M., Firdausi, K. S., Susan, A. I., Kinandana, A. W., & Arianto, F. (2018). Study of energy saving for fish preservation by refrigeration systembased on ozone technology. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(3), 873-881.
- Okpala, C. O. R., Bono, G., Abdulkadir, A., & Madumelu, C. U. (2015). Ozone (O₃) process technology (OPT): An exploratory brief of minimal ozone discharge applied to shrimp product. *Energy Procedia*, 75, 2427-2435.
- Okpala, C. O. R. (2015). Quality evaluation and shelf life of minimal ozone-treated Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) stored on ice. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 10(1), 49-57.
- Okpala, C. O. R. (2016). Lipid autoxidation in ozone-processed crustacea under cold storage: A treatise. *Lipid Technology*, 28(5-6), 93-95.
- Pandiselvam, R., Subhashini, S., Banuu Priya, E. P., Kothakota, A., Ramesh, S. V., & Shahir, S. (2019). Ozone based food preservation: A promising green technology for enhanced food safety. *Ozone: Science & Engineering*, 41(1), 17-34.
- Parray, J. A., Mir, M. Y., Shafi, N., & Haghi, A. K. (2025). Ozone Technology for Food Processing and Preservation. Springer.
- Pascual, A., Llorca, I., & Canut, A. (2007). Use of ozone in food industries for reducing the environmental impact of cleaning and disinfection activities. *Trends in Food Science & Technology*, 18, 29-35.
- Pastoriza, L., Bernárdez, M., Sampedro, G., Cabo, M. L., & Herrera, J. J. (2008). Use of sterile and ozonized water as a strategy to stabilize the quality of stored refrigerated fresh fish. *Food Control*, 19(8), 772-780.
- Phermthong, P., Worawattanamateekul, W., & Hinsui, J. (2021). Effect of ozone treatments on Nile tilapia mince (*Oreochromis niloticus*) off-odor. *Recent Science and Technology*, 13(1), 85-94.
- Perry, J. J., & Yousef, A. E. (2011). Decontamination of raw foods using ozone-based sanitization techniques. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2(1), 281-298.
- Powell, A., & Scolding, J. W. (2018). Direct application of ozone in aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture*, 10(2), 424-438.
- Qian, Y. F., Zhang, J. J., Liu, C. C., Ertbjerg, P., & Yang, S. P. (2022). Effects of gaseous ozone treatment on the quality and microbial community of salmon (*Salmo salar*) during cold storage. *Food Control*, 142, 109217.
- Qian, Y. F., Sun, L., Zhang, J. J., Shi, C. J., & Yang, S. P. (2024). Effects of ozone gas and slightly acidic electrolyzed water on the quality of salmon (*Salmo salar*) fillets from the perspective of muscle protein. *Foods*, 13(23), 3833.

- Rong, C., Qi, L., Bang-Zhong, Y., & Lan-lan, Z. (2010). Combined effect of ozonated water and chitosan on the shelf-life of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(1), 108-112.
- Saqib, M., Ali, S., Bashir, S., Azhar, U., Arif, M., Khalid, M., Ghulam, M.K., & Murtaza, S. (2024). Applications of ozone in marine and freshwater systems. In *Advances and Technology Development in Greenhouse Gases: Emission, Capture and Conversion*. Elsevier.
- Sivrioğlu, Ö. (2016). Yeni elektrokatalistlerle elektrokimyasal ozon üretimi ve uygulamalarının araştırılması. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Spiliotopoulou, A., Rojas-Tirado, P., Chhetri, R. K., Kaarsholm, K. M., Martin, R., Pedersen, P. B., Pedersen, L.M & Andersen, H. R. (2018). Ozonation control and effects of ozone on water quality in recirculating aquaculture systems. *Water Research*, 133, 289-298.
- Sopher, C. D., Graham, D. M., Rice, R. G., & Strasser, J. H. (2002). Studies on the use of ozone in production agriculture and food processing. *Proceedings of the International Ozone Association, Pan American Group*.
- Sopher, C. D., Battles, G. T., & Knueve, E. A. (2007). Ozone applications in catfish processing. *Ozone: Science and Engineering*, 29(3), 221-228.
- Sujayasree, O. J., Chaitanya, A. K., Bhoite, R., Pandiselvam, R., Kothakota, A., Gavahian, M., & Mousavi Khaneghah, A. (2022). Ozone: An advanced oxidation technology to enhance sustainable food consumption through mycotoxin degradation. *Ozone: Science & Engineering*, 44(1), 17-37.
- Zhang, T., Xue, Y., Li, Z., Wang, Y., Yang, W., & Xue, C. (2016). Effects of ozone on the removal of geosmin and the physicochemical properties of fish meat from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 16-23.
- Zhang, K., Liu, J., Lv, H., Zeng, X., Ling, Z., Ding, L., & Jin, C. (2025). Advances in ozone technology for environmental, energy, food and medical applications. *Processes*, 13(4), 1126.
- Zhao, Y., Lan, W., Shen, J., Xu, Z., & Xie, J. (2022). Combining ozone and slurry ice treatment to prolong the shelf-life and quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*). *LWT - Food Science and Technology*, 154, 112615.

Bölüm 15

JEOTERMAL SU KULLANARAK SPİRULİNA (*ARTHROSPIRA SPP.*) YETİŞTİRİCİLİĞİ: POTANSİYEL, YÖNTEMLER VE ENTEGRASYON MODELLERİ

Betül GÜROY¹, Derya GÜROY²

¹ Department of Food Processing, Armutlu Vocational School, Yalova University, Yalova, Türkiye, ORCID ID:0000-0002-4298-6256

² Department of Food Processing, Armutlu Vocational School, Yalova University, Yalova, Türkiye, ORCID ID:0000-0002-8254-1403

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, nüfus artışı ve su ile enerji kaynaklarının kıtlığı, gıda ve biyokütle üretim sistemlerinin sadece verim odaklı olmaktan çıkarılıp çevresel sürdürülebilirlik, kaynak kullanımı ve ekonomik dayanıklılık açısından yeniden ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşüm arayışında mikroalgler, özellikle de *Spirulina* olarak bilinen *Arthrospira* türleri, yüksek biyokütle verimi, zengin besin içeriği ve esnek yetiştirme koşulları sayesinde son yıllarda küresel ölçekte artan bir ilgi odağı hâline gelmiştir (Borowitzka, 2013; Becker, 2019).

Spirulina, yüksek protein içeriği, esansiyel amino asit profili, fikosiyanın gibi değerli pigmentleri ve antioksidan kapasitesi sayesinde gıda, yem, nutrasötik ve kozmetik sektörlerinde stratejik bir biyokaynak olarak değerlendirilmektedir (Habib et al., 2008; Lafarga, 2019). Bununla birlikte, geleneksel *Spirulina* üretim sistemleri genellikle yüksek enerji girdisine, tatlı su kullanımına ve kontrollü çevresel koşullara dayanmaktadır. Bu durum, özellikle artan enerji maliyetleri ve su kıtlığı bağlamında, üretimin çevresel ayak izini ve ekonomik sürdürülebilirliğini sınırlandıran temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Chisti, 2007; Acien et al., 2017).

Bu noktada, jeotermal suların mikroalg yetiştiriciliğinde alternatif bir kaynak olarak değerlendirilmesi, hem enerji hem de su kullanımına ilişkin yapısal sorunlara yenilikçi bir çözüm potansiyeli sunmaktadır. Jeotermal kaynaklar, yıl boyunca görece sabit sıcaklıkları, sürekli debileri ve yerel erişilebilirlikleri sayesinde, mikroalg üretiminde özellikle ısıtma ihtiyacını azaltan stratejik bir avantaj sağlamaktadır (Lund & Boyd, 2016; Kaya et al., 2020). Türkiye gibi jeotermal potansiyeli yüksek ülkelerde, bu kaynakların biyoteknolojik üretim sistemleriyle entegrasyonu, yalnızca teknik bir tercih değil; aynı zamanda bölgesel kalkınma, enerji verimliliği ve döngüsel ekonomi açısından da kritik bir fırsat alanı olarak değerlendirilmektedir.

Jeotermal suların *Spirulina* yetiştiriciliğinde kullanımı, klasik tatlı su temelli üretim paradigmalarını dönüştürme potansiyeline sahiptir. *Arthrospira* türlerinin doğası gereği alkaline koşullara ve görece yüksek sıcaklıklara toleranslı olması, jeotermal kaynakların sunduğu fiziksel koşullarla önemli ölçüde örtüşmektedir (Vonshak, 1997; Richmond, 2004). Bu biyolojik uyum, jeotermal suyun doğrudan veya kontrollü seyreltme ve ön arıtma süreçleriyle kullanılması hâlinde, sürdürülebilir ve düşük maliyetli üretim sistemlerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Ancak jeotermal suyun mikroalg yetiştiriciliğinde kullanımı, yalnızca sıcaklık avantajı üzerinden ele alınamayacak kadar çok boyutlu bir konudur. Jeotermal suların kimyasal bileşimi çözünmüş mineraller ve iz

elementler açısından zengindir; ancak bazen toksik olabilecek maddeler de içerebilir. Bu nedenle kültür ortamını yönetirken jeotermal su kullanımını dikkatle değerlendirmek gerekir (Küçük & Demir, 2018; Eroğlu et al., 2021). Bu nedenle jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliği, biyoloji, kimya, çevre mühendisliği ve üretim teknolojilerinin kesişiminde yer alan disiplinlerarası bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır.

mikroalglerin atık su, deniz suyu veya endüstriyel yan ürün akımlarıyla yetiştirilmesi üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Markou & Georgakakis, 2011; Khan et al., 2018). Buna karşın jeotermal su kullanılarak yapılan mikroalg yetiştiriciliği ise henüz oldukça az sayıda uygulama ve vaka çalışması ile temsil edilmektedir. Bu durum, jeotermal kaynakların mikroalg biyoteknolojisindeki rolünün yeterince sistematik ve bütüncül biçimde ele alınmadığını göstermektedir. Oysa doğru planlandığında jeotermal enerji ile mikroalg yetiştiriciliğinin entegrasyonu yenilikçi bir üretim modeli sunabilir. Bu model, enerji girdisini azaltır, yıl boyu kesintisiz üretim sağlar ve karbon ayak izini ciddi oranda düşürür (IEA, 2023).

Spirulina'nın jeotermal suda yetiştirilmesi, yalnızca bir üretim tekniği değil; aynı zamanda iklim dostu biyokütle üretimi, yerel kaynakların katma değere dönüştürülmesi ve biyoteknolojik çeşitliliğin artırılması açısından stratejik bir yaklaşımdır. Mikroalglerin fotosentetik karbon tutma kapasitesi, jeotermal enerji ile desteklenen üretim sistemleriyle birleştirildiğinde, düşük karbonlu biyoproseslerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır (IPCC, 2022; Chiaramonti et al., 2023). Bu yönüyle *Spirulina*, yalnızca besinsel değil; aynı zamanda çevresel ve ekonomik bir değer zincirinin merkezinde konumlanmaktadır.

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, Ege ve Marmara başta olmak üzere birçok bölgede bulunan jeotermal kaynakların önemli bir bölümü hâlen enerji üretimi, seracılık veya balneolojik amaçlarla kullanılmaktadır. Mikroalg yetiştiriciliği ise bu kaynaklar için henüz yeterince yaygınlaşmamış bir kullanım alanıdır (Mertoglu et al., 2020). Oysa jeotermal altyapısının mevcut olduğu bölgelerde *Spirulina* üretiminin entegrasyonu, hem mevcut tesislerin çok amaçlı kullanımını mümkün kılmakta hem de yerel biyoteknoloji ekosistemlerinin gelişimine katkı sağlamaktadır.

Bu kitap bölümünün amacı, jeotermal suda *Spirulina* yetiştiriciliğini bilimsel temelleri, teknik uygulamaları, çevresel ve ekonomik boyutlarıyla bütüncül bir çerçevede ele almak ve alandaki bilgi boşluklarını sistematik biçimde ortaya koymaktır. Bölüm, yalnızca akademik literatüre katkı sunmayı değil; aynı zamanda araştırmacılar, sektör temsilcileri, yatırımcılar ve politika yapıcılar için yol gösterici bir referans metin oluşturmayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda, *Spirulina*'nın biyolojik özelliklerinden

jeotermal suyun kimyasal karakterizasyonuna, yetiştirme sistemlerinden sürdürülebilirlik değerlendirmelerine kadar geniş bir perspektif sunulmaktadır.

Bu bağlamda, jeotermal suda *Spirulina* yetiştiriciliği, klasik mikroalg üretim modellerinin ötesine geçen; enerji, su ve biyokütle ilişkisini yeniden tanımlayan yenilikçi bir üretim paradigmasıdır. Bu yaklaşım, yalnızca bugünün üretim ihtiyaçlarına değil; aynı zamanda iklim değişikliğiyle şekillenen geleceğin biyoteknolojik çözümlerine de yanıt verme potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle, jeotermal *Spirulina* sistemlerinin bilimsel ve uygulamalı boyutlarıyla ele alınması, sürdürülebilir biyoproduksiyonun geleceği açısından kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

2. SPIRULINA'NIN (*ARTHROSPIRA* spp.) BİYOLOJİK VE EKO-FİZYOLOJİK TEMELLERİ

Spirulina ticari adıyla bilinen *Arthrospira* türleri, fotosentetik prokaryotlar içinde hem biyolojik özellikleri hem de üretim potansiyeli açısından ayrıcalıklı bir konuma sahiptir. Taksonomik olarak siyanobakteriler (Cyanophyta, mavi-yeşil alg) içerisinde yer alan bu organizmalar, evrimsel olarak erken dönemde ortaya çıkmış olmalarına rağmen, günümüz çevresel koşullarına yüksek düzeyde uyum gösterebilen metabolik esnekliğe sahiptir (Whitton & Potts, 2012). Bu özellikleri, *Arthrospira*'yı özellikle ekstrem veya yarı-ekstrem koşullara sahip üretim ortamları için güçlü bir aday hâline getirmektedir.

Jeotermal suda *Spirulina* yetiştiriciliğinin bilimsel olarak değerlendirilebilmesi için, bu organizmanın hücresel yapısı, metabolik yolları ve çevresel faktörlere verdiği fizyolojik yanıtların bütüncül biçimde anlaşılması gerekmektedir. Bu bölümde, *Arthrospira*'nın biyolojik temelleri, ekofizyolojik toleransları ve jeotermal koşullarla ilişkili adaptasyon potansiyeli ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

2.1. Taksonomi ve Sistematik Konum

Uzun yıllar boyunca *Spirulina* cinsi altında değerlendirilen türler, filogenetik ve morfolojik çalışmalar sonucunda *Arthrospira* cinsi altında yeniden sınıflandırılmıştır. Günümüzde ticari üretimde yaygın olarak kullanılan türler başta *Arthrospira platensis* ve *Arthrospira maxima* olmak üzere birkaç taksonla sınırlıdır (Castenholz, 2001; Komárek & Anagnostidis, 2005).

Bu organizmalar, helikal yapılı, çok hücreli (filamentöz) trikromlardan oluşur ve bu morfolojik yapı, ışık yakalama yüzeyini artırarak fotosentetik verimliliğe katkı sağlar. Hücrelerin spiral formu, kültür ortamındaki

ışık–karanlık döngülerini optimize eden mikroskobik bir hareket avantajı sunmaktadır (Vonshak, 1997). Bu özellik, özellikle yüksek ışık yoğunluklarında fotoinhibisyon riskinin azaltılması açısından önemlidir.

2.2. Hücresel Yapı ve Metabolik Özellikler

Arthrospira hücreleri tipik bir siyanobakteriyel organizasyona sahiptir: belirgin bir çekirdek zarı bulunmaz, DNA nükleoid bölgede yer alır ve fotosentetik membranlar sitoplazma boyunca dağılmıştır. Fotosentez, klorofil-a ve yardımcı pigmentler (fikobiliproteinler) aracılığıyla gerçekleştirilir (Grossman et al., 1993).

Fikosiyanın, *Arthrospira*'nın karakteristik pigmentlerinden biri olup, yalnızca fotosentetik bir işlev görmekle kalmaz; aynı zamanda güçlü antioksidan ve antiinflamatuvar özellikleri sayesinde yüksek ticari değere sahiptir (Patel et al., 2018). Jeotermal koşullarda yetiştirilen *Spirulina* kültürlerinde pigment sentezinin, sıcaklık ve ışık etkileşimiyle önemli ölçüde değişebildiği bildirilmektedir (Pandey et al., 2013).

Metabolik açıdan *Arthrospira*, karbon, azot ve fosfor metabolizmasında yüksek esnekliğe sahiptir. Özellikle bikarbonat (HCO_3^-) kullanımına dayalı karbon yoğunlaştırma mekanizmaları (CCM), alkalın ortamlarda bile yüksek fotosentetik verimliliğin sürdürülmesini mümkün kılmaktadır (Badger et al., 2006). Bu özellik, jeotermal suların çoğunlukla alkalın karakteriyle biyolojik bir uyum göstermektedir.

2.3. Işık Gereksinimleri ve Fotosentetik Yanıtlar

Spirulina, orta–yüksek ışık yoğunluklarında optimum büyüme gösteren bir fototrof olarak tanımlanmaktadır. Ancak, yüksek ışık koşullarında fotoinhibisyon riski mevcuttur ve bu durum pigment kompozisyonunda ve fotosistem II aktivitesinde değişimlere yol açabilmektedir (Vonshak et al., 2001).

Jeotermal sistemlerde yıl boyunca nispeten sabit sıcaklıkların sağlanması, ışık–sıcaklık etkileşiminin daha öngörülebilir hâle gelmesine olanak tanır. Bu durum, özellikle açık veya yarı–açık sistemlerde fotosentetik verimliliğin mevsimsel dalgalanmalardan daha az etkilenmesini sağlayabilir (Acién et al., 2017).

2.4. Sıcaklık Toleransı ve Termofilik Eğilimler

Arthrospira türleri, birçok tatlı su mikroalgine kıyasla daha geniş bir sıcaklık tolerans aralığına sahiptir. Optimum büyüme genellikle 30–35 °C arasında rapor edilmekle birlikte, bazı suşların 38–40 °C'ye kadar bü-

yümeyi sürdürebildiği gösterilmiştir (Richmond, 2004; Converti et al., 2009).

Bu termotolerans, jeotermal su temelli sistemlerde *Spirulina*'yı öne çıkaran temel biyolojik özelliklerden biridir. Yüksek sıcaklık koşullarında hücresel proteinlerin stabilitesinin korunması, ısı şok proteinleri (HSP'ler) ve membran lipid kompozisyonundaki adaptif değişimlerle ilişkilidir (Singh et al., 2008). Bu mekanizmalar, jeotermal kaynaklı sıcaklık dalgalanmalarına karşı biyolojik dayanıklılığı artırmaktadır.

2.5. pH ve Alkaliniteye Adaptasyon

Spirulina, pH 8.5–11 aralığında optimum büyüme gösteren alkalifilik bir organizmadır. Bu özellik, birçok rakip mikroorganizmanın gelişimini baskılayarak kültürlerin biyogüvenliğini artırmaktadır (Vonshak, 1997). Jeotermal suların önemli bir bölümü doğal olarak alkaline karakter gösterdiğinden, bu durum *Spirulina* yetiştiriciliği için ek bir avantaj oluşturmaktadır.

Yüksek alkalinite, karbonun bikarbonat formunda tutulmasını kolaylaştırarak fotosentetik karbon alımını destekler. Bu durum, hem biyokütle verimini hem de protein sentezini olumlu yönde etkileyebilmektedir (Markou et al., 2012).

2.6. Besin Elementleri ve Mineral Metabolizması

Arthrospira'nın büyümesi için azot, fosfor, kükürt, demir ve çeşitli iz elementler gereklidir. Jeotermal sular, çoğu zaman bu elementlerin bir kısmını doğal olarak içermekte; ancak konsantrasyonlar kültür için her zaman dengeli olmayabilmektedir (Küçük & Demir, 2018).

Bu nedenle jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde, suyun kimyasal bileşimi biyolojik bir avantaj olduğu kadar, potansiyel bir sınırlayıcı faktör olarak da değerlendirilmelidir. Mineral dengesizlikleri, pigment sentezi, protein oranı ve büyüme kinetiği üzerinde doğrudan etkilidir (Becker, 2019).

2.7. Ekofizyolojik Esneklik ve Stres Yanıtları

Spirulina, ışık, sıcaklık, tuzluluk ve besin stresi gibi çevresel değişkenlere karşı hızlı fizyolojik yanıtlar geliştirebilen bir organizmadır. Stres koşullarında pigment kompozisyonunda değişim, karbon–azot dengesinin yeniden düzenlenmesi ve hücresel antioksidan savunma mekanizmalarının aktivasyonu gözlenmektedir (Colla et al., 2007).

Jeotermal sistemlerde bu ekofizyolojik esneklik, kültür yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Kontrollü stres uygulamaları, örneğin hafif sıcaklık artışı veya besin sınırlaması, belirli metabolitlerin (fikosiyanın, fenolik bileşikler) artırılmasında stratejik olarak kullanılabilir (Lafarga, 2019).

2.8. Jeotermal Koşullara Uyum Potansiyeli

Tüm bu biyolojik ve fizyolojik özellikler birlikte değerlendirildiğinde, *Spirulina*'nın jeotermal suda yetiştiricilik için biyolojik olarak güçlü bir aday olduğu görülmektedir. Termotolerans, alkalifilik yapı ve metabolik esneklik, jeotermal kaynakların sunduğu fiziksel ve kimyasal koşullarla önemli ölçüde örtüşmektedir.

Ancak bu uyum, otomatik ve risksiz bir süreç olarak değerlendirilmemelidir. Jeotermal suların özgün kimyasal profili, her saha için ayrı ayrı değerlendirilmesi gereken biyolojik yanıtlar doğurabilmektedir. Bu nedenle, *Spirulina*'nın biyolojisini merkeze alan bilimsel bir yaklaşım, jeotermal alg yetiştiriciliğinin başarısı için vazgeçilmezdir.

3. JEOTERMAL SULARIN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ: *SPIRULINA* YETİŞTİRİCİLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRME

Jeotermal sular, yer kabuğunun derinliklerinde ısınarak yüzeye çıkan ve özgün fiziksel-kimyasal karakteristikler taşıyan doğal kaynaklardır. Bu sular, enerji üretimi ve seracılık gibi alanlarda uzun süredir kullanılmakla birlikte, mikroalg biyoteknolojisi açısından hâlen görece yeni ve gelişmekte olan bir uygulama alanı sunmaktadır (Lund & Boyd, 2016; Mertoglu et al., 2020). *Spirulina* (*Arthrospira* spp.) yetiştiriciliğinde jeotermal suların değerlendirilmesi, klasik tatlı su temelli üretim anlayışının ötesine geçerek, üretim sistemlerini daha enerji verimli, sürdürülebilir ve yerel kaynaklara dayalı hâle getirme potansiyeli taşımaktadır.

Ancak jeotermal suların alg yetiştiriciliğinde kullanılabilirliği, yalnızca sıcaklık avantajı üzerinden değerlendirilemez. Bu suların fiziksel parametreleri (sıcaklık, debi, stabilite) ile kimyasal bileşimi (tuzluluk, alkalinite, çözünmüş mineraller ve iz elementler), kültür performansı ve ürün kalitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliği, kaynağa özgü ve bilimsel temelli bir değerlendirme yaklaşımını zorunlu kılar.

3.1. Jeotermal Suların Kökeni ve Sınıflandırılması

Jeotermal sular, jeolojik yapı, rezervuar derinliği ve kayaç bileşimine bağlı olarak farklı sıcaklık ve kimyasal özellikler gösterir. Genel olarak düşük entalpili ($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$), orta entalpili ($90\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve yüksek entalpili ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) kaynaklar olarak sınıflandırılırlar (Dickson & Fanelli, 2004).

Spirulina yetiştiriciliği açısından özellikle düşük ve orta entalpili jeotermal sular ön plana çıkmaktadır. Bu kaynaklar, mikroalglerin biyolojik tolerans sınırlarını aşmadan kültür ortamının ısıtılmasını mümkün kılmakta; aynı zamanda sürekli ve öngörülebilir bir ısı girdisi sağlamaktadır (Lund & Boyd, 2016). Türkiye’de yaygın olan jeotermal kaynakların önemli bir bölümü bu sınıfa girmektedir (Mertoglu et al., 2020).

3.2. Fiziksel Özellikler: Sıcaklık, Debi ve Süreklilik

3.2.1. Sıcaklık Profili

Jeotermal suların en belirgin fiziksel özelliği, yıl boyunca görece sabit sıcaklıklara sahip olmalarıdır. Bu durum, mikroalg yetiştiriciliğinde en yüksek enerji maliyetlerinden biri olan ısıtma gereksinimini büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır (Chisti, 2007).

Spirulina için optimum sıcaklık aralığının $30\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu dikkate alındığında, jeotermal suyun doğrudan veya karıştırılarak kullanımı, kültür sıcaklığının mevsimsel dalgalanmalardan bağımsız olarak kontrol edilmesini mümkün kılar (Richmond, 2004). Bu özellik, özellikle açık ve yarı-açık sistemlerde üretim sürekliliği açısından stratejik öneme sahiptir.

3.2.2. Debi ve Hidrolik Stabilité

Jeotermal kaynakların sabit veya kontrollü debi sunabilmesi, sürekli üretim sistemleri için önemli bir avantajdır. Ancak debi dalgalanmaları, kültür hacmi, seyreltme oranları ve besin konsantrasyonları üzerinde doğrudan etki yaratabilir. Bu nedenle jeotermal *Spirulina* sistemlerinde, debi yönetimi mühendislik tasarımının ayrılmaz bir parçası olarak ele alınmalıdır (Acién et al., 2017).

3.3. Kimyasal Bileşim: Alkalinite, Tuzluluk ve İyonik Yapı

Jeotermal suların kimyasal bileşimi, yetiştiricilik açısından hem fırsatlar hem de riskler barındırır. Birçok jeotermal kaynak doğal olarak alkalın karakter göstermekte ve yüksek bikarbonat konsantrasyonlarına sahip olabilmektedir. Bu durum, *Spirulina*’nın alkalifilik yapısı ile biyolojik bir uyum sergiler (Vonshak, 1997).

Ancak yüksek çözünmüş katı madde (TDS) ve iyonik yük, ozmotik stres yaratma potansiyeline sahiptir. Özellikle sodyum, klorür ve sülfat iyonlarının yüksek konsantrasyonları, hücresel iyon dengesini ve büyüme kinetiğini olumsuz etkileyebilir (Markou & Georgakakis, 2011). Bu nedenle tuzluluk ve iletkenlik, jeotermal *Spirulina* sistemlerinde düzenli olarak izlenmesi gereken temel parametreler arasında yer alır.

3.4. Makro ve Mikro Elementler

Jeotermal sular; demir, magnezyum, kalsiyum, potasyum ve bazı iz elementler bakımından zengin olabilir. Bu elementlerin bir kısmı mikroalg metabolizması için esansiyel olmakla birlikte, konsantrasyonların biyolojik tolerans sınırlarını aşması durumunda toksisite riski ortaya çıkmaktadır (Becker, 2019).

Özellikle demir, *Spirulina*'da klorofil ve fikobiliprotein sentezi için kritik bir mikro elementtir. Jeotermal sularda bulunan biyoyararlanabilir demir formları, uygun koşullarda pigment üretimini destekleyebilir; ancak aşırı demir konsantrasyonları oksidatif strese yol açabilmektedir (Pandey et al., 2013).

3.5. Potansiyel Toksik Bileşenler ve Risk Yönetimi

Bazı jeotermal kaynaklar arsenik, bor, florür ve ağır metaller gibi potansiyel olarak toksik elementler içerebilir. Bu bileşenler, düşük konsantrasyonlarda dahi biyokütlede birikme riski taşıdığından, özellikle gıda ve yem amaçlı *Spirulina* yetiştiriciliğinde kritik bir kalite ve güvenlik sorunu oluşturur (Eroğlu et al., 2021).

Bu nedenle jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde **ön arıtma, seyreltme ve sürekli kimyasal izleme** vazgeçilmez uygulamalar olarak değerlendirilmelidir. Kaynağa özgü risk analizleri, üretim sisteminin tasarım aşamasında yapılmalı ve izleme-raporlama süreçleriyle desteklenmelidir.

3.6. Jeotermal Suyun Ön Arıtma ve Seyreltme Stratejileri

Jeotermal suların doğrudan kullanımı her zaman mümkün olmayabilir. Bu durumda, mekanik filtrasyon, çöktürme, pH ayarlaması ve seyreltme gibi ön işlemler devreye girer. Bu stratejiler, suyun biyolojik olarak daha uygun hâle getirilmesini sağlarken, kültür performansını ve ürün kalitesini güvence altına alır (Acién et al., 2017).

Özellikle tatlı su veya geri kazanılmış proses suları ile kontrollü seyreltme, jeotermal suyun avantajlarını korurken riskleri minimize eden pratik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

3.7. Jeotermal Sular ve Kültür Stabilitesi

Jeotermal suların kimyasal stabilitesi, uzun dönemli kültürlerin sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Kaynak bileşimindeki mevsimsel veya operasyonel değişimler, kültür performansında ani dalgalanmalara yol açabilir. Bu nedenle jeotermal *Spirulina* sistemleri, statik değil; **adaptif ve izlemeye dayalı** bir yönetim anlayışıyla ele alınmalıdır (Borowitzka, 2013).

3.8. Türkiye Bağlamında Jeotermal Suların Stratejik Önemi

Türkiye, Avrupa'nın en zengin jeotermal potansiyeline sahip ülkelerinden biridir. Bu potansiyelin mikroalg yetiştiriciliğiyle entegrasyonu, yalnızca teknik bir yenilik değil; aynı zamanda yerel biyoteknoloji kapasitesinin geliştirilmesi açısından stratejik bir adımdır (Mertoglu et al., 2020).

Jeotermal *Spirulina* üretimi, bölgesel kalkınma, enerji verimliliği ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir üretim modeli sunmaktadır. Bu yönüyle jeotermal sular, *Spirulina* yetiştiriciliğinde yalnızca bir girdi değil; bütüncül bir sürdürülebilirlik aracıdır.

4. JEOTERMAL SUDA *SPIRULINA* YETİŞTİRİCİLİK SİSTEMLERİ: TASARIM, İŞLETME VE ENTEGRASYON

Jeotermal suda *Spirulina* (*Arthrospira* spp.) yetiştiriciliği, biyolojik uygunluk kadar **sistem tasarımı ve işletme stratejilerinin doğruluğuna** da bağlıdır. Jeotermal suyun sağladığı sürekli ısı girdisi, klasik mikroalg üretim sistemlerinin temel kısıtlarından biri olan enerji ihtiyacını azaltırken; aynı zamanda yetiştiricilik sistemlerinin yeniden tasarlanması gerektiren özgün mühendislik koşulları ortaya koymaktadır (Chisti, 2007; Acién et al., 2017).

Bu bölümde, jeotermal suda *Spirulina* üretiminde kullanılan başlıca yetiştiricilik sistemleri; açık havuzlar, yarı-kapalı sistemler ve kapalı fotobiyoreaktörler çerçevesinde ele alınmakta, jeotermal kaynaklarla entegrasyonun teknik, biyolojik ve operasyonel boyutları tartışılmaktadır.

4.1. Sistem Seçiminde Temel İlkeler

Jeotermal *Spirulina* sistemlerinin tasarımında üç temel ilke öne çıkmaktadır:

1. Isıdan maksimum fayda sağlanması,
2. Kimyasal risklerin biyolojik sınırlar içinde tutulması,

3. Uzun dönemli işletme stabilitesinin sağlanması.

Bu ilkeler, sistemin açık veya kapalı olmasından bağımsız olarak, jeotermal suyun kültür ortamına doğrudan mı yoksa dolaylı mı entegre edileceğini belirleyen temel karar noktalarını oluşturur (Borowitzka, 2013).

4.2. Açık Havuz Sistemleri

4.2.1. Yapısal Özellikler

Açık havuzlar (raceway ponds), *Spirulina* yetiştiriciliğinde en yaygın kullanılan sistemlerdir. Düşük yatırım maliyeti, basit işletme gereksinimleri ve ölçeklenebilirlik avantajları nedeniyle özellikle ticari üretimde tercih edilmektedir (Richmond, 2004).

Jeotermal kaynaklarla entegre edildiğinde, açık havuz sistemleri yıl boyunca optimum sıcaklık aralığında tutulabilmekte; bu da üretim sezonunu uzatarak yıllık biyokütle verimini artırmaktadır (Lund & Boyd, 2016).

4.2.2. Jeotermal Entegrasyon Yaklaşımları

Jeotermal su, açık havuzlara üç temel şekilde entegre edilebilir:

- Doğrudan karıştırma (seyreltme ile),
- Isı değiştiriciler aracılığıyla dolaylı ısıtma,
- Jeotermal suyla ısıtılmış besin ortamı hazırlanması.

Gıda ve yem amaçlı *Spirulina* yetiştiriciliğinde, dolaylı ısıtma veya kontrollü seyreltme en güvenli yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır (Acién et al., 2017).

4.2.3. Avantajlar ve Sınırlamalar

Açık sistemler, jeotermal ısı sayesinde enerji açısından avantajlı olsa da, buharlaşma, kontaminasyon ve çevresel dalgalanmalara açıklık gibi riskler taşır. Jeotermal suların kimyasal bileşimi bu riskleri artırabileceğinden, açık havuz sistemleri iyi tanımlanmış ve düşük riskli kaynaklar için daha uygundur (Markou & Georgakakis, 2011).

4.3. Yarı-Kapalı Sistemler

Yarı-kapalı sistemler, açık havuzların ekonomik avantajları ile kapalı sistemlerin kontrol edilebilirliğini birleştirmeyi amaçlayan ara çözümler

olarak değerlendirilmektedir. Plastik örtüler, sera yapıları veya modüler kapaklı havuzlar bu sınıfa girmektedir (Torzillo et al., 2015).

Jeotermal suda *Spirulina* yetiştiriciliğinde yarı-kapalı sistemler, özellikle **ısı kaybını azaltma ve buharlaşmayı kontrol etme** açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, jeotermal sera entegrasyonları sayesinde mikroiklim koşulları daha stabil hâle getirilebilmektedir.

4.4. Kapalı Fotobiyoreaktör Sistemleri

4.4.1. Tasarım ve İşletme Özellikleri

Kapalı fotobiyoreaktörler (PBR), yüksek kontrol düzeyi, düşük kontaminasyon riski ve tutarlı ürün kalitesi avantajlarıyla karakterize edilir. Tübüler, düz panel veya kolon tipi reaktörler bu sınıfa dâhildir (Borowitzka, 2013).

Jeotermal sistemlerle birlikte kullanıldığında, PBR'ler sıcaklık, pH ve gaz transferinin hassas biçimde yönetilmesine olanak tanır. Bu durum, özellikle yüksek katma değerli ürünlerin (fikosiyenin, biyopigmentler) üretiminde önemlidir (Lafarga, 2019).

4.4.2. Jeotermal Enerji ile Isı Yönetimi

Kapalı sistemlerde jeotermal su genellikle ısı değiştiriciler aracılığıyla kullanılır. Bu yaklaşım, jeotermal suyun kimyasal bileşiminin kültür ortamına doğrudan temas etmesini önleyerek biyogüvenliği artırır (Chisti, 2007).

Ancak kapalı sistemlerin yatırım ve bakım maliyetleri, açık sistemlere kıyasla daha yüksektir. Bu nedenle jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde PBR'ler genellikle Ar-Ge, pilot ölçek veya özel ürün üretimi için tercih edilmektedir.

4.5. Karıştırma, Gaz Transferi ve Hidrodinamikler

Spirulina yetiştiriciliğinde karıştırma, yalnızca besin homojenliği değil; aynı zamanda ışık dağılımı ve gaz transferi açısından da kritik öneme sahiptir. Jeotermal sistemlerde artan sıcaklık, CO₂ çözünürlüğünü etkileyebileceğinden, gaz transferi stratejilerinin dikkatle tasarlanması gerekir (Badger et al., 2006).

Düşük kesme kuvvetleri sağlayan paddle wheel veya hava kaldırmalı sistemler, *Arthrospira*'nın filamentöz yapısının korunması açısından tercih edilmektedir (Vonshak, 1997).

4.6. Ölçek Büyütme ve Modüler Tasarım

Jeotermal *Spirulina* sistemlerinde ölçek büyütme, genellikle modüler yaklaşım ile gerçekleştirilir. Tek bir büyük havuz veya reaktör yerine, birden fazla modül kullanılması; risklerin dağıtılmasını ve işletme esnekliğini artırır (Acién et al., 2017).

Jeotermal kaynakların debi ve sıcaklık kapasitesi, ölçek büyütme stratejisinin sınırlarını belirleyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle sistem tasarımı, biyolojik kapasite kadar kaynak sürdürülebilirliğini de dikkate almalıdır.

4.7. Entegre Sistemler ve Döngüsel Yaklaşımlar

Jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliği, seracılık, akuakültür veya atık ısı geri kazanım sistemleriyle entegre edildiğinde daha yüksek kaynak verimliliği sağlayabilir. Bu tür entegre sistemler, enerji ve besin döngülerinin optimize edilmesine olanak tanır (Chiaramonti et al., 2023).

Bu yaklaşım, *Spirulina* yetiştiriciliğinde yalnızca bağımsız bir biyoproses olarak değil; yerel döngüsel ekonomi modelinin bir bileşeni olarak konumlandırmaktadır.

4.8. Sistem Seçiminin Stratejik Boyutu

Jeotermal suda *Spirulina* yetiştiriciliğinde “en iyi sistem” kavramı, evrensel bir tanıma sahip değildir. Sistem seçimi; ürün hedefi, pazar beklentisi, jeotermal kaynağın özellikleri ve yatırım kapasitesi gibi çok sayıda değişkenin birlikte değerlendirilmesini gerektirir.

Bu nedenle başarılı bir jeotermal *Spirulina* tesisi, biyoloji ve mühendisliği bütünleştiren, adaptif ve izlemeye dayalı bir sistem tasarımına dayanmalıdır.

5. BESİN ORTAMI, SU KALİTESİ VE KÜLTÜR YÖNETİMİ: JEOTERMAL *SPIRULINA* SİSTEMLERİNDE KRİTİK PARAMETRELER

Jeotermal suda *Spirulina* (*Arthrospira* spp.) yetiştiriciliğinin başarısı, sistem tasarımından bağımsız olarak, besin ortamının dengelenmesi, su kalitesinin sürekliliği ve kültür yönetiminin adaptif biçimde yürütülmesine doğrudan bağlıdır. Jeotermal suların özgün kimyasal profili, klasik *Spirulina* yetiştiriciliğinde kullanılan standart ortam reçetelerinin (ör. Zarrouk ortamı) doğrudan uygulanmasını çoğu zaman mümkün kılmamaktadır (Zarrouk, 1966; Vonshak, 1997). Bu nedenle jeotermal sistemlerde besin ve su yönetimi, statik değil; **kaynağa özgü ve izlemeye dayalı** bir yaklaşım gerektirir.

Bu bölümde, jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde besin ortamı bileşimi, temel su kalite parametreleri, izleme–kontrol stratejileri ve uzun dönemli kültür yönetimi bütüncül bir çerçevede ele alınmaktadır.

5.1. Jeotermal Sulara Dayalı Besin Ortamı Yaklaşımı

Geleneksel *Spirulina* yetiştiriciliğinde kullanılan besin ortamları, yüksek alkalinite ve bikarbonat içeriği ile karakterizedir. Jeotermal sular ise çoğu zaman bu gereksinimin bir kısmını doğal olarak karşılayabilmekte, ancak makro ve mikro besin elementleri açısından dengesizlikler gösterebilmektedir (Markou & Georgakakis, 2011). Sera ortamında yapılan bir çalışmada besi ortamının %50'sini jeotermal suyla ikame etmenin *Spirulina* biyokütle verimini en yüksek düzeye çıkardığı (1,324 g/L) raporlanmıştır. Buna karşılık, ortamın tamamı jeotermal su olduğunda verimin 0,624 g/L'ye düştüğü gözlenmiştir (Güroy et al., 2023).

Bu nedenle jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde temel yaklaşım, “tam ortam” yerine “tamamlayıcı ortam” kavramına dayanmaktadır. Başka bir ifadeyle, jeotermal su bir taşıyıcı matris olarak kullanılırken; eksik veya sınırlandırıcı besinler kontrollü biçimde eklenmektedir (Becker, 2019).

5.2. Karbon Kaynağı ve Alkalinite Yönetimi

Spirulina, karbon kaynağı olarak CO₂'den ziyade bikarbonatı (HCO₃⁻) tercih eden bir organizmadır. Bu özellik, alkaline koşullarda yüksek fotosentetik verimliliğin sürdürülmesini sağlar (Badger et al., 2006). Jeotermal suların çoğunda doğal olarak bulunan bikarbonat, bu açıdan önemli bir avantaj sunar.

Ancak alkalinitenin aşırı yükselmesi (pH >11), hücresel iyon dengesini ve enzim aktivitesini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle jeotermal *Spirulina* sistemlerinde pH ve alkalinite, üst sınırdan ziyade optimum aralık mantığıyla yönetilmelidir (Richmond, 2004).

5.3. Azot ve Fosfor Yönetimi

Azot, *Spirulina*'da protein sentezini doğrudan etkileyen temel makro besin elementidir. Nitrat ve amonyum, en yaygın kullanılan azot formlarıdır; ancak jeotermal sistemlerde amonyumun sıcaklık ve pH ile birlikte toksisite riskini artırabileceği bilinmektedir (Colla et al., 2007).

Bu nedenle jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde nitrat temelli azot kaynakları, büyüme stabilitesi ve ürün kalitesi açısından daha güvenli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Fosfor ise enerji metabolizması ve

hücre bölünmesi için kritik olup, genellikle fosfat formunda sağlanmaktadır (Becker, 2019).

5.4. Mikro Elementler ve İz Mineraller

Demir, magnezyum, mangan, çinko ve bakır gibi mikro elementler, fotosentetik pigment sentezi ve enzimatik reaksiyonlar için gereklidir. Jeotermal sular, bu elementlerin bir kısmını doğal olarak içerebilse de, biyoyararlanabilirlikleri değişkenlik gösterebilir (Pandey et al., 2013).

Özellikle demir, fikosiyanın sentezi açısından kritik bir rol oynar. Ancak yüksek demir konsantrasyonları, oksidatif stres riskini artırabileceğinden, jeotermal *Spirulina* sistemlerinde mikro element takviyesi ölçüme dayalı ve kademeli biçimde yapılmalıdır.

5.5. Su Kalitesi Parametreleri ve İzleme

Jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde düzenli olarak izlenmesi gereken başlıca su kalite parametreleri şunlardır:

- pH ve alkalinite
- Sıcaklık
- Elektriksel iletkenlik (EC)
- Toplam çözünmüş katı madde (TDS)
- Azot ve fosfor formları
- İz elementler ve potansiyel toksik bileşenler

Bu parametrelerin izlenmesi, yalnızca kültür performansını değil; aynı zamanda ürün güvenliğini de doğrudan etkilemektedir (Borowitzka, 2013).

5.6. Kültür Yoğunluğu ve Hasat Zamanlaması

Kültür yoğunluğu, *Spirulina*'da ışık penetrasyonu ve fotosentetik verimlilik açısından kritik bir kontrol noktasıdır. Jeotermal sistemlerde artan sıcaklık, metabolik hızları artırabileceğinden, optimum yoğunluğun aşılması durumunda hızlı çöküşler yaşanabilir (Vonshak et al., 2001).

Bu nedenle jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde hasat, maksimum biyokütle yerine optimum biyokütle yaklaşımıyla planlanmalıdır. Düzenli ve kısmi hasat stratejileri, kültür stabilitesini artıran etkili bir yönetim aracıdır.

5.7. Kontaminasyon ve Biyogüvenlik

Spirulina'nın yüksek pH toleransı, birçok istenmeyen mikroorganizmanın gelişimini baskılasa da, jeotermal sistemler tamamen risksiz değildir. Özellikle sıcaklığa dayanıklı bakteriler, alkalifilik heterotroflar, bazı siyanobakteriler ve biyofilm oluşturan mikroorganizmalar kontaminasyon riski oluşturabilir (Markou & Georgakakis, 2011). Bu risk, özellikle açık havuzlarda; toz, böcek, kuş, yüzey akışı ve ekipman kaynaklı taşınım ile artar.

Bu nedenle jeotermal Spirulina tesislerinde biyogüvenlik, yalnızca kimyasal bileşenlerin kontrolüyle sınırlı değildir; operasyonel hijyen, ekipman temizliği ve rutin izleme protokolleriyle birlikte ele alınmalıdır. Uygulamada aşağıdaki yaklaşım önerilir:

(i) Operasyonel hijyen ve ekipman yönetimi:

- Hasat ekipmanları (file/elek), hortumlar, pompalar ve tank yüzeyleri için düzenli temizlik-dezenfeksiyon planı oluşturulmalı; “temiz–kirli alan” ayrımı ve personel giriş kuralları (el hijyeni, ekipman transferi) standardize edilmelidir.
- Kültür alanında organik yük birikimi (çökelti/biyofilm) kontaminasyon baskısını artırabileceğinden, yüzey ve hat temizliği rutinleştirilmelidir.

(ii) Biyolojik kontaminasyonun erken tespiti:

- Haftalık mikroskopik kontroller (Spirulina morfolojisi, yabancı alg/siyanobakteri varlığı),
- pH/alkalinite ve optik yoğunluk gibi temel proses göstergelerinde ani değişimlerin kayıt altına alınması,
- Görsel/koku gibi saha göstergelerine dayalı hızlı uyarı mekanizması önerilir.

(iii) Jeotermal kaynaklı kimyasal biyogüvenlik:

Jeotermal sular jeokimyasal olarak zengin olduğundan, bor (B), arsenik (As), florür (F), ağır metaller (Cd, Pb, Hg vb.), amonyak ve H₂S gibi parametreler kaynaklara göre değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle üretim başlamadan önce ve işletme sürecinde su kaynağı–kültür ortamı–**biyokütle** hattında periyodik analiz planı tanımlanmalıdır. Sahadaki pilot gözlemler, jeotermal su oranı yükseldikçe bazı elementlerin biyokütlede birikim eğiliminin artabileceğine işaret etmektedir (Güroy et al., 2023).

Öte yandan, jeotermal koşullarda yetiştirilen biyokütlenin bazı biyolojik stres yanıtları ve fonksiyonel özellikler bakımından farklı profiller gösterebildiği de bildirilmiştir (Güroy et al., 2023).

(iv) Eşik değer ve aksiyon planı:

- Kontaminasyon (biyolojik) veya kimyasal parametrelerde “eşik dışına çıkış” saptandığında uygulanacak aksiyonlar (izolasyon, seyreltme/ön arıtım, yeniden inokülasyon, üretim lotunun ayrılması, ek analizler) önceden yazılı hale getirilmelidir.
- Ürün gıda/yem amaçlı kullanılacaksa, ürün güvenliği açısından gerekli limitler ve kabul kriterleri ayrıca tanımlanmalıdır.

5.8. Adaptif Kültür Yönetimi Yaklaşımı

Jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliğinde en kritik kavramlardan biri, adaptif kültür yönetimidir. Jeotermal kaynakların kimyasal ve termal karakteri zaman içinde değişebileceğinden, besin ve su yönetimi sabit reçetelere değil; düzenli ölçüm ve geri beslemeye dayalı olarak yürütülmelidir (Acién et al., 2017).

Bu yaklaşım, jeotermal *Spirulina* sistemlerini klasik alg üretiminden ayıran temel farklardan biridir ve uzun vadeli sürdürülebilirliğin anahtarıdır.

6. HASAT, KURUTMA VE İŞLEME: JEOTERMAL ENERJİ ENTEGRASYONU VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BOYUTU

Spirulina (*Arthrospira* spp.) yetiştiriciliğinde hasat sonrası işlemler, nihai ürünün **kalitesi, güvenliği ve ekonomik değeri** üzerinde belirleyici rol oynar. Özellikle kurutma aşaması, hem enerji yoğunluğu hem de biyokimyasal bileşenlerin korunması açısından üretim zincirinin en kritik basamaklarından biridir (Becker, 2019). Bu bağlamda jeotermal enerji, *Spirulina* kurutma süreçlerinde yenilenebilir, sürekli ve düşük karbonlu bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır.

Jeotermal suda gerçekleştirilen *Spirulina* üretim sistemleri, yalnızca yetiştiricilik aşamasında değil; hasat ve kurutma süreçlerinde de jeotermal enerjinin entegrasyonuna olanak tanıyarak, üretimin bütüncül sürdürülebilirliğini güçlendirmektedir.

6.1. Hasat Aşaması ve Ön İşlemler

Spirulina'nın filamentöz yapısı, hasat işlemini birçok mikroalge kıyasla daha kolay hâle getirmektedir. Genellikle elek filtrasyonu, vakum

filtrasyonu veya düşük basınçlı mekanik ayırma yöntemleri kullanılmaktadır (Richmond, 2004). Jeotermal sistemlerde kültür sıcaklığının görece yüksek olması, hasat sırasında viskozitenin azalmasına ve filtrasyon verimliliğinin artmasına katkı sağlayabilmektedir.

Hasat sonrası biyokütle genellikle yüksek nem içeriğine (%80–90) sahiptir ve bu durum hızlı bir stabilizasyon gerektirir. Aksi hâlde mikrobiyal bozulma ve pigment kaybı riski ortaya çıkmaktadır (Vonshak, 1997).

6.2. Kurutmanın Ürün Kalitesi Açısından Önemi

Kurutma işlemi, *Spirulina*'nın raf ömrünü uzatmak ve taşınabilirliğini artırmak açısından zorunlu bir adımdır. Ancak yüksek sıcaklıklar ve uzun kurutma süreleri; protein denatürasyonu, pigment (özellikle fikosiyanın) kaybı ve antioksidan kapasitenin azalması gibi olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Lafarga, 2019).

Bu nedenle *Spirulina* kurutmasında temel hedef, minimum enerji girişiyle maksimum biyokimyasal korunum sağlamaktır. Jeotermal enerji, bu hedefe ulaşmak için önemli bir avantaj sunmaktadır.

6.3. Jeotermal Enerjinin Kurutmadaki Temel Avantajları

Jeotermal enerjinin *Spirulina* kurutma süreçlerinde sunduğu başlıca avantajlar şunlardır:

- Yenilenebilir ve düşük karbonlu enerji kaynağı olması,
- Yıl boyunca kesintisiz ve stabil ısı temini,
- Düşük–orta sıcaklıklarda kontrollü kurutma imkânı,
- Fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması.

Bu özellikler, özellikle 40–60 °C aralığında gerçekleştirilen düşük sıcaklıklı kurutma uygulamalarında jeotermal enerjiyi ideal bir seçenek hâline getirmektedir (Lund & Boyd, 2016).

6.4. Jeotermal Kurutma Teknolojileri

Jeotermal enerji, *Spirulina* kurutmasında farklı teknolojik yaklaşımlarla kullanılabilir:

6.4.1. Jeotermal Hava Isıtmalı Kurutma

Bu yöntemde jeotermal akışkan, ısı değiştiriciler aracılığıyla havayı ısıtarak dolaylı bir kurutma ortamı oluşturur. Bu yaklaşım, jeotermal su-

yun kimyasal bileşiminin ürünle doğrudan temasını engellediği için gıda güvenliği açısından tercih edilmektedir (Dickson & Fanelli, 2004).

6.4.2. Jeotermal Sera Tipi Kurutma

Jeotermal sera kurutma sistemleri, düşük yatırım maliyeti ve basit işletme avantajlarıyla özellikle küçük ve orta ölçekli tesisler için uygun bir seçenektir. Bu sistemler, *Spirulina*'nın düşük sıcaklıklarda yavaş ve kontrollü biçimde kurutulmasına olanak tanır (Kaya et al., 2020).

6.4.3. Hibrit Kurutma Sistemleri

Jeotermal enerjinin güneş enerjisi veya atık ısı geri kazanımı ile birlikte kullanıldığı hibrit sistemler, enerji verimliliğini daha da artırmaktadır. Bu tür sistemler, iklim koşullarına bağlı dalgalanmaların dengelenmesine yardımcı olur (Chiaramonti et al., 2023).

6.5. Jeotermal Kurutmanın Ürün Kalitesine Etkileri

Düşük ve stabil sıcaklık profili, *Spirulina*'nın biyokimyasal bileşenlerinin korunması açısından kritik öneme sahiptir. Jeotermal kurutma uygulamalarında:

- Fikosiyenin kaybının daha sınırlı olduğu,
- Protein sindirilebilirliğinin daha iyi korunduğu,
- Renk ve duyuşsal özelliklerin daha stabil kaldığı

rapor edilmiştir (Pandey et al., 2013; Lafarga, 2019).

Bu durum, jeotermal kurutmanın yalnızca enerji tasarrufu değil; **ürün kalitesi açısından da stratejik bir avantaj** sunduğunu göstermektedir.

6.6. Sürdürülebilirlik ve Karbon Ayak İzi Boyutu

Kurutma süreçleri, mikroalg üretiminde toplam enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Fosil yakıt temelli kurutma sistemleri, *Spirulina*'nın çevresel profilini olumsuz etkileyebilmektedir (Chisti, 2007).

Jeotermal enerji kullanımı ise kurutma aşamasındaki sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmakta ve üretimin karbon ayak izini düşürmektedir. Bu özellik, *Spirulina*'yı yalnızca besinsel değil; aynı zamanda iklim dostu bir biyoprodukt olarak konumlandırmaktadır (IPCC, 2022).

6.7. Jeotermal Kurutmanın Ekonomik ve Bölgesel Etkileri

Jeotermal kurutma sistemleri, uzun vadede enerji maliyetlerini düşürerek üretim ekonomisini güçlendirmektedir. Ayrıca jeotermal kaynakların bulunduğu bölgelerde, *Spirulina* işleme tesislerinin kurulması yerel istihdam ve katma değer yaratımı açısından önemli fırsatlar sunmaktadır (Mertoglu et al., 2020).

Bu yönüyle jeotermal *Spirulina* kurutma uygulamaları, yalnızca bir proses tercihi değil; bölgesel sürdürülebilir kalkınma aracı olarak da değerlendirilebilir.

6.8. Değerlendirme

Jeotermal enerjinin *Spirulina* kurutma süreçlerine entegrasyonu, yenilenebilir enerji kullanımı, ürün kalitesi ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini aynı çatı altında buluşturan nadir uygulamalardan biridir. Bu yaklaşım, *Spirulina* üretimini klasik alg yetiştiriciliğinden ayırarak, düşük karbonlu ve geleceğe uyumlu bir biyoproses modeline dönüştürmektedir.

7. ÇEVRESEL VE EKONOMİK SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK: LCA, KARBON AYAK İZİ VE MRV ÇERÇEVESİNDE JEOTERMAL *SPIRULINA*

İklim değişikliğiyle mücadelede gıda ve biyokütle üretim sistemlerinin rolü, yalnızca üretim miktarı veya besin değeriyle değil; yaşam döngüsü boyunca yarattıkları çevresel etki ile tanımlanmaktadır. Bu bağlamda *Spirulina* (*Arthrospira* spp.) gibi mikroalgler, yüksek fotosentetik verimlilikleri ve esnek üretim sistemleri sayesinde düşük karbonlu biyoproduktler arasında öne çıkmaktadır (Borowitzka, 2013; IPCC, 2022). Ancak bu potansiyelin iklim politikaları ve karbon yönetimi mekanizmaları içinde anlamlı bir karşılık bulabilmesi için, ölçülebilir, raporlanabilir ve doğrulanabilir çevresel performans göstergeleriyle desteklenmesi gerekmektedir.

Jeotermal suda *Spirulina* yetiştiriciliği, bu gerekliliği karşılayan nadir üretim modellerinden biri olarak; yenilenebilir enerji kullanımı, enerji yoğun süreçlerin azaltılması ve düşük karbon ayak izi avantajlarını bir arada sunmaktadır. Bu bölümde, jeotermal *Spirulina* sistemlerinin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği; Yaşam Döngüsü Analizi (LCA), karbon ayak izi ve MRV (Measurement–Reporting–Verification) çerçevesi üzerinden bütüncül olarak ele alınmaktadır.

7.1. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) Yaklaşımı

LCA, bir ürünün veya hizmetin ham madde temininden nihai kullanımına ve bertarafına kadar olan tüm aşamalarda çevresel etkilerini değerlendiren sistematik bir yöntemdir (ISO 14040/44). Mikroalg üretiminde LCA, özellikle enerji girdileri, su kullanımı ve sera gazı emisyonlarının karşılaştırılabilir biçimde ortaya konması açısından kritik öneme sahiptir (Clarens et al., 2010; Collet et al., 2015).

Spirulina yetiştiriciliğinde LCA'nın temel aşamaları şunlardır:

- Su ve enerji girdileri (ısıtma, karıştırma, CO₂ temini),
- Yetiştiricilik sistemi (açık havuz, PBR),
- Hasat ve kurutma,
- İşleme, ambalajlama ve dağıtım.

Jeotermal sistemlerde özellikle ısıtma ve kurutma aşamalarında fosil yakıt kullanımının yerini yenilenebilir jeotermal enerjinin alması, LCA sonuçlarını belirgin biçimde iyileştirmektedir (Lund & Boyd, 2016; Chiaramonti et al., 2023). Bu iyileşmenin sahada ölçülebilir biçimde ortaya konduğu örneklerden biri, İzlanda'da Hellisheiði jeotermal parkında yürütülen *Spirulina* üretimine ait yaşam döngüsü değerlendirmesidir; burada jeotermal enerji entegrasyonunun, birim ürün başına enerji ve emisyon göstergelerini belirgin biçimde düşürdüğü raporlanmıştır (Tzachor ve diğ., 2022).

7.2. Karbon Ayak İzi ve Jeotermal Avantaj

Karbon ayak izi, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca neden olduğu toplam sera gazı emisyonlarını CO₂ eşdeğeri (CO₂-eq) cinsinden ifade eder. Geleneksel *Spirulina* yetiştiriciliğinde karbon ayak izinin önemli bir bölümü, ısıtma ve kurutma için kullanılan fosil yakıt kaynaklı enerjiden kaynaklanmaktadır (Smetana et al., 2017).

Jeotermal *Spirulina* sistemlerinde ise:

- Isıtma ihtiyacı doğal jeotermal kaynaklarla karşılanmakta,
- Kurutma süreçlerinde düşük karbonlu ısı girdisi sağlanmakta,
- Enerji kaynaklı CO₂ emisyonları önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Bu avantaj, sayısal örneklerle de gösterilebilmektedir. Hellisheiði (İzlanda) jeotermal parkında gerçekleştirilen *Spirulina* üretiminin yaşam döngüsü analizine göre, 1 kg yaş *Spirulina* biyokütlesi üretmek için yal-

nızca $\sim 0,0378 \text{ m}^2$ tarıma elverişsiz arazi ve $8,36 \text{ m}^3$ tatlı su kullanılmış; yaklaşık 54,48 kWh elektrik tüketilerek net sıfır düzeye yakın bir sera gazı salımı ($-0,008 \text{ kg CO}_2\text{-eşdeğer}$) ile üretim tamamlanmıştır (Tzachor ve diğ., 2022). Bu değerler, jeotermal enerji destekli *Spirulina* üretiminde sera gazı emisyonlarının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Bu durum, jeotermal *Spirulina*'yı yalnızca düşük karbonlu değil; karbon azaltımında aktif rol oynayan bir biyoprodukt hâline getirmektedir (IPCC, 2022).

7.3. MRV (Ölçüm–Raporlama–Doğrulama) ve Güvenilirlik

İklimle mücadelede çevresel iddiaların güvenilirliği, MRV altyapısının sağlamlığına bağlıdır. MRV; çevresel performansın ölçülmesi, standartlara uygun biçimde raporlanması ve bağımsız doğrulama süreçlerini kapsar (Fuss et al., 2018).

Jeotermal *Spirulina* üretimi, MRV açısından önemli avantajlar sunmaktadır:

- Enerji girdilerinin büyük ölçüde **yerel ve izlenebilir** olması,
- Sürekli üretim koşulları sayesinde **tekrarlanabilir veri setleri**,
- LCA temelli karbon hesaplamalarına uygun **nicel parametreler**.

Bu özellikler, jeotermal *Spirulina*'nın gönüllü karbon piyasaları, kurumsal karbon raporlaması ve sürdürülebilirlik beyanları için güvenilir bir referans oluşturmasını mümkün kılmaktadır (ICAP, 2025; IEA, 2023).

7.4. Bireysel Karbon Ayak İzi Azaltımında Rolü

Beslenme tercihlerinin bireysel karbon ayak izi üzerindeki etkisi giderek daha görünür hâle gelmektedir. Hayvansal protein kaynaklarına kıyasla mikroalg bazlı ürünlerin karbon ayak izi önemli ölçüde daha düşüktür (Poore & Nemecek, 2018).

Jeotermal *Spirulina*:

- Yüksek protein yoğunluğu,
- Düşük arazi ve su kullanımı,
- Yenilenebilir enerjiyle desteklenen üretimi

sayesinde bireysel tüketim düzeyinde iklim dostu bir alternatif protein kaynağı sunmaktadır. Bu yönüyle, sürdürülebilir beslenme modellerinin yaygınlaştırılmasında stratejik bir rol üstlenebilir.

Nitekim jeotermal *Spirulina* üretimi, arazi ve su kullanımı bakımından geleneksel sığır eti üretiminin %1'inden daha az bir payına karşılık gelebilmekte ve emisyon profili çok daha düşük seviyelerde seyretmektedir (Poore & Nemecek, 2018; Tzachor ve diğ., 2022). Bu çerçevede, 1 kg kırmızı et yerine *Spirulina* bazlı bir alternatifin tercih edilmesinin yaklaşık 100 kg CO₂-eşdeğer düzeyinde emisyon azaltımına karşılık gelebileceği bildirilmektedir (Poore & Nemecek, 2018).

7.5. Kurumsal ve Sektörel Karbon Yönetimi

Kurumsal ölçekte karbon ayak izi azaltımı, yalnızca enerji verimliliği önlemleriyle sınırlı değildir. Tedarik zincirinde kullanılan girdilerin karbon profili, kurumsal raporlamada giderek daha fazla önem kazanmaktadır (GHG Protocol).

Jeotermal *Spirulina* yetiştiriciliği:

- Gıda, yem ve nutrasötik sektörlerinde düşük karbonlu girdi olarak kullanılabilir,
- Kurumsal karbon raporlarında Scope 3 emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir,
- Yeşil tedarik zinciri stratejileriyle uyumlu bir ürün sunar.

Bu yönüyle *Spirulina*, yalnızca bir nihai ürün değil; **kurumsal iklim stratejilerinin etkin bir aracı** olarak değerlendirilebilir (IEA, 2023).

7.6. Kamu Politikaları ve İklimle Mücadelede Stratejik Konum

Kamu düzeyinde iklim politikaları, giderek daha fazla ölçülebilir ve piyasa temelli mekanizmalara dayanmaktadır. Emisyon ticaret sistemleri, karbon fiyatlandırması ve sürdürülebilirlik raporlaması, MRV uyumlu üretim modellerini ön plana çıkarmaktadır (ICAP, 2025).

Jeotermal *Spirulina* sistemleri:

- Yenilenebilir enerji entegrasyonu,
- MRV'ye uygun veri üretimi,
- Bölgesel kalkınma ve istihdam katkısı

sayesinde kamu destekleri ve teşvik mekanizmaları açısından güçlü bir adaydır. Bu üretim modeli, iklim politikalarının yalnızca azaltım değil, dönüşüm hedeflerine de hizmet etmektedir.

7.7. Ekonomik Sürdürülebilirlik ve Fizibilite

Ekonomik açıdan Spirulina üretiminde en büyük maliyet kalemleri enerji (ısı kontrol, karıştırma, pompalama ve özellikle kurutma), su/ortam hazırlama ve hasat-kurutma süreçleridir. Üretim stratejisi (açık havuz vs. fotobiyoreaktör) bu maliyetleri belirgin biçimde farklılaştırır. Nitekim literatürde açık havuz sistemlerinde Spirulina üretim maliyetinin 3,8–9,59 €/kg, fotobiyoreaktör sistemlerinde ise 18,7–74,29 €/kg bandına çıkabildiği bildirilmektedir (Delrue ve diğ., 2017).

Bu çerçevede jeotermal entegrasyon, yalnızca ısı/enerji girdisini azaltan bir “enerji optimizasyonu” değil; aynı zamanda besi ortamı ve kimyasal girdiler üzerinden de maliyet düşürücü bir mekanizmadır. Güroy ve diğ. (2023) tarafından yarı açık raceway sistemde yürütülen çalışmada, Schlösser ortamının birim maliyeti 0,0150 €/L olarak hesaplanmış; jeotermal suyla ikame düzeyi arttıkça ortam maliyetinin GW25: 0,0114 €/L; GW50: 0,0059 €/L; GW75: 0,0019 €/L; GW100: 0,0005 €/L seviyelerine kadar gerilediği gösterilmiştir. Aynı çalışmada “1 kg kuru Spirulina biyokütlesi üretmek için gereken ortam maliyeti”ni ifade eden Biomass Economic Index (BEI) de jeotermal ikame ile keskin biçimde düşmüştür (SM: 17,1 €/kg → GW50: 7,8 €/kg → GW75: 2,4 €/kg → GW100: 0,3 €/kg). Bu bulgular, jeotermal suyun, özellikle ortam/kimyasal giderler üzerinden fizibiliteyi güçlendirebileceğini sayısal olarak ortaya koymaktadır.

Jeotermal suyun sağladığı maliyet avantajının önemli bir bileşeni de karbonat/alkalinite girdisinin azalmasıdır. Aynı veri setine göre %50 jeotermal suyla hazırlanan ortamda 1 kg Spirulina üretimi için tüketilen sodyum bikarbonat miktarı 5,4 kg iken, kontrol (Schlösser) ortamında 12,8–12,84 kg düzeyinde bulunmuştur; bu da bikarbonat tüketiminde yaklaşık %58 azalmaya işaret eder (Güroy ve diğ., 2022). Pratikte bu, tedarik/lojistik yükünün azalması ve ortam hazırlama maliyetlerinin düşmesi anlamına gelir.

Bununla birlikte, “en düşük ortam maliyeti = en iyi ekonomik sonuç” her zaman geçerli değildir. Jeotermal ikame arttıkça ortam maliyeti düşse de, tam jeotermal kullanım (GW100) bazı kimyasal parametreler nedeniyle büyümeyi baskılayabilir ve biyokütle verimini azaltabilir (Güroy ve diğ., 2023). Dolayısıyla ekonomik optimum; yalnızca €/L ortam maliyetine göre değil, (i) biyokütle verimi, (ii) hedef ürün kalitesi (protein/pigment), (iii) hasat-kurutma enerji ihtiyacı ve (iv) ürün satış fiyatı birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir. Bu nedenle pek çok saha senaryosunda “teknik-ekonomik optimum”un tam ikame yerine kısmi ikame (ör. GW50–GW75 bandı) gibi, verim–kalite–maliyet dengesini sağlayan bir aralıkta oluşması beklenir.

Ekonomik sürdürülebilirliğin bir diğer boyutu finansman ve piyasa entegrasyonudur. LCA temelli düşük emisyon profili ve izlenebilir proses verileri, jeotermal *Spirulina* üretiminin:

- yeşil finansman/etki yatırımı açısından cazibesini artırmasına,
- kurumsal alıcılar için düşük karbonlu hammadde olarak konumlanmasına,
- uygun çerçeveler oluştuğunda karbon piyasalarıyla ilişkilendirilebilir değer önermesi geliştirmesine zemin hazırlayabilir (Acién ve diğ., 2017).

Bu bağlamda jeotermal *Spirulina*, doğru proses tasarımı ve yerel jeotermal su kimyasına uyarlanmış işletme protokolleriyle, yalnızca çevresel değil ekonomik olarak da dayanıklı bir üretim modeli hâline gelebilir.

7.8. Değerlendirme

Jeotermal suda *Spirulina* yetiştiriciliği, LCA ve MRV çerçevesinde değerlendirildiğinde; iklim değişikliğiyle mücadelede ölçülebilir, doğrulanabilir ve ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır. Bireysel beslenme tercihlerinden kurumsal tedarik zincirlerine, kamu politikalarından karbon piyasalarına kadar geniş bir etki alanına sahip olan bu üretim modeli, mikroalg biyoteknolojisinin iklim dostu dönüşümde oynayabileceği rolü somutlaştırmaktadır.

8. Sonuç

Jeotermal suların *spirulina* yetiştiriciliğinde kullanımı, geleceğin sürdürülebilir biyoteknoloji uygulamaları için hem stratejik hem de uygulanabilir bir model sunmaktadır. Şuana kadar yapılan çalışmalar gösteriyor ki jeotermal entegre *Spirulina* üretim sistemleri, geleneksel yöntemlere kıyasla enerji verimliliği daha yüksek, karbon ayak izi çok daha düşük ve yıl boyu kesintisiz üretime imkân tanıyan bir yaklaşımdır. Jeotermal kaynakların sağladığı sabit sıcaklık ve mineralli su imkânı, *Spirulina*'nın biyolojik gereksinimleriyle büyük ölçüde örtüşerek ilave ısıtma ve besin girdisi ihtiyacını azaltmaktadır. Elde edilen deneysel veriler, jeotermal suyun kontrollü oranlarda kültür ortamına dâhil edilmesinin *Spirulina* biyokütle verimini koruyabildiğini, hatta bazı koşullarda artırabildiğini göstermektedir. Bunun yanında, kısmen jeotermal su kullanımıyla yetiştirilen *Spirulina*'nın protein, pigment ve diğer değerli bileşenler bakımından tatmin edici düzeylere ulaşabildiği, bu yaklaşımın besleyici ürün kalitesini sürdürebildiği görülmüştür.

Ancak, jeotermal suyun içerdiği mineral ve iz element profili dikkatle yönetilmesi gereken bir değişken olarak karşımızdadır. Ağır metal birikimi gibi potansiyel riskler biyogüvenlik protokollerinin önemini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, jeotermal Spirulina yetiştiriciliği için sürekli izleme, adaptif kültür yönetimi ve gerekli arıtma/seyreltme adımları, sürdürülebilirlik kadar ürün güvenliği açısından da kritik öneme sahiptir. Uygun şekilde optimize edildiğinde, jeotermal enerji ve su entegrasyonunun Spirulina üretim maliyetlerini düşürdüğü, fosil kaynaklı girdi bağımlılığını azalttığı ve sonuç olarak daha ekonomik bir üretim modeli ortaya çıkardığı anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, jeotermal suda Spirulina yetiştiriciliği hem Türkiye gibi jeotermal kaynak zengini ülkeler hem de dünyada sürdürülebilir gıda üretimi arayışları için ümit vaat eden bir alternatiftir. Bu model, yenilenebilir enerji kullanımı sayesinde mikroalg üretimini çevresel olarak nötr hatta pozitif bir sürece dönüştürmekte; düşük arazi ve su kullanımıyla doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı en aza indirmektedir. Gelecekte daha geniş çaplı demonstrasyon projeleri ve yaşam döngüsü analizleriyle desteklenmesi halinde, jeotermal entegre Spirulina üretiminin iklim dostu, ekonomik ve ölçeklenebilir bir çözüm olarak yaygınlaşabileceği değerlendirilmektedir. Böylece Spirulina, sadece bir “süper gıda” olmanın ötesinde, sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel biyogaz ekonomi stratejilerinin kilit bir bileşeni haline gelebilecektir.

Kaynakça

- Acién, F. G., Fernández, J. M., Magán, J. J., & Molina, E. (2017). Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances*, 35, 242–256.
- Acién, F. G., Gómez-Serrano, C., Morales-Amaral, M. M., Fernández-Sevilla, J. M., & Molina-Grima, E. (2017). Wastewater treatment using microalgae: How realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment? *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101, 103–121.
- Acién, F. G., Fernández-Sevilla, J. M., & Molina-Grima, E. (2017). Photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnology Advances*, 35, 1–17.
- Badger, M. R., Price, G. D., Long, B. M., & Woodger, F. J. (2006). The environmental plasticity and ecological genomics of the cyanobacterial CO₂ concentrating mechanism. *Journal of Experimental Botany*, 57, 249–265.
- Becker, E. W. (2019). *Microalgae for human and animal nutrition*. Springer.
- Borowitzka, M. A. (2013). High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology*, 25, 743–756.
- Chiaromonti, D., Prussi, M., Casini, D., & Tredici, M. R. (2023). Microalgae biorefineries and sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112914.
- Clarens, A. F., Resurreccion, E. P., White, M. A., & Colosi, L. M. (2010). Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. *Environmental Science & Technology*, 44, 1813–1819.
- Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, R. A., & Steyer, J. P. (2015). Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource Technology*, 194, 254–263.
- Castenholz, R. W. (2001). Phylum BX. Cyanobacteria. In *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Springer.
- Colla, L. M., Reinehr, C. O., Reichert, C., & Costa, J. A. V. (2007). Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource Technology*, 98, 1489–1493.
- Converti, A., Lodi, A., Del Borghi, A., & Solisio, C. (2009). Cultivation of *Spirulina platensis* in a combined airlift–tubular reactor system. *Biochemical Engineering Journal*, 43, 191–197.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, 294–306.
- Delrue, F., Alaux, E., Moudjaoui, L., Gaignard, C., Fleury, G., Perilhou, A., Richaud, P., Petitjean, M., & Sassi, J. F. (2017). Optimization of *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) Growth: From Laboratory Scale to Pilot Scale. *Fermentation*, 3, 59.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *Geothermal energy*. Wiley.

- Eroğlu, E., Melis, A., & Demirbaş, A. (2021). Environmental and toxicological aspects of geothermal water use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111191.
- Fuss, S., et al. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13, 063002.
- Güroy, B., Bayıl Oğuzkan, S., & Güroy, D. (2022). Utilization of geothermal water (Şanlıurfa-Karaali) medium to enhance DNA protection and phycocyanin in *Spirulina platensis* production. *Aquaculture Studies*, 22(3), AQUAST762. <https://doi.org/10.4194/AQUAST762>
- Güroy, B., Güroy, D., Mantoğlu, S., Karadal, O., & Bayıl Oğuzkan, S. (2023). Geothermal water as a nutrient medium source on the biomass productivity and biochemical composition of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) under the greenhouse conditions. *Annales de Limnologie – International Journal of Limnology*, 59, Article 2. <https://doi.org/10.1051/limn/2023001>
- Habib, M. A. B., Parvin, M., Huntington, T. C., & Hasan, M. R. (2008). *A review on culture, production and use of Spirulina as food for humans and feeds for domestic animals and fish*. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1034.
- Grossman, A. R., Schaefer, M. R., Chiang, G. G., & Collier, J. L. (1993). The phycobilisome, a light-harvesting complex responsive to environmental conditions. *Microbiological Reviews*, 57, 725–749.
- IEA. (2023). *Energy technology perspectives 2023*. International Energy Agency.
- ICAP. (2025). *Emissions trading worldwide: Status report*. International Carbon Action Partnership.
- IPCC. (2022). *AR6 Working Group III: Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Komárek, J., & Anagnostidis, K. (2005). *Cyanoprokaryota 2. Oscillatoriales*. Elsevier.
- Küçük, S., & Demir, M. M. (2018). Jeotermal suların kimyasal özellikleri ve biyoteknolojik kullanımı. *Jeotermal Enerji Dergisi*, 4(1), 21–34.
- Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, 17, 36.
- Kaya, T., Demir, M. M., & Koç, S. (2020). Türkiye’de jeotermal enerjinin tarım ve gıda uygulamaları. *Jeotermal Enerji Dergisi*, 6(2), 45–58.
- Lafarga, T. (2019). Effect of microalgal biomass incorporation into foods: Nutritional and sensorial attributes of the end products. *Algal Research*, 41, 101566.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66–93.
- Mertoglu, O., Şimşek, Ş., & Basarir, N. (2020). *Geothermal country update report of Turkey*. World Geothermal Congress.

- Markou, G., Chatzipavlidis, I., & Georgakakis, D. (2012). Carbohydrates production and bio-flocculation characteristics in cultures of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*. *Bioresource Technology*, 108, 63–70.
- Markou, G., & Georgakakis, D. (2011). Cultivation of filamentous cyanobacteria (*Spirulina*) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review. *Applied Energy*, 88, 3389–3401.
- Pandey, J. P., Tiwari, A., & Mishra, R. M. (2013). Temperature-induced variation in phycocyanin content in *Spirulina platensis*. *Journal of Applied Phycology*, 25, 479–486.
- Patel, A., Mishra, S., Pawar, R., & Ghosh, P. K. (2018). Purification and characterization of C-phycocyanin from cyanobacterial species of marine and freshwater habitat. *Protein Expression and Purification*, 146, 7–16.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture*. Blackwell Science.
- Singh, S. P., Montgomery, B. L., & Sherman, L. A. (2008). Molecular mechanisms of stress responses in cyanobacteria. *Photosynthesis Research*, 98, 125–138.
- Smetana, S., Sandmann, M., Rohn, S., Pleissner, D., & Heinz, V. (2017). Autotrophic and heterotrophic microalgae and cyanobacteria cultivation for food. *Journal of Cleaner Production*, 162, 137–147.
- Torzillo, G., Scoma, A., Faraloni, C., & Giannelli, L. (2015). Advances in microalgal cultivation systems. *Journal of Applied Phycology*, 27, 1–15.
- Tzachor, A., Smidt-Jensen, A., Ramel, A., & Geirsdóttir, M. (2022). Environmental Impacts of Large-Scale *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) Production in Hellisheidi Geothermal Park Iceland: Life Cycle Assessment. *Marine Biotechnology*, 24(5), 991–1001. <https://doi.org/10.1007/s10126-022-10162-8>
- Vonshak, A. (1997). *Spirulina platensis* (*Arthrospira*): *Physiology, cell-biology and biotechnology*. Taylor & Francis.
- Vonshak, A., Torzillo, G., Tomaselli, L., & Chen, F. (2001). Photosynthesis and light–dark cycles in *Spirulina platensis*. *Journal of Applied Phycology*, 13, 89–96.
- Whitton, B. A., & Potts, M. (2012). *The ecology of cyanobacteria II*. Springer.
- Zarrouk, C. (1966). Contribution à l’étude d’une cyanophycée. *PhD Thesis*, University of Paris.

//

Bölüm 16

BALIK HEMATOLOJİSİ VE BAĞIŞIKLIK SİSTEMİ

Başar ALTINTERİM¹

1 Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Su Ürünleri Mühendisliği Bölümü, Battalgazi, Malatya, Türkiye.

basar.altinterim@ozal.edu.tr, tel: +90 422 846 12 65

Orcid: 0000-0001-6913-6326

Giriş

Balıklarda kan akışının temel modeli, tek bir pompa, tek devreli bir sistem içerir - kalpten solungaçlara, vücuda ve tekrar kalbe gelir. Kardiyovasküler sistemde atardamarlar (Dorsal aorta) kanı dokulara ve organlara taşır, venler kirli kanı solungaçlara taşır. Hematolojik analizler stres biyobelirteçleri olarak kullanılır, ayrıca hematolojik parametreler kullanılarak balıklarda olası hastalık varlığı, durumu ve derecesi hakkında bilgi hızla elde edilebilir. Kemikli balıkların başlıca lenfomiyeloid dokuları timus, dalak ve böbrektir. İlk gelişen lenfoid organ olan timusdur, buradan göç eden lenfositler dalak ve böbrekte lenfosit üretimini tetikler. Böbrek, kemikli balıklarda önemli bir kan yapıcı organdır; pronefrik (ön veya baş böbrek) ve opistonefrik (ana veya gövde böbrek) böbrekler bu balıklarda hematopoez bölgeleridir. Bu nedenle böbrek (öncelikle pronefros), kemikli balıkların çoğunda eritrositlerin, granülositlerin, lenfositlerin, monositlerin ve muhtemelen trombositlerin farklılaşması ve gelişmesi için başlıca bölgedir. Balıkların kanında bulunan kan hücreleri: RBC'ler, trombositler, lenfositler, monositler, nötrofiller (heterofiller), eozinofiller, bazofiller (Turan et al., 2006). Retikülositler, balık kanı preparatlarında sıklıkla bulunur. Balık lenfositleri, T, B ve spesifik olmayan sitotoksik lenfositlere ayrılabilir. T hücreleri timusta gelişir ve olgunlaşırken, B hücreleri böbreğin pronefros bölgesinde gelişir. Balık eritrositleri çekirdekli-dir. Eozinofiller parazit öldürme ve fagositozda işlev görür. Memelilerde olduğu gibi, monositler kanda dolaşarak dokulara göç eder ve makrofaj olurlar. Balıklarda monositler ve makrofajlar birincil fagositik hücrelerdir (Saleh, 2020).

Kanın Görevleri

- **Taşıma fonksiyonu:** Başta oksijenin dokulara iletilmesi olmak üzere; besin bileşenlerinin, hormon yapılarının ve enzimlerin transferini gerçekleştirir. Bunun yanı sıra metabolik faaliyetler sonucunda açığa çıkan karbondioksit, üre ve ürik asit gibi atık ürünleri, vücuttan atılmak üzere böbrek ve solungaç gibi boşaltım merkezlerine nakleder.
- **Homeostatik düzenleme:** Organizmanın iç dengesini korumak amacıyla vücut sıcaklığının stabilizasyonunda ve asit-baz (pH) dengesinin ayarlanmasında kritik rol oynar.
- **Bağışıklık ve savunma sistemi:** Patojen özellik taşıyan virüs ve bakteri gibi dış kaynaklı unsurlar, dolaşım sistemindeki lökositler aracılığıyla fagosit edilerek etkisiz hale getirilir.

- **Koagülasyon ve koruma:** Herhangi bir yaralanma veya damar hasarı durumunda, pıhtılaşma süreçlerini aktive ederek aşırı kan kaybını önler ve kan kaybını durdurur.

Kanın Yapısı

Kan dokusu, temel olarak hücresel elemanlar ile bu hücrelerin içinde yüzdüğü sıvı faz olan plazmanın birleşiminden meydana gelir. Kanın santrifüj edilmesiyle ayrıştırılabilen, açık sarı tona sahip sıvı kısmıdır. Bu sıvı matrisin yaklaşık %90-92'lik kısmını su oluşturur. Geri kalan hacmi; proteinler, lipidler, karbonhidratlar ve amino asitler gibi organik bileşikler ile hormonlar, üre, laktik asit ve çeşitli enzimler oluşturmaktadır. Ayrıca sodyum, potasyum, demir ve bikarbonat gibi inorganik elementler de bulunur.

Plazma, içerdiği bahsi geçen maddeleri ilgili doku ve organlara ulaştıran bir nakil ortamı görevi görür. Laboratuvar koşullarında plazma örneği elde etmek için, kanın pıhtılaşmasını engelleyen heparin veya EDTA gibi antikoagülanlar içeren tüpler kullanılarak santrifüj işlemi uygulanır.

Plazma Proteinleri ve Serum Kavramı

Temel sentez merkezi karaciğer olan plazma proteinleri; albümin, globülin ve fibrinojen olmak üzere üç ana grupta incelenir.

- **Albümin:** Damar içi sıvının dokulara sızmasını önleyen kolloid ozmotik basıncın korunmasından sorumlu temel proteindir.
- **Globülinler:** Alfa, beta ve gama alt türlerine ayrılan bu protein grubu, organizmada özellikle immün sistemde aktif rol üstlenir.
- **Fibrinojen:** Hemostaz (kanamanın durdurulması) sürecinin nihai aşamasında pıhtı oluşumu için gerekli bir proteindir.

Serum ve Plazma Arasındaki Ayırım

Serum, kanın pıhtılaşma reaksiyonu tamamlandıktan sonra geri kalan sıvı fazı temsil eder. Plazmadan temel farkı, pıhtılaşma sürecinde tüketildiği için içeriğinde “fibrinojen” barındırmamasıdır. Plazmanın aksine, serum üretiminde herhangi bir antikoagülan (pıhtılaşma önleyici) madde kullanılmaz; kan örneğinin oda sıcaklığında doğal pıhtılaşma sürecine bırakılmasıyla elde edilir. Özellikle cam tüpler içerdiği silisyum ile bu pıhtılaşmaya katkı sağlar (Kılınç ve Besler, 2025).

Kanın şekilli elemanları ve eritrosit fizyolojisi

Kan dokusu; eritrositler (alyuvarlar), lökositler (akyuvarlar) ve trombositler olmak üzere üç temel hücre grubundan oluşur.

Alyuvarlar (RBC - Eritrositler)

Alyuvarlar, içerdikleri hemoglobin molekülü sayesinde dokulara oksijen transferini gerçekleştirirken aynı zamanda asit-baz dengesinin korunmasında da etkin rol oynarlar. Eritrositlerin kendine has kırmızı rengi, protein yapısındaki renksiz globin ile demir içeren heme pigmentinin birleşmesiyle oluşan hemoglobinden kaynaklanır. Sindirim sisteminde (ince bağırsaklarda) emilen demir, plazmada apotransferin ile bağlanarak transferrin formunda taşınır. Hücresel düzeyde ise apoferritin ile birleşerek vücudun demir rezervi olan ferritin şeklinde muhafaza edilir. Memelilerin aksine, balık türlerinde hem alyuvarlar hem de trombositler çekirdekli bir yapıya sahiptir. Klinik değerlendirmelerde anemi belirtilerinin ortaya çıkması, doğrudan eritrosit sayısındaki düşüşten ziyade hemoglobin konsantrasyonundaki azalmaya bağlıdır. Örneğin, demir eksikliği anemisinde (Mikrositer Hipokrom Anemi) hücre sayısı normale yakın seyreitse de alyuvarlar standarttan küçük ve hemoglobin bakımından fakirdir. Suda çözünmüş oksijen azaldığında, balık organizması bunu kompanse etmek için alyuvar üretimini artırabilir. Yetersiz beslenme şartlarında hücre sayısı düşerken, vücudun su kaybettiği dehidrasyon hallerinde eritrosit yoğunluğu artış gösterir. Alyuvar sayısındaki değişimler, sucul ortamdaki kirletici unsurlara veya iritasyon yapıcı maddelere karşı organizmanın geliştirdiği ikincil (sekonder) bir savunma tepkisi olarak kabul edilir. Genel bir kural olarak, bir balık türünde eritrositlerin boyutu arttıkça toplam hücre sayısında azalma gözlenir; yani boyut ile miktar arasında ters yönlü bir korelasyon mevcuttur (Çınar ve ark., 1996).

%90'ı böbrek glomerüllerinde üretilen eritropoetin maddesinin etkisiyle ön böbrekten eritrosit üretimi arttırılır. Hipoksi giderildiği zaman eritropoetin sentezi birkaç saat içinde azalır. Böylece eritrosit üretiminin artmasıyla hücresel oksijen yetmezliği giderilir. Balıkların olgunlaşmamış eritrositleri olgun eritrositlerden daha küçük olduğundan, mikrositoz sıklıkla belirgin hemorajik veya hemolitik anemilerle ilişkilidir. Balıkların hemorajik anemileri travma, kan emici parazitler, K vitamini eksikliği ve septisemi (bakteri veya viral) ile ilişkilidir. Eritrositler, reaktif oksijen türlerini (ROS) metabolize ettikleri ve sürekli olarak yüksek oksijen gerilimlerine maruz kaldıkları için oksidatif hasara karşı çok hassastır. Hemoglobin konsantrasyonu ve eritrosit sayısı, fizyolojik performansla doğrudan bağlantılıdır. Bu tür faktörlerdeki değişiklikler, hastalıkları veya sağlık bozukluklarını gösterebilir. Eritrositlerin olgunlaşması, ol-

gun hücrelerin daha yüksek MCV ve MCHC değerleri sergilediği sazan (*Cyprinus carpio*) gibi bazı türlerde hücre boyutunda ve hemoglobinin içeriğinde bir artışı içerir. Türler, stres ve çevresel sıcaklıklardan değişken şekilde etkilenir. Kan alma bölgesi de eritrosit sayılarını etkileyebilir. Balıklarda anemi teşhisi genellikle PCV ve hemoglobin konsantrasyonunda belirgin bir azalmaya dayanır. Anemik balıklar tipik olarak düşük PCV değerlerine sahiptir (%20'den az). Mikrositik normokromik anemi, artan nüfus yoğunluğu gibi çevresel streslerle ilişkilendirilmiştir. Artan sayıda olgunlaşmamış eritrosit, balıklarda anemi, hipoksi, stres ve sıcaklık değişiklikleri gibi çeşitli koşullara spesifik olmayan fizyolojik tepkilerin bir göstergesi olarak önerilmiştir (Talebi ve ark., 2013).

Hemolitik aneminin en yaygın nedenleri bulaşıcı ve hemolizin üreten bakterilerle ilişkilidir (*Aeromonas* spp., *Pseudomonas* spp. ve *Vibrio anguillarum*). Toksinler balıklarda eritrosit parametrelerini etkileyebilir. Örneğin, balıkların nitrit zehirlenmesi (kahverengi kan hastalığı, yeni tank sendromu) ciddi bir siyanoz (Cildin mavimsi mor bir renk alması) ve hemolitik anemi ile sonuçlanabilir. Nitrit solungaçlardan kolayca emilir ve kana girer ve burada hemoglobini methemoglobine okside eder, yavaş yavaş kanı kırmızıdan kahverengiye dönüştürür. Methemoglobin oksijeni bağlayamaz çünkü hemoglobinin demir bileşeni oksijenden oksitlenir. Siyanoz, kanın oksijen taşıma kapasitesinin azalması nedeniyle oluşur ve hemolitik anemi, hasarlı eritrositler genellikle dalak veya karaciğerdeki makrofajlar tarafından dolaşımdan uzaklaştırıldığında ortaya çıkar. Viral eritrositik nekroz, deniz balıklarında hemolitik anemi ile sonuçlanan bir iridovirüsün neden olduğu bir durumdur. Dalak makrofajları etkilenen eritrositleri dolaşımdan uzaklaştırdıkça hemolitik anemi gelişir. Kırmızı hücre hipoplazisinden (az gelişim) kaynaklanan rejeneratif olmayan anemi, hemopoiyetik dokunun yeterli sayıda eritrosit üretememesinden kaynaklanır. Balıklarda deneysel olarak beslenme eksiklikleri ile ilişkili bir dizi anemi üretilmiştir. Örneğin, folik asit eksiklikleri normokromik makrositik anemilere neden olur ve B12 vitamini eksiklikleri hipokromik anemilere neden olur. Folat eksikliğinin ayrıca kanal yayın balıklarında (*Ictalurus punctatus*) meydana gelen kronik hemolitik aneminin bir nedeni olduğu öne sürülmüştür. C vitamini, demir veya bakır eksiklikleri balıklarda mikrositik hipokromik anemiye neden olabilir. Balıklarda rejeneratif olmayan anemi ile sonuçlanan toksisiteler arasında amonyak ve kurşun, bakır ve kadmiyum gibi ağır metaller bulunur (Küçük ve Yıldırım, 2017).

Balıkların kan alma işlemi 20 saniyeyi geçerse Htc↑, Hg↔, MCHC↓. Aktif balık Htc↑, Aktif olmayan balık Htc↓. Yaş, cinsiyet, su sıcaklığı, fotoperiyot ve mevsimsel değişiklikler de balığın PCV'sini etkileyebilir. Anemik balıklar PCV↓, küçük RBC. Mikrositik (RBC küçük) normokro-

mik (RBC sayısı azlığı) anemi, artan nüfus yoğunluğu gibi çevresel streslerle ilişkilendirilmiştir. Gelişen RBC, zamanla boyut ve hemoglobin içeriğinde artmaya devam eder, bu da daha yaşlı hücreler için daha yüksek MCV, MCH ve MCHC ile sonuçlanır (Altun ve Diler 1999).

Ortalama eritrosit hacmi (MCV)

MCV parametresi, tek bir alyuvarın ortalama fiziksel hacmini ifade eder. Bu değer üzerinden yapılan değerlendirmeler, anemilerin morfolojik olarak sınıflandırılmasında temel alınır:

- **Mikrositoz:** Alyuvarların normalden küçük olması (Düşük MCV).
- **Normositoz:** Alyuvar boyutlarının standart aralıkta kalması (Normal MCV).
- **Makrositoz:** Hücre hacminin referans değerlerin üzerinde olması (Yüksek MCV).

Mikrositer ve Normositer Durumlar

MCV değerindeki düşüş genellikle demir eksikliği anemisinin bir göstergesidir. Tanıyı netleştirmek için RDW (Eritrosit Dağılım Genişliği) verisiyle birlikte incelenmelidir; RDW yüksekliği demir eksikliğini desteklerken, normal RDW ve artmış MCHC değerleri hereditör sferositoz gibi genetik durumları işaret edebilir. Alyuvarların morfolojik yapısının (renk, şekil ve hacim) korunmasına rağmen toplam eritrosit ve hemoglobin miktarının azalmasıyla karakterizedir. Bu durumda hastada anemi olmasına rağmen MCV değerleri referans aralığında seyredebilir.

Makrositoz ve Rejenerasyon Belirtileri

Yüksek MCV değerleri (makrositoz), genellikle hematopoietik sistemin aktif olduğunu ve dolaşıma henüz tam olgunlaşmamış, hacimli hücreler saldıgını gösterir. Özellikle B12 vitamini yetersizliklerinde eritrosit hacminde belirgin büyüme gözlenir. Ayrıca miyelodisplastik sendromlar da makrositer anemi tablosuna yol açabilir. MCV değerinde gözlenen kademeli yükselişler, organizmanın strese girmesiyle salınan katekolaminlerin etkisiyle oluşan eritrosit şişmesine (şişkinlik) yorulabilir.

Kırmızı kan hücrelerindeki ortalama hemoglobin yoğunluğudur (MCHC)

↓ MCHC: hipokromik anemi. Büyük, olgunlaşmamış hücrelerin artışında, Demir eksikliğinde görülür. Retekülositler hemoglobin sentezle-

meye devam etse de, hemoglobin konsantrasyonu olgun eritrositlerinkinden daha düşüktür. Bazen demir eksikliği olan hayvanlarda hipokromik yanı sıra mikrositer bir anemi olabilir. ↑ MCHC: hiperkromik anemi. Cihaz eritrosit boyutunu algılayamazsa htc düşer, mchc artar (Altınterim, 2019a).

Ortalama eritrosit hemoglobin (MCH)

MCH parametresi, tek bir alyuvar hücresinin bünyesinde barındırdığı ortalama hemoglobin kütlesini ifade eder. Genel hemoglobin (Hb) ölçümü tüm kan örneğindeki toplam miktarı yansıtırken, MCH verisi doğrudan hücre başına düşen hemoglobin yoğunluğuna odaklanır. Bu değer referans aralığının altında kalması, klinik olarak anemi (kansızlık) tablosunun önemli bir göstergesidir. MCH seviyeleri genellikle hücre hacmini gösteren MCV değerleri ile doğrusal bir ilişki içerisindedir: Mikrositer anemi türlerinde, alyuvarların fiziksel hacmi daraldığı için taşıdıkları hemoglobin miktarı da buna paralel olarak azalır. Bu durum, laboratuvar sonuçlarına MCH düşüklüğü olarak yansır. Makrositer anemilerde ise durum tam tersidir; eritrositlerin çapları ve hacimleri normalden büyük olduğu için hücre başına düşen hemoglobin ağırlığı artar ve MCH yüksekliği gözlenir (Alsaran, 2016).

Hemoglobin (Hg)

Kandaki karakteristik kırmızı rengin kaynağı olan hemoglobin; demir içeren “hem” grubu ile protein tabanlı “globin” birimlerinin sentezlenmesiyle oluşmuş biyolojik bir pigmenttir. Alyuvarların kuru madde ağırlığının yaklaşık %35’ini teşkil eden bu molekül, gaz değişim süreçlerinde hayati rol oynar. Balık fizyolojisinde, sistemik oksijenin %90’dan fazlası hemoglobine bağlanarak taşınırken, geri kalan cüzi bir miktar plazma içerisinde çözünmüş halde iletilir. Organizmanın toplam oksijen taşıma potansiyeli, doğrudan dolaşımdaki eritrosit sayısı ve buna bağlı olarak toplam hemoglobin konsantrasyonu ile ilişkilidir. Bu değerler çeşitli içsel ve dışsal faktörlere göre değişkenlik gösterir. Hemoglobin seviyeleri, sucul ekosistemdeki kirlenici unsurlara veya tahriş edici maddelere karşı balık bünyesinin geliştirdiği ikincil (sekonder) bir fizyolojik yanıt olarak değerlendirilebilir. Enfeksiyon vakaları ve yoğun stres faktörleri altında balıklarda hemoglobin miktarının azaldığı (anemik tablo) bilimsel olarak saptanmıştır. Literatürdeki pek çok araştırma, rasyonlara eklenen farklı bitki türlerinin ve ekstraktlarının, balıkların hematolojik profilini ve hemoglobin sentezini farklı yönlerde manipüle edebildiğini ortaya koymaktadır (Altınterim ve ark., 2018d).

Hg ve Htc düşüklüğü Eritropeni göstergesidir. RBC ve Hg artışı eritropesisi artırdığını gösterir. Hematokrit yüzdesi, hemoglobin oranı ve eritrosit sayısı, balıkların oksijen taşıma kapasitesi için iyi bir göstergedir ve böylece yaşam alanlarında mevcut olan oksijen konsantrasyonu ve bu balıkların sağlık durumu ile ilişkiler kurmayı mümkün kılar. ↓ Hg: Anemilerde, Enfeksiyon ve stress, Hg ve Htc düşüklüğü Eritropeni göstergesidir. Daha aktif balıklar genellikle daha yüksek hemoglobin değerlerine sahiptir. RBC ve hemoglobindeki azalma, toksik maddelerin en belirgin hematolojik etkisidir. Düşük hemoglobin seviyesi, stres sendromu nedeniyle balığın yiyecek arama ve yırtıcılardan kaçma yeteneğini azaltabilir. Hb içeriğindeki düşüşle birlikte eritropenin gelişmesinden sorumludur.

Hematokrit (HTC): (PCV=packed cell volume veya EVF=Eritrosit volum fraksiyon)

Literatürde PCV (Paketlenmiş Hücre Hacmi) veya EVF (Eritrosit Volüm Fraksiyonu) olarak da isimlendirilen hematokrit; tam kan hacmi içerisinde yer alan hücresel bileşenlerin, sıvı faz olan plazmaya olan yüzdesel oranını temsil eder. Bu parametre, kanın viskozitesi ve şekilli eleman yoğunluğu hakkında temel bilgiler sunar. Hematokrit ölçümleri, klinik ortamda öncelikle anemik durumların teşhis ve takibinde kritik bir araç olarak kullanılır. Bu test, dolaşımdaki alyuvar yoğunluğunu doğrudan yansıttığı için aneminin varlığını ve şiddetini belirlemede birincil göstergedir. Anemi geliştiğinde, vücut dokularına yeterli oksijen ulaştırmama riskine karşı savunma mekanizmalarını devreye sokar. Bu süreçte organizma, mevcut eksikliği gidermek adına alyuvar üretimini ve buna bağlı olarak bu fraksiyonel oranı artırma eğilimi gösterebilir. Bu durum, laboratuvar sonuçlarında fraksiyonun normal limitlerin dışında seyretmesine yol açar. Oksijen düşüklüğünde miktarı artar. Genellikle hematokrit değeri hemoglobin değerinin üç katı kadardır (Altınterim ve Aksu, 2019b).

↑ Htc: Anemilerde, Oksijen düşüklüğünde, Stress de artar. Balıkların 20 saniye kadar kısa bir süre su dışında elde tutulması, hemokonsantrasyona ve eritrositlerin şişmesine neden olan katekolaminlerin salınmasına neden olur. Bu nedenle, hematokrit artar, ancak hemoglobin konsantrasyonu aynı kalır ve böylece MCHC'nin azalmasına neden olur. Hematokritler balıkların yaşam döngüsü boyunca da değişir. Yaş, cinsiyet, su sıcaklığı, fotoperiyot ve mevsimsel değişiklikler de balığın PCV'sini etkileyebilir. Ayrıca tatlı su balıkları stres sırasında suyu yutabilir ve bu da hemodilüsyona neden olabilir. Meydana gelebilecek strese karşı diğer bir yaygın hematolojik yanıt, eritrositlerin dalak salınımından kaynaklanan nispi bir hemokonsantrasyondur. Kemikli balıklar, yüksek PCV ve küçük

eritrositler ile bağlantılı olarak yüksek kardiyak iş yükü ve kan basıncı sergiler. Kan alma sırasında yakalama öncesi stres veya yetersiz anestezi, RBC şişmesini şiddetlendirebilir ve PCV'yi önemli ölçüde artırabilir.

↓ Htc: Hastalıklarda. Daha az aktif balıkların aktif, hızlı yüzen balıklardan daha düşük hematokritlere sahip. Viral hemorajik sepsis ile enfekte olan gökkuşağı alabalığında PCV, RBC'ler ve hemoglobinde azalma görülmüştür.

Eritrosit hücresi dağılım genişliği (RDW)

Eritrosit dağılım genişliği (RDW), dolaşımdaki alyuvarların boyut açısından ne kadar heterojen olduğunu, yani anizositoz (hücreler arası büyüklük farkı) varlığını sayısal olarak ortaya koyan bir parametredir. MCV verisinden sonra anemilerin sınıflandırılmasında en güvenilir ikinci gösterge olarak kabul edilir. Özellikle hipokrom-mikrositik anemilerin ayırıcı tanısında kilit rol oynar. Aneminin etiyojisine bağlı olarak hücre boyutları ve RDW değerleri farklılık gösterir: Bu patolojik durumda demir yetersizliği nedeniyle hemoglobin sentezi aksar ve hücreler normalden küçük hale gelir (mikrositer). Laboratuvar bulgularında tipik olarak düşük MCV ve yüksek RDW kombinasyonu izlenir. Hücrelerin görevlerini tam yapamadığı bu tablo, mikrositer-hipokrom anemi olarak tanımlanır. Megaloblastik Anemi (B12 ve Folik Asit Eksikliği): vitamin B12 ve folik asit, DNA replikasyonu için elzemdir. Eksikliklerinde hücre bölünmesi aksar ve kanda normalden daha hacimli eritrositler görülür. Bu durum hücre çapının büyümesine ve RDW değerinin yükselmesine neden olur. Aplastik Anemi: kemik iliği kaynaklı bu anemi türünde, üretilen hücrelerin boyutları genellikle homojen kaldığı için RDW değerinin referans aralıklarında (normal) seyretmesi beklenir. RDW-CV Pratik uygulamada anizositozun kesin teşhisi için RDW-CV (varyasyon katsayısı) verisi daha sık tercih edilir. RDW'deki yükseliş, kemik iliğinin yetersiz hammadde (demir, vitamin vb.) nedeniyle standart dışı boyutlarda hücreleri dolaşıma saldıgının en somut kanıtıdır (Akdemir, 2023).

Lökosit (WBC)

Enfeksiyon ve hastalıklara karşı vücudun birincil savunma hücreleridir. Salmonidlerin üç tip lökosit içerdiği görülmektedir: Lenfositler (T, B, NK), Granülositler (Nötrofiller, Eozinofiller, Bazofiller) ve Monositler. Balıklarda stres tepkisine neden olan uzun süreli fotoperiyot ve yüksek su sıcaklığı gibi çevresel koşullar da lenfopeni ile ilişkili lökopeni ile sonuçlanacaktır. Beyaz kan tanecikleri (WBC) savunma mekanizmasında önemli bir rol oynamaktadır ve esas olarak granülosit (Özellikle bakteriyel enfeksiyonlarla savaşta görevlidirler), monosit (Enfeksiyonlarla savaş-

ta yararlıdırlar) ve lenfositleri (Özellikle viral enfeksiyonlarda bağışıklık için yararlı hücrelerdir) içermektedir; granülosit, monosit yaralı dokudan enkazı kurtarmak için fagositler olarak işlev görür ve lenfositler antikorlar üretir (Amirkolaie ve ark., 2015). Kirletici maddelere maruz kaldıktan sonra balıkların sağlık durumunu değerlendirmek için toplam ve farklı lökosit sayımı kullanılabilir, çünkü lökosit (lökopeni) ve lenfosit sayısındaki azalma genellikle bir stres yanıtı olarak kabul edilir (Altınterim ve ark., 2018).

Lökopeni, balıkların strese karşı spesifik bir cevabıdır. Lökosit konsantrasyonu, trombosit konsantrasyonu ve PCV'nin tümü azalırsa ve anemi yeniden yenilenemez ise, aneminin muhtemel nedeni olur. WBC sayımındaki ilk artış, toksik maddenin varlığı nedeniyle immünolojik savunmanın doğrudan uyarılmasının bir sonucu olabilir veya indüklenen doku hasarı ile ilişkili olabilir. Savunma mekanizmasının bozulması ve böyle bir durumla baş etmek için (WBC düşüş) lökositoz görülür (Benfey ve Biron, 2000). Balıklarda stres faktörlerinin yoğunlaşması, genellikle lökosit popülasyonunda bir artışa (leukositoz) ve kanın pıhtılaşma mekanizması olan hemostaz dengesinin bozulmasına yol açar. Öte yandan, bağışıklık sisteminin baskılandığı veya fonksiyonel kapasitesinin yitildiği durumlarda, dolaşımdaki toplam lökosit sayısında belirgin bir düşüş gözlenir.

Sucul canlılarda savunma mekanizmalarını güçlendirmek amacıyla rasyonlara dahil edilen bitkisel bileşenlerin lökosit profilini olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Örneğin: ekinezya kullanımı. Yapılan bir araştırmada, Nil Tilapyası (*Oreochromis niloticus*) rasyonlarına 0,25 ppt gibi belirli bir dozajda eklenen ekinezya (*Echinacea purpurea*) bitkisinin, lökosit miktarını artırarak balığın spesifik olmayan bağışıklık sistemini stimüle ettiği (uyardığı) saptanmıştır (Aly ve Mohamed, 2010). Genç bireylerde lökositler daha fazla miktardadır. İmmün system daha erken tepki verir. Dalak, timus. ↑ WBC: lökositoz. Bakteriyel enfeksiyonlarda, Toksik maddeler, İmmünostimulantlar. ↓ WBC: lökopeni. Viral enfeksiyonlarda, Stres, Savunma mekanizmasının bozulması. Çoğu türde, lenfositler en bol bulunan lökositlerdir, bunu monositler veya nötrofiller ve eozinofiller takip eder. Bakteriyel böbrek hastalığı ile enfekte olmuş Chinook somonu, 16 gün sonra lökosit sayılarını kontrollerin üzerindeki seviyelere yükseltti. *Aeromonas hydrophila* ile enfekte olmuş sazan, WB-C'leri arttırdı ve RBC'leri, PCV'yi ve hemoglobini azalttı (Ural, 2013).

Agranülositler

Lenfositler

Bağıışıklık sisteminin edinsel immünitenin en belirgin hücre grubudur. Timus da üretilir. Lenfositler, balıklarda sayısal olarak baskın beyaz kan hücreleridir. Balık lenfositleri immüno-yeterlik olarak değerdendir. Dolayısıyla, antikorların üretiminden sorumludurlar. Lenfositler antikor üretir. Balık lenfositlerinin birincil işlevi, antikor üretimi yoluyla spesifik bağışıklık sistemini korumaktır. Periferik kanda görülen çekirdekli agranüler hücredir. Lenfositler sıklıkla balıkların periferik kan filmlerinde en bol bulunan lökositlerdir. Lenfosit konsantrasyonunda bir azalma, stres tepkileri gibi dolaşımdaki lenfositlerin sayısını azaltan koşullardan kaynaklanır. Normale dönen lenfosit konsantrasyonundaki azalma, tedaviye ve prognoza olumlu bir yanıt olduğunu gösterir. Lenfositler, balıkların humoral ve hücre aracılı bağışıklığında önemli bir rol oynar. Teleost balıklardaki B lenfositleri, memeli B-1 hücreleriyle aynı şekilde işlev görür ve immünoglobulin M (IgM) üretir. Bu nedenle, lenfositöz immünojenik stimölasyonu düşündürürken, lenfopeni stres veya aşırı ekzojen glukokortikosteroidler gibi immünosupresif koşulları düşündürür. İlginç bir şekilde, teleost balıklardan elde edilen B lenfositleri de fagositik ve mikrobisidal aktivite gösterir. Bakteriyel septisemiler genellikle balıkları etkiler ve belirgin lökopeni ve lenfopeni ile sonuçlanır. Balıklarda stres tepkisine neden olan uzun süreli fotoperiyot ve yüksek su sıcaklığı gibi çevresel koşullar da lenfopeni ile ilişkili lökopeni ile sonuçlanacaktır. Lenfositöz, immünojenik uyarımı düşündürür ve lenfopeni, stres veya aşırı ekzojen glukokortikosteroidler gibi immünosupresif koşulları düşündürür (Öntaş ve ark., 2020).

Monositler

Diğer lökosit hücreleri gibi savunma görevleri vardır. Mikropları, ölü veya hasta hücreleri fagosite ederler. Enfeksiyonlarda sayısı artar. Monositler ve makrofajlar, balıkların birincil fagositik hücreleri gibi görünmektedir. Balık monositleri ayrıca salındıklarında melanozomları fagositize edebilir. Çevresel kontaminasyona bağlı olarak gelişen fizyolojik stresin teşhisi ve organizmanın hücresel düzeydeki genel savunma yanıtlarının ölçülmesi noktasında, söz konusu parametreler belirleyici birer indikatör işlevi görmektedir (Caruso ve ark., 2005).

Granülositler

Lökosit ailesinin önemli bir parçası olan granülositler, enfeksiyöz ajanlar ve alerjenlerle mücadelede özelleşmiş üç temel hücre tipine ayrılırlar. Genel olarak fagositik karakter sergileyen bu hücreler, patojen istilası du-

rumunda sayısal artış göstererek savunma mekanizmasını mobilize ederler. Nötrofiller: Organizmaya sızan mikroorganizmaları “yutma” (fagositoz) yoluyla etkisiz hale getirerek birincil koruma kalkanını oluştururlar. Balık fizyolojisinde nötrofiller; sadece fagositoz yapmakla kalmaz, aynı zamanda kemotaksis (patojene yönelme) ve respiratuvar patlama (yıkım) mekanizmaları aracılığıyla güçlü bakterisidal (bakteri öldürücü) aktivite sergilerler. Eozinofiller: Özellikle paraziter enfeksiyonlarda ve alerjik yanıtların gelişiminde sayıları artış gösterir. Bu hücreler, alerjik reaksiyonların hem oluşumunda hem de modülasyonunda aktif rol üstlenirler. Bazofiller: Belirli bakteri ve parazit gruplarını fagosite ederek kendi iç yapılarında imha ederler. Ayrıca, enflamatuar süreçlerin kilit molekülü olan histamin salınımını gerçekleştirerek bağışıklık yanıtını koordine ederler.

Balık türlerine özgü bulgular sucul canlılarda granülosit dağılımı türler-e göre farklılık gösterse de, örneğin sazan (*Cyprinus carpio*) gibi türlerde her üç granülosit tipinin (nötrofil, eozinofil, bazofil) eş zamanlı olarak bulunduğu saptanmıştır.

Genel olarak, stresin balıkların lökogramı üzerindeki etkisi, lenfopeni ve göreceli granülositoz (heterofili veya nötrofili) ile birlikte bir lökopeni olarak kendini gösterir, çünkü lenfositler çoğu balığın periferik kanındaki baskın lökosittir. Stresle ilişkili hematolojik değişiklikler, stres etkeninin ortadan kaldırılmasından sonra birkaç gün devam edebilir. Granülosit konsantrasyonundaki bir başlangıç artışı veya normale dönen lenfosit konsantrasyonundaki azalma, tedaviye olumlu bir yanıt ve iyi bir prognoza işaret eder (Farahi ve ark., 2010).

Nötrofiller

Gökkuşağı alabalığı (*Onchorhynchus mykiss*) ve koho somonu (*Onchorhynchus kisutch*) gibi alabalıklarda bu nötrofiller, çoğu kemikli balıkta olduğu gibi baskın granülosittir. Kemikli balıkların periferik kanında eozinofiller ve bazofiller nadirdir. Stres altında artar, septisemi (enfeksiyonun kan dolaşımına katılıp tüm vücuda yayılması), mikotik enfeksiyonlar ve şiddetli doku nekrozu gibi ciddi, sistemik hastalıklarla ilişkilidir. Ayrıca, nötrofil sayısındaki artış, kirliliğe maruz kalmaktan kaynaklanan akut stresin önemli bir göstergesi olarak tanımlanmıştır. Balık nötrofilleri, solunum patlamasının ve nötrofillerde bulunan peroksidazın fagositoz sırasında mikrobiyal öldürme aktivitesine katkıda bulunduğu bir dizi reaktif oksijen türü üreterek bakterileri öldürmek için enflamatuar bölgelere göç eder (Kanter, 2015).

Eozinofiller

Eozinofiller, kemikli balıkların kan filmlerinde nadiren rapor edilir. Balıkların periferik kanında artan bir eozinofil konsantrasyonu, parazitik enfeksiyonlar veya antijenik stimülasyon ile ilişkili bir inflamatuvar yanıtı düşündürür.

Bazofiller

Bazofiller, kemikli balıkların periferik kanında nadirdir ve sadece birkaç türde bildirilmiştir.

Trombositler

Balıkların kanı, diğer omurgalılarda olduğu gibi, yaralanmaya tepki olarak pıhtılaşır. Bununla birlikte, balıklardaki hız ve etkinlik değişkendir. Kemikli balıklarda pıhtı oluşumu genellikle 5 dakika içinde gerçekleşir. Balık trombositleri, araşidonik asidi, varsa çok az tromboksan oluşumu ile prostaglandinlere dönüştürürken, tromboksan, memelilerde trombosit agregasyonunun güçlü bir indükleyicisidir. Balıklardaki glukokortikoid fazlalığı, trombosit konsantrasyonunu düşürme ve pıhtılaşma süresini artırma eğilimindedir. Uzun süreli fotoperiyot ve yüksek su sıcaklığı gibi çevresel stres faktörleri trombopeniye neden olur. K vitamini eksikliğinde uzamış pıhtılaşma süreleri de ortaya çıkar. Akut ve kronik stres, trombositozu neden olabilir ve pıhtılaşma süresini azaltabilir. Trombositler, kanın pıhtılaşma sürecini başlatan kritik bir bileşen olan tromboplastin enziminin sentezinden sorumludur. Bu hücrelerin sayısal olarak yetersizliği (trombositopeni), organizmada kanamaya karşı direncin azalmasına, pıhtılaşma süresinin uzamasına ve kanama eğiliminin belirginleşmesine neden olur (Temelli ve Öztaş, 2002).

Dolaşımdaki trombosit miktarı, çeşitli patolojik durumlara bağlı olarak dalgalanma gösterir. **Trombositoz (Artış):** Akut gelişen enfeksiyonlar ve demir eksikliği anemisi gibi tablolarda trombosit sayısında yükselme gözlenir. Bu artışın genellikle organizmanın savunma kapasitesindeki güçlenmeye paralel bir seyir izlediği kabul edilir. **Trombositopeni (Azalış):** Bazı spesifik enfeksiyonlar ve hematopoietik (kan yapıcı) sistemin baskılanması sonucunda hücre sayısı düşer. Bu durumun temelinde; dalakta üretimin yavaşlaması, hücrelerin dalakta tutulması veya kanın dolaşımı (seyrelmesi) gibi faktörler yatabilir. Yaygın damar içi pıhtılaşması veya immün kökenli trombositopenilerde, periferik kan dolaşımındaki trombositlerin hızlı tüketimi ve yıkımı söz konusudur.

Ortalama Trombosit Hacmi (MPV)

Trombositopenilerin altında yatan nedenlerin ayırıcı tanısında MPV (Ortalama Trombosit Hacmi) parametresi kritik bir veri sağlar. Miyeloproliferatif hastalıklar ve yıkıma bağlı gelişen trombositopenilerde MPV değerinin arttığı saptanmıştır. Bu parametre, kemik iliğinin trombosit üretme kapasitesini ve dolaşımdaki hücrelerin büyüklüğünü yansıtarak hastalıkların birbirinden ayırt edilmesine yardımcı olur.

Plateletkrit (PCT)

Literatürde PCT olarak tanımlanan plateletkrit, dolaşımdaki trombositlerin toplam kan hacmi içindeki yüzdesel kapladığı alanı ifade eder. Bu değer, trombositlerin kan dokusundaki hacimsel oranını belirlemekle birlikte, klinik teşhis süreçlerinde genellikle tek başına yeterli bir veri sunmaz; mutlaka diğer hematolojik parametrelerle korele edilerek yorumlanmalıdır (Altınterim ve Aksu, 2020).

Trombosit Dağılım Genişliği (PDW)

PDW parametresi, kanda bulunan trombositlerin boyut ve çap açısından sergilediği değişkenliği (heterojenliği) ölçer. Bu veri, hücre sayısı ile pıhtılaşma mekanizması arasındaki ilişkinin analizi için diğer kan değerleriyle entegre şekilde kullanılır. Trombosit fizyolojisinde hücrelerin yaşı ile hacmi arasında ters yönlü bir ilişki mevcuttur; yeni üretilen genç trombositler normalden büyük bir yapı sergilerken, dolaşımda zaman geçirmiş yaşlı hücreler daha küçük boyutlara sahiptir. Test sonuçlarında PDW değerinin referans aralığının üzerine çıkması, genellikle vücutta aktif bir enflamatuvar süreç olduğunu veya organizmanın anemik bir tabloyla mücadele ettiğini gösterir. PDW seviyesinin normalden düşük olması, doğrudan kan yapıcı (hematopoietik) organların fonksiyonel durumuyla ilgilidir. Bu durum, kemik iliği veya ilgili organlarda trombosit üretimini sekteye uğratan sistemik bir bozukluğun habercisi olabilir.

Büyük Trombosit Oranı (P-LCR)

P-LCR parametresi, dolaşımdaki toplam trombosit popülasyonu içerisinde hacimsel olarak büyük olan hücrelerin oranını temsil eder. Trombositlerin yaşam döngüsünde yaş ile boyut arasında ters bir orantı bulunur; genç hücreler daha hacimliken, yaşlandıkça boyutları küçülür. P-LCR değerinin yüksek çıkması, organizmada trombosit üretiminin hızlandığına işaret eder. Literatürde “stres trombositleri” olarak da adlandırılan bu büyük hücrelerin artışı, tüketilen trombositlerin yerine yenilerinin hızla sentezlendiğini gösterir.

Ortalama Trombosit Hacmi (MPV)

MPV, kan örneğindeki trombositlerin ortalama büyüklüğünü ölçerken; PDW bu hücrelerin boyut açısından ne kadar homojen (tekdüze) olduğunu analiz eder. Bu iki verinin birlikte incelenmesi, trombosit sayısındaki dalgalanmaların altında yatan fizyolojik nedenleri belirlemek için elzemdir. Yüksek MPV (↑): Trombosit üretim süreçlerinin hızlandığını veya periferik kanda yoğun bir yıkım/tüketim süreci (pıhtılaşma sorunları vb.) yaşandığını gösterir. Vücut, yıkımı kompanse etmek için dolaşıma daha büyük ve genç hücreler salar. Düşük MPV (↓): Genellikle dalaktaki trombosit üretimiyle ilgili işlevsel bir aksaklığın belirtisidir. Hematolojik değerlendirmelerde, hem MPV değerinin hem de toplam trombosit sayısının (PLT) aynı anda referans değerlerin altında kalması, kemik iliği yetmezliği ile karakterize olan Aplastik Anemi riskini güçlü bir şekilde ortaya koyar.

Kan örneği alma

Balıklarda kan alım bölgeleri; en yaygın olanı kaudal kuyruk damarlarıdır. Balık kanı kolayca hemolize olur ve en iyi toplama sonuçları küçük (1-3 mL) bir şırınga ile elde edilir. Vacutainer sistemi ile daha büyük kan örnekleri başarıyla alınabilir. Pediatrik boyutlu tüpler (0,5 ml) çoğu balık için ideal bir boyuttur. Salmonid, cyprinid ve mersin balığı kan hücreleri morfolojiyi en iyi heparin ile korurken, yayın balığı, levrek, tilapia ve pacu hücreleri etilendiamintetra asetik asitte (EDTA) en iyi şekilde korur. Balıkların 20 saniye kadar kısa bir süre tutulması, hemokonsantrasyona ve eritrositlerin şişmesine neden olan katekolaminlerin salınmasına neden olur. Kan örnekleri (EDTA'lı, heparinli) mekanik karıştırıcıda en az 2 dakika karıştırılmalı, aksi takdirde pıhtı oluşur. Kan örnekleri +4 °C'de 24 saat süre ile korunabilir. Nakil edilecek örnekler buzdolabında bekletildikten sonra buz aküler ile nakil edilebilir. Taze kan örnekleri direkt buz akü ile nakil edilemez.

Balıklarda İmmün Sistem

Balıkların immünolojik yapısı, memelilerle önemli benzerlikler sergilemekle birlikte kendine has özellikler taşır. Bu sistemin merkezinde üç ana organ yer alır:

- **Timus:** Solungaçların sırt-yan (dorso-lateral) kısmında konumlanan bu lenfoid organ, T-lenfositlerin olgunlaşma merkezidir. Temel görevi, yabancı antijenleri tanıyabilen hücrelerin çoğalmasını sağlamak ve vücudun kendi dokularına saldırabilecek lenfositleri elimine ederek immün toleransı korumaktır.

- **Böbrek (Ön ve Arka):** Omurganın her iki yanına uzanan bu organ, balıklarda hayati bir savunma merkezidir. Özellikle **ön böbrek**, yüksek omurgalılarıdaki kemik iliğinin işlevsel muadili olarak kabul edilir; yoğun hematopoetik aktivite gösterir ve antikor üretiminin birincil sahasıdır.
- **Dalak:** Beyaz ve kırmızı pulpa yapılarından oluşur. Kırmızı pulpa, organın büyük kısmını kaplar ve içinde barındırdığı makrofaj ile lenfosit popülasyonları sayesinde kanı filtreleyerek savunmaya katılır.

Spesifik (edinsel-kazanılmış) immün sistem: balıklarda spesifik bağışıklık yanıtı, B-lenfositlerinin farklılaşmasıyla üretilen ve glikoprotein yapısında olan immünoglobulinler (antikorlar) aracılığıyla yürütülür (Ocak, 2006).

- **Antikor Dağılımı:** Antikorlar balıkların serumunda, mukus tabakasında, doku sıvılarında ve sindirim yolunda bulunur.
- **İmmünoglobulin Tipleri:** Memelilerde beş farklı sınıf (IgG, IgM, IgA, IgE, IgD) tanımlanmışken, balık türlerinde varlığı kesin olarak ispatlanmış ana sınıf IgM'dir.

Non-Spesifik (doğuştan) immün sistem Enfeksiyonlara karşı ilk bariyeri oluşturan bu mekanizma; deri, mukus ve çeşitli fagositoz yapan hücreleri kapsar.

- **Deri ve Mukus Bariyeri:** Balık epidermisi, memelilerin aksine keratin içermez. Bunun yerine patojenlerin girişini engelleyen sağlam bir epitel örtüsü ve sürekli hareket halindeki mukus tabakası ile korunur. Mukus; içerisinde lektinler (pentraksin gibi), kompleman proteinleri ve antibakteriyel peptitler barındırarak biyokimyasal bir savunma hattı oluşturur.
- **Gastrointestinal Sistem:** Midenin düşük pH seviyesi ile salgıladığı pepsin, tripsin ve safra gibi enzimler, sindirim yoluyla gelebilecek patojenlere karşı bariyer görevi görür.
- **Hücrel Savunma (Fagositler ve NCC):** Non-spesifik yanıtın ana unsurları granülositler ve monosit/makrofajlardır. Balıklar-daki Non-spesifik Sitotoksik Hücreler (NCC), memelilerdeki Doğal Öldürücü (NK) hücrelerin fonksiyonel karşılığıdır.

Makrofajlar ve nötrofiller vücudun temizlik ve savunma birimleridir. Makrofajlar dokularda (karaciğer, dalak, lenf) yoğunlaşarak hücrel atıkları ve patojenleri temizlerken; nötrofiller daha hızlı ancak kısa sü-

reli bir yanıt verirler. Bir patojenle karşılaşıldığında fagositik hücrelerin oksijen tüketimi aniden artar. Kemotaksis ile başlayan bu süreç, süperoksit radikallerinin (O_2^-) aktivasyonu ile karakterizedir. Bu metabolik sıçrama, yutulan mikroorganizmaların imha edilmesini sağlayan temel mekanizmadır (Kilercioğlu, 2021).

Doğal (non-spesifik) bağışıklık sistemi:

Doğal bağışıklık sistemini anlatan bu bölüm, iThenticate raporlarında sıklıkla yüksek benzerlik veren standart tanımlar içerir. Bu oranı %9'un altına çekmek için ifadeleri daha teknik, akademik ve özgün bir kurguyla yeniden yapılandırdım. Doğal bağışıklık, organizmanın patojenlere karşı doğuştan sahip olduğu, ilk savunma hattını oluşturan statik bir sistemdir. Bu sistemin en belirgin özellikleri şunlardır. Zararlı etkenlere karşı dakikalar içinde aktive olarak çok süratli bir tepki geliştirir. Spesifik bağışıklığın aksine bir "immünolojik hafıza" barındırmaz; dolayısıyla aynı antijenle tekrar karşılaşıldığında yanıtın şiddetinde veya hızında bir artış gözlenmez. Vücudun dış kaynaklı saldırılara karşı sürekli bir savunma durumunda kalmasını sağlar. Doğal Bağışıklığın Temel Savunma Faaliyetleri Sistem, mikroorganizmaların istilasına karşı çeşitli biyolojik ve fiziksel bariyerler kullanarak direnç gösterir. İstilacı bakteriler ve diğer patojenik unsurlar, dolaşımdaki lökositler ile dokularda yerleşik makrofaj sistemi tarafından yutularak (fagositoz) etkisiz hale getirilir. Ağız yoluyla vücuda giren mikroorganizmalar, midenin düşük pH'lı asidik ortamı ve güçlü sindirim enzimleri aracılığıyla parçalanır. Deri ve mukozal yapılar, mikroorganizmaların doku derinliklerine sızmasını engelleyen mekanik bir kalkan görevi görür. Kan plazmasında bulunan çeşitli kimyasal araçlar, yabancı toksin ve organizmalara bağlanarak onların patojenik etkilerini nötralize eder (Altınterim ve Aksu, 2019c).

Doğal bağışıklık sistemi, balıkların bağışıklık savunmasında birinci derecede önemlidir. Bu yaygın olarak 3 bölüme ayrılır: (1) fizyokimyasal bariyerler ve epitelyal ve mukozal bariyer, örneğin pullar, epitel yüzeyi (solungaçlarda, deri ve bağırsaklarda) salgılanmış mukus, (2) kompleman hücre sekresyonları, CRP, IFN, lizozim, transferrin, lektinler, antimikrobik peptitler ve (3) Hücresel Elemanlar ve Fonksiyonel Gruplar Organizmanın savunma mekanizması, farklı görevlerde özelleşmiş bir dizi hücresel bileşenden meydana gelir. Bu yapılar temel olarak; spesifik olmayan sitotoksik hücreler (memelilerdeki NK hücreleri ile eşdeğerdir), lenfositler, trombositler, granülositler (başlıca nötrofiller) ve monosit/makrofaj serisinden oluşur. Hücrelerin Doku ve Organlardaki Dağılımı Savunma hücrelerinin vücut içerisindeki yerleşimleri, bağışıklık yanıtının etkinliği açısından stratejik bir öneme sahiptir: Makrofajlar: Vücudun pek çok dokusuna yayılmış olmakla birlikte; filtrasyon ve temizleme görevi gere-

ği özellikle dalak, karaciğer ve lenf düğümlerinde yoğun bir popülasyon sergilerler. Nötrofiller: Fagositik kapasitesi yüksek olan bu hücreler, balık fizyolojisinde temel olarak böbrek dokusunda konumlanmışlardır; dalak içerisinde ise daha sınırlı miktarda gözlenirler. Fagositik hücrelerin ikincisi olan nötrofiller balıklarda böbreklerde ve az miktarda dalakta görülürler. Teleostlarda, ön, baş böbrek sadece erken aşamada böbrek fonksiyonuna sahiptir, hematopoez bölgesini barındırır. Ayrıca baş böbrek, antikor üretimi için ana bölgedir ve parankimdeki melanomakrofaj birikimleri, antijenleri uzun süre tutabilir. Baş böbreği, tümü yabancı maddeye karşı bağışıklık tepkisi indükleyebilen lenfositler (T hücresi reseptör genleri), makrofajlar/monositler ve granülositler dahil olmak üzere çeşitli hücre tiplerini içerir. B-hücreleri, spesifik humoral savunma mekanizmalarında yer alan antikorları üretir ve salgılar (Altınterim, 2011).

Edinilmiş (Spesifik) Bağışıklık Sistemi ve Bileşenleri

Edinilmiş bağışıklık, organizmanın yaşam döngüsü boyunca karşılaştığı antijenlere karşı geliştirdiği, sonradan kazanılan bir savunma sistemidir. Doğal bağışıklığın aksine, bu sistemde hedef alınan patojene özgü bir yanıt stratejisi izlenir. Sistemin en karakteristik özelliği “immünolojik hafıza” geliştirmesidir. Aynı patojenle tekrar karşılaşıldığında, hafıza hücreleri sayesinde savunma mekanizması ilk temasa oranla çok daha seri ve etkili bir tepki verir. Yanıtın olgunlaşması günler ya da haftalar sürebilen kademeli bir süreçtir. Antijen yoğunluğuna paralel olarak savunma kapasitesi de artış gösterir. Sistemin ana unsurlarını T ve B lenfositleri ile bu hücreler tarafından sentezlenen, istilacı mikroplara yüksek spesifite gösteren immünoglobulinler (antikorlar) oluşturur. Edinsel bağışıklık iki kısma ayrılır.

1. Humoral Bağışıklık (Antikor Aracılı Savunma) Humoral immünitinin temel aktörleri B lenfositleridir. Bu hücreler, memeli canlılarda kemik iliğinde gelişirken, balık fizyolojisinde böbrek dokularında üretilirler. B-Lenfosit: Antikor üretimi yoluyla hücre dışı patojenleri tanıyıp etkisiz hale getirirler. Salınan antikorlar; kan dolaşımı, solunum yolları ve sindirim kanalı gibi mukoza içeren bölgelerde hem patojenleri hem de salgıladıkları toksinleri nötralize ederler. B hücreleri, antikor üretiminden sorumlu plazma hücrelerine ve gelecekteki olası enfeksiyonları hatırlayacak olan bellek hücrelerine dönüşürler. Balık serumunda baskın olarak bulunan sınıf IgM'dir. Ayrıca Gökkuşaağı alabalığı gibi türlerde IgM ve IgD'nin solungaç yüzeylerinde kritik bir koruyucu bariyer oluşturduğu saptanmıştır.

2. Hücresel Bağışıklık (Hücre Aracılı Savunma) Özellikle hücre içi enfeksiyonların (virüsle enfekte hücrelerin) ve anormalleşmiş hücrelerin

imha edilmesinde hücresel bağışıklık stratejisi ön plandadır. T-Lenfositlerin Rolü: Balıklarda CD4 ve CD8 T hücreleri bu süreçte aktif görev üstlenir. T-lenfositler dar bir çerçevede sadece mikrobik antijenleri tanırken, B hücre kaynaklı antikorlar lipid, karbonhidrat ve protein yapılı pek çok farklı molekülü tanıma kapasitesine sahiptir. Teleost balıklarında savunma hücreleri; timus, böbrek, dalak gibi lenfoid dokular ile mukoza ilişkili hematopoetik alanlar tarafından sentezlenir.

Balıklarda hematopoez, B hücreleri, monositler, makrofajlar ve granülositler üreten böbreklerde meydana gelir; T lenfositlerini üreten ve olgunlaştıran timusta; ve lenfositler ve makrofajlar üreten dalakta. Ek olarak, mukoza ile ilişkili lenfoid dokular makrofajlar, lenfositler, mast hücreleri ve granülositler üretir. Eozinofiller, iltihaplanma ve degranülasyon yoluyla hücresel savunma sürecinde etki gösterirler ve bağ dokusunda, özellikle solungaçlarda, gastrointestinal sistemde ve parazit istilası olduğunda kan dolaşımında dağılırlar. Bazofiller çoğu balıkta nadirdir.

Stres, bağışıklık ve inflamatuvar yanıtlar: Stres yanıtı sırasında immün yetmezlikteki değişiklikler

Stres yanıtının ilk aşamasındaki akut yanıtlar, doğuştan gelen bağışıklığı arttırırken, daha uzun süreli stres koşulları, bağışıklık yeterliliğini azaltır. Stres sisteminin aktivasyonu, stres etkeninden saniyeler sonra, otonom sinir sisteminin sempatik bölünmesinin hipotalamusta aktivasyonu ve daha sonra üzerinde bulunan kromaffin hücreleri (adrenal bez ile böbrek doku iç içedir adrenal bez yoktur) tarafından katekolaminler= Nörotransmitterler (adrenalin ve noradrenalin ve daha düşük miktarda dopamin) salınımı yoluyla gerçekleşir. Merkezi sinir sistemi, daha yüksek sinir merkezleri aracılığıyla, hipotalamusun preoptik çekirdeğindeki nöronları kortikotropin salgılatıcı hormon (CRH) üretmesi için uyarır. Bu nöronlar hipofiz bezine yansır ve bezin ön kısmındaki hücreler tarafından kortikotropin (ACTH) salınımını uyarır. ACTH, kana salındığında, interrenal hücreleri glukokortikoidler, özellikle kortizol üretmesi için uyarır, bunlar katekolaminlerle birlikte organlarda ve dokularda ikincil adaptif tepkileri organize etmede rol oynar. Stres yanıtı ayrıca baş böbrekteki reseptörlerinin mRNA seviyelerini etkiler. Stresörlere maruz kaldıktan sonra saniyeler ila dakikalar içinde salınan hormonlar, hayvanın enerji ihtiyacını karşılamak için metabolik ve osmoregülatuar değişiklikleri tetikler. Dolaşımdaki glikoz seviyelerindeki artış, başlangıçta ve kısmen, hepatik glikojen yıkımı üzerindeki katekolamin etkisinden kaynaklanmaktadır. Glikoz balıklar için birincil enerji kaynağıdır ve öncelikle beyin ve kasların “savaş ya da kaç” ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılır. Katekolaminler artan brankial kan akışı, brankial oksijen yayma kapasitesi ve kanın artan oksijen taşıma kapasitesi dahil olmak üzere kar-

diyak ve solunum fonksiyonlarını düzenler. Kortizol, yüksek kan şekeri seviyelerini korumak ve hepatik glikojen seviyelerini geri kazanmak için gereklidir. Kortizolün, balıkların tatlı suya alışması için önemli bir hormon olduğunu ve hem glukokortikoid hem de mineralokortikoid etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Kortizolün mineralokortikoid işlevleri, solungaçlarda, bağırsaklarda ve böbreklerde Na-K ATPaz aktivitesinin uyarılmasıyla ortaya çıkar (Temiz ve ark., 2021).

Stres etkeni akut bir yapıya sahipse, balıklar için ciddi sonuçlar olmaksızın homeostaz geri kazanılabilir; bununla birlikte, kronik bir yapıya sahip stresörler, fizyolojik tükenme, düşük büyüme ve üreme kapasitesi hızı ve bağışıklık fonksiyonlarının ciddi şekilde bozulması ile organizmanın enerji depolarını tehlikeye atmasına neden olur. Balığın savunma sistemindeki bozulma, balıkların sağlığını, esenliğini ve hayatta kalmasını etkiler ve yaygın olarak ortaya çıkan hastalıklarla birlikte.

İmmün uyarıcılar tarafından bağışıklık sisteminin modülasyonu

Bağışıklık sistemini modüle eden ve balıkların bağışıklık yeterliliğini geliştiren diğer maddeler, spesifik veya spesifik olmayan mekanizmaların aktivasyonunu teşvik edebilen bağışıklık uyarıcılardır. Çeşitli araştırmalar, bazı bitkilerin, çeşitli balık türlerinde bağışıklık tepkilerini uyarma ve bakteri istilasına karşı koruma sağlamadaki etkinliğini göstermiştir. Sarımsağın *Aeromonas hydrophila* enfeksiyonuna karşı koruyucu etkisi ve nötrofiller tarafından artan oksidatif radikal üretimi, lenfositlerin çoğalması ve sefalik böbrek makrofajlarının fagositik aktivitesi gibi doğuştan gelen bağışıklık savunmasını uyarıcı etkisi balıklarda gösterilmiştir. Ksenobiyotikler ROS oluşumunu, antioksidan savunmaları veya her ikisini de etkileyebilir. Balıklar için, laboratuvar ve biyoizleme çalışmaları genellikle karaciğer, beyin, solungaçlar ve kas gibi küçük bir olası hedef organ grubunu araştırır. Karaciğer, ksenobiyotiklerin ve farklı toksik metabolitlerin detoksifikasyonunda yer alan ana organdır, dolayısıyla çok güçlü bir antioksidan cephaneliğine ve GST'ler gibi biyotransformasyon enzimlerine sahiptir. Karaciğer daha önce bağırsaklardan ve daha düşük oranda solungaçlardan emilmiş olan ksenobiyotikleri alırken, solungaçlar doğrudan suya maruz kalır ve geniş bir yüzey alanına ve geçirgenliğe sahiptir. Beynin yüksek oksijen tüketim hızına sahip olması, zarlarının yüksek oranda oksitlenebilir çoklu doymamış yağ asitleri ile zenginleştirilmiş olması, demir içeriğinin yüksek olması ve bazı birinci basamak antioksidan enzimlerin (SOD, CAT ve GPx), yüksek oksijen tüketimi olan diğer dokulara göre nispeten daha düşüktür. Ayrıca, birçok nörotransmitter, ootoksida olabilen moleküllerdir. Örneğin, dopamin ve noradrenalin moleküler oksijen ile reaksiyona girerek ROS ve aktif kinonlar üretebilir.

KAYNAKLAR

- Akdemir, F. (2023). Alabalık Yemlerine Farklı Oranlarda İlave Edilen Siyah Asker Sineği Larvası (*Hermetia illucens*)'nın Büyüme Performansı ve Bazı Kan Parametreleri Üzerine Etkileri. Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 16(1), 27-32.
- Alsaran, M. (2016). *Sapanca Gölü'nde yaşayan sazan balığının (cyprinus carpio) Biyolojisi ve Hematolojik Parametrelerinin Belirlenmesi* (Order No. 29178481). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Altınterim, B. (2011). Balık İmmünolojisi, Bitkisel ve Kimyasal İmmünostimulantlar. Journal of the Institute of Science and Technology, 1(4), 69-76.
- Altınterim, B. (2019a). Influence of macerated fenugreek (*Trigonella foenum graecum*) oil added to trout feed at the different rates on the feed conversion rate (FCR), body length, blood parameters and nitroblue tetrazolium (NBT) values of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Cellular and Molecular Biology, 65, 89-93.
- Altınterim, B. and Aksu, Ö. (2019b). Influence of macerated and cold press wheat germ (*Triticum vulgare*) oils added at different rates to trout feed on the feed rate (FCR), haematology parameters and NBT (Nitroblue tetrazolium) values of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). International Journal of Pure and Applied Sciences, 5, 72-77.
- Altınterim, B. and Aksu, Ö. (2019c). Effect of macerated tomato (*Lycopersicon esculentum*) and carrot (*Daucus carota*) oils on hematological parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) at high stocking density. International Journal of Pure and Applied Sciences, 5, 85-90.
- Altınterim, B. and Aksu, Ö. (2020). Effects of oils of macerated garlic (*Allium sativum*) and macerated Tunceli garlic (*Allium tuncelianum*) on some hematological parameters and NBT (Nitro blue tetrazolium) levels of (*Oncorhynchus mykiss*) at high stocking density. Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology, 21, 716-723.
- Altınterim, B., Aksu, Ö., & Şen, M. (2018). Sağım Döneminde Alabalıkların Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Kan Parametrelerinin Araştırılması. International Journal of Veterinary and Animal Research, 1(3), 13-15.
- Altınterim, B., Şen, M. and Aksu, Ö. (2018d). Investigation of changes in the weight and blood parameters of trout (*Oncorhynchus mykiss*) during mating period. International Journal of Veterinary Science, 1, 13-15.
- Altun, S., & Diler, Ö. (1999). Some Haematological Parameters of the Rainbow Trouts Experimentally Infected with *Yersinia ruckeri*. Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences 23 (4): 301-310.
- Aly, S. M., & Mohamed, M. F. (2010). Echinacea purpurea and Allium sativum as immunostimulants in fish culture using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Journal of animal physiology and animal nutrition, 94(5), e31-e39.

- Aly, S.M. and Mohamed, M.F. (2010). ORIGINAL ARTICLE: *Echinacea purpurea* and *Allium sativum* as immunostimulants in fish culture using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 94: e31-e39.
- Amirkolaie, A.K., Dadashi, F., Ouraji, H., Khalili, K.J., (2015). The potential of tomato pomace as a feed ingredient in common carp (*Cyprinus carpio* L.) diet. Journal of Animal and Feed Sciences, 24: 153-159.
- Benfey, T.J. and Biron, M. (2000) Acute Stress Response in Triploid Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*). Aquaculture, 184, 167-176.
- Benfey, T.J., Biron, M. (2000). Acute stress response in triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*). Aquaculture, 184(1-2):167-176.
- Caruso, G., Genovese, L., Maricchiolo, G., Modic, A. (2005). Haematological, biochemical and immunological parameters as stress indicators in *Dicentrarchus labrax* and *Sparus aurata* farmed in off-shore cages. Aquaculture International, 13:67-73.
- Çınar, A., Bayıroğlu, F., & Kılıçalp, D. (1996). The Blood Parameters of İnci Kefal (*Chalcalburnus tarichi*, Pallas 1811) in Van Lake. Eurasian Journal of Veterinary Sciences, 12(2), 65-68.
- Farahi, A., Kasiri, M., Sudagar, M., Iraei, M.S. and Shahkolaei M.D. (2010). Effect of garlic (*Allium sativum*) on growth factors, some hematological parameters and body compositions in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), AACL Bioflux, 3, 4, 317-323.
- Kanter, A. G. (2015). Kızılırmak nehrinde yayılış gösteren bazı balık türlerinin periferik kan hücrelerinin incelenmesi (Order No. 31771483). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Kılınç, N.F., Besler, H.T. (2025). Zayıflama Diyetlerinde Kullanılan Balık Yağının Vücut Bileşimi, Plazma Leptin Düzeyleri ve Kan Basıncı Üzerine Etkisi. Bes Diy Derg [Internet]. 15 Nisan 2013 [a.yer 19 Aralık 2025];41(1):42-9.
- Kilercioğlu, S. (2021). Balıklarda bağışıklık sistemi, mukozal bağışıklık ve IL-1 β , IL-18 ve TNF- α proenflamatuvar sitokinlerinin işlevleri. Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 38(1), 125-134.
- Küçük A., & Yıldırım, Y. (2017). Balıkların Önemli Viral Hastalıkları. Etlik Veteriner Mikrobiyoloji Dergisi, 28(1), 13-22.
- Ocak, F. (2006). Balıklarda Lenfoid Organlar ve İmmün Sistemin Özellikleri. Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 3(1), 61-66.
- Öntaş, C., Uluköy, G., Baba, E., Mammadov, R. (2020). *Crocus cancellatus* subsp. *mazziaricus* (Herbert) Mathew Bitki Ekstraktının Avrupa Deniz Levrek Balığı (*Dicentrarchus labrax*, L.1758) Doğal Bağışıklık Sistemi Üzerine Etkisi. Acta Aquatica Turcica, 16(1), 148-157.
- Saleh, N.E. (2020). Assessment of sesame meal as a soybean meal replacement in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) diets based on aspects of growth, amino acid profiles, haematology, intestinal and hepatic integrity

- and macro element contents. *Fish Physiology and Biochemistry*, 46, 861-879.
- Talebi, M., Khara, H., Zorichzahra, J., Ghobadi, S., Khodabandelo, A., Mirrasooli, E. (2013). Study on effect of red bell pepper on growth, pigmentation and blood factors of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *World Journal of Zoology*, 8(1):17-23.
- Temelli, A., & Öztaş, H. (2002). Balık Granülositlerinin Oluşumları ve Kompozisyonları. *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22(2).
- Temiz, Ö., Aytekin, T., Coğun, H. Y., Kargın, F. (2021). Klorantraniliprol İndüklü Toksisitenin *Oreochromis niloticus* Solungaç İyon Taşınım Enzim Aktivitelerine Etkileri. *Karaelmas Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 11(1), 23-27.
- Turan, H., Kaya, Y. ve Sönmez, G. (2006). Balık etinin besin değeri ve insan sağlığındaki yeri. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 23: 505-508.
- Ural, M.S. (2013). Chlorpyrifos-induced changes in oxidant/antioxidant status and haematological parameters of *Cyprinus carpio carpio*: Ameliorative effect of lycopene. *Chemosphere*, 90:2059-2064.

Bölüm 17

TÜRKİYE'DE KÜLTÜRÜ YAPILAN DENİZ BALIKLARININ PARAZİTER HASTALIKLARI

Ahmet ÖZER¹

¹ Prof. Dr., Sinop Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, 57000, Sinop, Türkiye, aozer@sinop.edu.tr

ORCID: 0000-0002-2890-6766

1. GİRİŞ

Dünya genelinde su ürünleri üretimi temelde avcılık ve yetiştiricilik faaliyetleri yoluyla sağlanmaktadır. Türkiye de bu küresel eğilimin bir parçası olarak, uzun yıllar boyunca su ürünleri üretimini büyük ölçüde avcılık temelli sürdürmüştür; ancak son yıllarda kültür balıkçılığındaki belirgin artışla birlikte bu yapı önemli ölçüde değişim göstermiştir. Türkiye’de toplam su ürünleri üretimi 2024 yılı itibarıyla 933.194 ton olarak kaydedilmiştir. Bu üretimin 356.070 tonu avcılık yoluyla elde edilirken, 577.124 tonu yetiştiricilik faaliyetlerinden sağlanmıştır. Yetiştiricilikle gerçekleştirilen üretimin %70,3’ü (405.742 ton) denizlerde, %29,7’si (171.382 ton) ise iç sularda yapılmıştır. Denizlerde yetiştirilen başlıca türlerden 165.055 ton levrek ve 155.279 ton çipura üretimi gerçekleşmiştir (TÜİK, 2024).

Türkiye’de deniz balıkları yetiştiriciliği her geçen yıl artış göstermektedir. Yaşanan bu olumlu gelişmelere karşın, üretimi sınırlandıran çeşitli faktörlerin varlığı da bilinmektedir. Bu faktörler arasında hastalıklar önemli bir yer tutmaktadır. Bakteriyel, viral, fungal ve paraziter etkenli hastalıklar; neden oldukları doğrudan ekonomik kayıpların yanı sıra, bu hastalıklara karşı uygulanan koruyucu ve tedavi edici önlemler nedeniyle de ciddi maliyetler oluşturmaktadır. Özellikle parazit kaynaklı hastalıklar, su ürünleri yetiştiriciliğinde önemli bir sorun alanı olarak öne çıkmaktadır.

Balıklarda bildirilen parazitler temel olarak Ciliophora, Euglenozoa, Metamonada, Platyhelminthes (Monogenea, Trematoda, Cestoda), Nematoda, Arthropoda, Cnidaria (Myxozoa), Acanthocephala ve Myxozoa üst taksonları içerisinde yer almaktadır. Kültür balıkçılığında rapor edilen parazitler çoğunlukla basit yaşam döngüsüne sahip olup, yaşam döngülerini yalnızca su ortamı ve konak balık arasında tamamlayabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde hızlı çoğalmakta, ara konaklara ihtiyaç duymamakta ve ciddi hastalık tablolarına yol açarak yüksek oranlı balık ölümleriyle sonuçlanabilmektedir. Bununla birlikte, çok konaklı yaşam döngüsüne sahip bazı parazit türlerinin de önemli sağlık sorunlarına neden olduğu bildirilmektedir.

Bu derleme çalışmasında, Türkiye’de deniz kültür balıkçılığında bildirilen başlıca parazitler ve bu parazitlerin neden olduğu hastalıklar ele alınmış; etkenler, klinik belirtiler ve yaşam döngüleri hakkında temel düzeyde bilgi sunularak, konu ile ilgilenen tüm paydaşlara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. TÜRKİYE DENİZ KÜLTÜR BALIKLARINDAN BİLDİRİLEN BAZI PARAZİTLER VE NEDEN OLDUKLARI HASTALIKLAR

Balıkları enfeste/enfekte eden parazitler bulundukları organlara göre dış parazitler ve iç parazitler olmak üzere iki alt grup altında yer alırlar. Balık parazitleri ayrıca yapısal taksonomik özelliklerine göre protozoa ve metazoa üst taksonu altında da konumlandırılırlar.

Balıkları enfekte eden Protozoa ve/veya Metazoa üst taksonuna ait dış parazitler; solungaçlar, yüzgeçler ve vücut yüzeyi (deri) üzerinde yerleşim göstermekte ve enfestasyonlar bu dokular üzerinde gelişmektedir. Doğal su ortamlarında yaşayan balıklarda görülen dış parazit enfestasyonları, genellikle su kalitesinin uygun olması ve konak balıkların daha seyrek dağılım göstermesi nedeniyle, hem enfestasyon prevalansı hem de parazit yoğunluğu bakımından düşük düzeylerde seyretmektedir. Buna karşın, sucul ekosistemde bulunan bazı hazırlayıcı faktörlerin etkisiyle konak balıklarda ortaya çıkan aşırı stres, daha şiddetli enfestasyonların gelişmesine yol açmakta ve bu durum balık sağlığını olumsuz etkileyen önemli bir etken haline gelmektedir. Bu bağlamda, yüksek stok yoğunluğu ve nispeten daha düşük su kalitesi ile karakterize edilen kültür balıkçılığı sistemleri, ağır ve yoğun parazit enfestasyonlarının oluşumu için elverişli koşullar sunmaktadır. Dolayısıyla, artan paraziter enfestasyon düzeyleri, kültür balıkçılığında karşılaşılan başlıca sağlık ve üretim sorunları arasında yer almaktadır.

Dünya genelinde kozmopolit olarak deniz balıklarda en yaygın görülen ve balıkların da hassas oldukları bildirilen protozoalardan dış parazit olanlarının hareketli ve silli *Trichodina* sp., *Trichodinella* sp. *Tripartiella* sp. *Uronema marinum*, *Philaster dicentrarchi*; holotrik *Cryptocaryon irritans*, ; sabit *Ambiphrya* sp., *Apiosoma* sp.; hareketli ve flagellalı *Ichthyobodo* sp. (eski yayınlarda geçtiği adıyla *Costia* sp.); dinoflagellat *Amyloodinium ocellatum* olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. Hızlı çoğalma yetenekleri sayesinde çok kısa sürede yüksek populasyon yoğunluklarına ulaşabilen bu parazitler, konak balıkların genel sağlık durumunu ciddi biçimde olumsuz etkileyebilmektedir. Yüksek stok yoğunluğu ve yetersiz su kalitesi gibi faktörlerin yol açtığı stres, konak balıkların bağışıklık direncini düşürmekte ve paraziter enfestasyonlara karşı duyarlılıklarını artırmaktadır. Bunun yanı sıra, kültür ortamlarında birim alandaki balık sayısının artması, parazitlerin konaklarla temas sıklığını yükseltmekte ve enfeksiyonun bir balıktan diğerine kolaylıkla yayılmasına olanak tanımaktadır.

2.1. TRIKODINIAZIS (TRICHODINIASIS)

Etken; *Trichodina* cinsi parazitlerdir (Şekil 1). *Trichodina* (çapı 40-60 µm) tabak şeklindedir ve kirpikleri sayesinde balıkların derisi, yüzgeçleri ve solungaçları üzerinde hareket eder. Dentikül adı verilen diş benzeri yapılarla balıkların yüzeyinde bulunan detritus ve diğer kalıntılarla beslenir. Bu dentiküller, balıkların yüzeyindeki kalıntıları parazitin ağzına doğru sıyrır. Genellikle konak seçici değildirler, ancak bazı balık türlerine özgü parazit türleri de bulunmaktadır. *Trichodinid* protozoalar, balıkları istila eden diğer dış protozoalara kıyasla nispeten zayıf patojenlerdir. Parazitlenen balıkların prognozu, parazit sayısı düşük olduğunda ve balıklar stres altında olmadığı iyidir. Ancak, bu protozoaların bazıları, özellikle kuluçkahanede yetiştirilen türlerde yüksek balık ölümüne neden olan ciddi patojenlerdir.



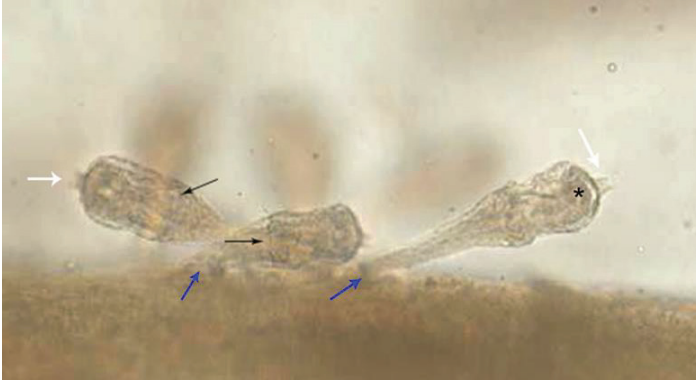
Şekil 1. Bir *Trichodina* sp. bireyinin genel görünümü (Fotoğraf: A.D.M. Dove, Kaynak: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trich2.jpg>).

Belirtiler: Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* İştahsızlık orta derecedeki yada daha ileri derecedeki enfestasyonlarda ilk görülen belirtilerdendir, etrafta bulunan balıklara ve havuz veya kafes kenarlarına sürtünebilir ve de başlarını suyun dışına çıkararak solunum yapmaya çalışırlar.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskobik Belirtiler:* Deride renk değişiklikleri ve aşırı mukus üretimi olabilir. Özellikle solungaçlar artan solunum hızı nedeniyle şişmiş, kanamalı veya aşırı mukuslu görünebilir. Tüm türlerde yüzgeç ve dikenlerin aşınmasıyla ilişkili pamuksu büyümeler oluşturabilirler. Pullarda gevşeme ve yüzgeçlerde aşınmalar oluşur, bu durum diğer bakteriyel, viral ve mantar hastalıklarına zemin hazırlayabilir.
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Yüksek sayılara ulaştıklarında solungaç dokusundaki hücre sayısında artış nedeniyle anormal şekilde büyüme olarak tanımlanan epitel hiperplazisi, alttaki hücrelerde kızarıklık, şişlik ve fonksiyon kaybının göstergesi olan enflamasyon, ileri durumlarda ise epitel nekrozu ve mukus hücrelerinde artış görülebilir. Balıklar üzerinde bu parazitlerin yoğun istilası, yüzeysel ila derin ülseratif deri lezyonlarına da doğrudan yol açabilir ve bu da etkilenen bölgede ikincil bakteriyel ve fungal enfeksiyonların gelişmesine neden olur.

2.2. SESİL PARAZİT ENFESTASYONLARI

Etken: Konak balıkların dolungaç, deri ve yüzgeçlerine tutunan, ağız ve gövdenin orta kısmında dizilmiş olan kirpikleri ve taban kısmında küçük bir sap (scopula) ile karakterize 50–95 µm x 40–61 µm boyutlarındaki *Apiosoma* (Şekil 2) cinsine ait parazitler bu enfestasyonlarda yer alırlar.



Şekil 2. Levrek balığı (*Dicentrarchus labrax*) solungaçlarındaki *Apiosoma* sp. bireyleri , beyaz oklar (peristomial kirpikler), siyah oklar (gövdeyi çevreleyen enine kirpik bantlar), mavi oklar (scopula) (Kaynak: Akpınar ve Didinen, 2020).

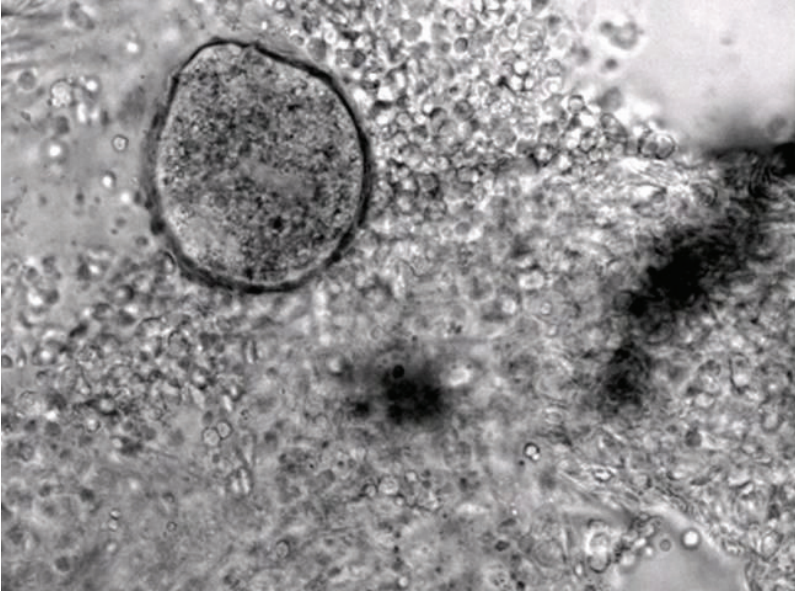
Belirtiler: Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* Klinik belirtiler arasında solunum zorluğu, denge kaybı ve iştahsızlık gibi spesifik olmayan belirtiler yer alır. Solungaçlarda yüksek miktarlarda tutunduklarında kaplamış oldukları yüzeyim büyüklüğü ve aşırı mucus salgısının fiziksel olarak gaz değişimini engelledikleri, balıkların solunum ihtiyacı karşılamak üzere solunum hızlarının arttığı ve yoğun ölümlerin bu nedenle gerçekleştiği bildirilmiştir.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskobik Belirtiler:* Konak balığın tutundukları dokularının en yüzeysel doku tabakasından beslenirler. Parazitler epitelin reaktif hiperplazisine ve mukus üretiminin artmasına neden olurlar. Hiperplazi deride bulanıklık olarak görülür ve solungaçlarda meydana gelirse hipoksiye yol açar. Bu değişikliklerin yanı sıra, solungaçlarda beyazımsı lezyonlar, pul dökülmesi, ciltte koyulaşma, cilt ve yüzgeçlerde ülserler ve kanamalı bölgeler, bakterilerle karışık enfeksiyonlarda sık görülür.
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Patolojik etkiler yoğunluğa bağlıdır; parazit popülasyonunun büyüklüğü ve doku tepkilerinin niteliği, balığın fizyolojik (klinik) duru-

mu tarafından modüle edilir. Stresli koşullar balıkların enfeksiyonla mücadele kapasitesini tehlikeye atar.

2.3. DENİZ BALIĞI BEYAZ BENEK HASTALIĞI

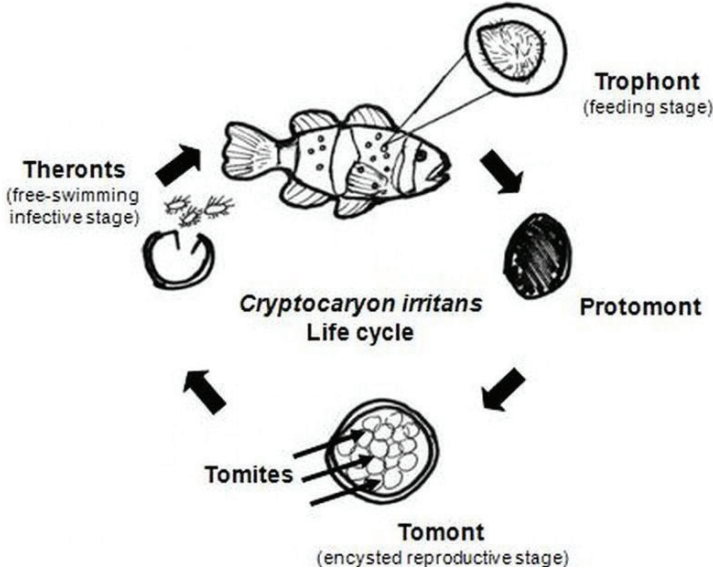
Etken: *Cryptocaryon irritans*'tır (Şekil 3). Vücut şekli oval yuvarlak elastiki olup, büyüklüğü 0.3-0.5 mm arasındadır. Bu parazit, 15 ila 30°C arasındaki sıcaklıklarda doğadaki ve kültür deniz balıklarında deniz “ich” veya deniz “beyaz benek hastalığı” olarak bilinen bir hastalığa neden olan kirpikli, protozoon bir parazittir. Balıklarda *Cryptocaryon* enfeksiyonları, dünya çapında deniz akvaryumcuları ve ticari deniz kültür balıkçılığı için önemli bir hastalık sorunudur. *Cryptocaryon*'un birçok farklı balık türünü enfekte ettiği bilinmektedir, ancak duyarlılık açısından farklılıklar olduğu görülmektedir. Enfeksiyon belirtileri, karmaşık yaşam döngüsü aşamaları ve enfeksiyon ve ölümlerin meydana gelme hızı (genellikle kültür ortamında birkaç gün içinde), tatlı su paraziti *Ichthyophthirius multifiliis*'te görülenlere birçok yönden benzerdir. Ancak, bu ikisi sadece uzak bir akrabalık içindedir ve tuzluluk toleransı ve yaşam döngüsünün süresi açısından önemli farklılıklar vardır.



Şekil 4. Solungaç dokusuyla beslenen trofont evresindeki parazit *Cryptocaron irritans* bireyi. (Fotoğraf: New England Aquarium, Kaynak: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/FA164>).

Cryptocaryon irritans'ın doğrudan bir yaşam döngüsü vardır yani enfeksiyonun gelişimi için başka bir konağa ihtiyaç duymadan bir balık gru-

bu içinde yayılabileceği anlamına gelir. Ancak, yaşam döngüsü karmaşıktır ve balıkların üzerinde ve dışında yani su kütleğinde gelişen aşamaları içerir. Bu aşamalardan trofont, parazitin balıkların dokularına gömülü olduğu “beslenme aşaması”dır. Trofont balıktan ayrıldıktan sonra, kistleşmeden ve tomont veya “üreme aşaması”na dönüşmeden önce proto-
mont haline gelir. Tomont gelişir ve çok sayıda tomite bölünür, bunlar sonunda kisti terk ederek serbestçe yüzen bulaşıcı aşamalar olan terontlar haline gelir. Terontlar aktif olarak konak balıkları ararlar ve tutundukları anda enfeksiyon başlar (Şekil 5).



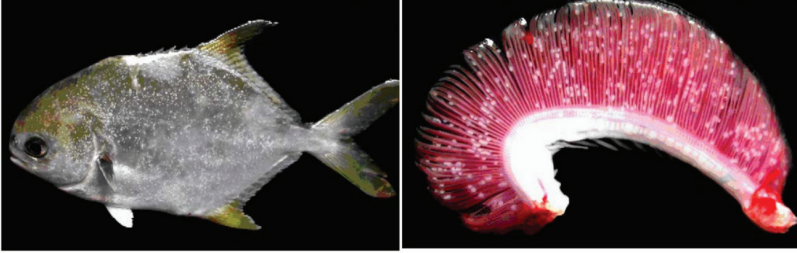
Şekil 5. *Cryptocaryon irritans* parazitin yaşam döngüsü (Kaynak: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpgclefindmkaj/https://extension.rwfm.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/8/2013/09/Cryptocaryon-irritans-Infections-Marine-White-Spot-Disease-in-Fish.pdf](https://extension.rwfm.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/8/2013/09/Cryptocaryon-irritans-Infections-Marine-White-Spot-Disease-in-Fish.pdf))

Belirtiler; Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. **Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:** Enfeksiyonunun tipik belirtileri arasında deri ve solungaç tahrişi, parlama, sürtünme ve hızlı solunum yapma sayılabilir. Enfeksiyon olgun aşamaya ulaştığında, enfekte balıkların yüzgeçlerinde ve derilerinde küçük beyaz lekeler görülür, mukus üretimi artar ve balıklar genellikle su altındaki nesnelere sürtünür.
2. **Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:** Parazitin oluşturduğu en tipik belirti vücuttaki küçük beyaz tümsek şeklindeki

beneklerdir. Deri ve solungaçlarda aşırı mukus üretimi olabilir. Özellikle solungaçlar artan solunum hızı nedeniyle şişmiş veya aşırı mukuslu görünebilir. Su yüzeyinin bir süre sonda tamamen içinde parazit barındıran mukus ile kaplandığı görülür. Ayrıca yüzgeçleri pürüzlü, gözleri bulanık, solungaçları soluk, mukus üretimi artmış veya deri renginde değişiklikler olabilir ve zayıf görünebilirler.

3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler*: Bir popülasyon içinde, ölüm oranları birkaç gün içinde hızla artabilir. Ancak, patolojinin boyutu parazitin türüne, balık türlerine, parazite daha önce maruz kalma durumuna ve su sıcaklığına bağlı olarak farklılık gösterecektir. Balık derisi ve solungaçlarında erginleşen parazitler beyaz beneklerin oluşuma neden olur (Şekil 6). Deri epitel doku-sunun altındaki ergin parazitlerin neden olduğu ciddi tahrişler ve patolojik bozukluklar balıklardaki ölümlerin asıl nedenidirler.



Şekil 6. *Cryptocarron irritans* ile enfekte olmuş *Trachinotus ovatus* balığı. Trofont evresindeki parazitin beyaz benekleri (sol), theront evresinde parazitin beyaz benekleri (sağ) (Kaynak: Dan vd, 2006).

Korunma: *Cryptocaryon*'un yaşam döngüsünü anlamak, hastalıkların önlenmesi ve yönetimi için bilimsel bir çerçeve sağlar. Önleme veya kontrol programının nihai amacı, parazitin yaşam döngüsünü kırmak ve gelecekteki enfeksiyonları durdurmaaktır. Her bir yaşam aşamasının gelişimi için gereken süre, etkilenen balık türlerine, balığın bağışıklık durumuna, *Cryptocaryon* türlerine ve sıcaklık ve tuzluluk gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Bununla birlikte, *Cryptocaryon* yaşam döngüsünün geniş değişkenliği ve uzunluğu, özellikle tomit gelişimi ve teront salınımı için gereken süre, balıkların üzerinde ve dışında korunan, "gömülü" ve kistlenmiş aşamaların varlığı ve bu enfeksiyonun salgınının potansiyel olarak yıkıcı sonuçları, uzun süreli karantina ve tedavi dönemini gerektirir. 24–27 °C sıcaklıkta en az 3–6 haftalık bir karantina süresi önerilir ve daha uzun süreler (örneğin 7–11 hafta) gerekebilir. Etkilenen sistemdeki su, su kolonunda yaşayan terontları öldürmek için bir şekilde arıtılmalıdır. Aynı şekilde, substrat (muhtemelen balıkların bazı kısımları dahil)

kistlenmiş tomontları barındırabilir ve bu nedenle tanklar ve ilgili substrat ve malzemeler *Cryptocaryon*'un "kuluçka makinesi" görevi görür. Yeniden enfeksiyonu azaltmak için bunların temizlenmesi veya değişimi gerekir.

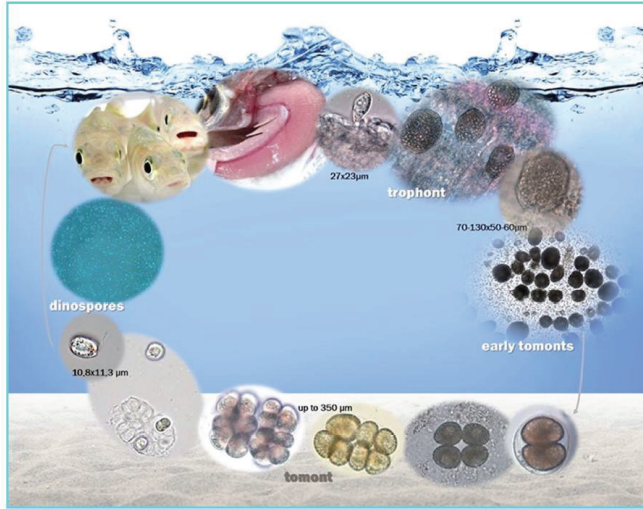
2.4. OODİNİYAZIS (OODINIASIS)

Etken: Oodiniyazis, *Oodinium ocellatum* (Şekil 7) tarafından neden olur. 100 - 350 µm boyutundaki bu parazit, dünya genelinde yaygın olup, ılıman ve aramete bölgelerde aramet olan bir ektoparazitik dinoflagellat (Dinophyceae) türüdür ve farklı su ortamlarına başarılı bir şekilde uyum sağlayabilmesi nedeniyle çevresel kontrolünü zordur. Optimal yaşama aralığı 23 ile 27°C sıcaklık değerleri ve optimal tuzluluk aralığı ise ‰30–35 arasında olsa da aşırı koşullarda da (‰7 – 46) virülensini yani enfeksiyon yapma yeteneğini sürdürür. Konak seçiciliğinin düşük olması nedeniyle ekolojik aralığı içinde yaşayan birçok sucul organizmayı enfekte etme potansiyeline sahiptir. Amyloodiniosis, güney Avrupa'daki semi-intensif su ürünleri yetiştiriciliği (valliculture) ve dünya çapındaki farklı su ürünleri yetiştiriciliği tesisleri için, özellikle en sıcak aylarda, ciddi morbidite ve mortaliteye neden olan önemli bir tehdittir. Dinospore konsantrasyonu çok yüksekse, konağın ölümü 12 saatten daha kısa sürede gerçekleşebilir.

Genel olarak, yaşam döngüsü, tuzluluk ve sıcaklığa bağlı olarak 5 ila 7 gün içinde tamamlanabilir. *A. ocellatum*'un yaşam döngüsü başkaca konak olmaksızın doğrudandır ve üç aşamaya ayrılır (Şekil 8): (1) konak balıktan doğrudan beslenen ve ağırlıklı olarak solungaçlarda ve deri epitelinde (yapışma bölgeleri) bulunan trofont (parazitik) aşama; Avrupa levrek balığında (*D. labrax*), trofontların orofaringeal boşluğun epitelinde de yapıldığı bildirilmiştir; (2) tomont (serbest yaşayan kistik üreme aşaması), eşeysiz olarak 256'ya kadar yeni dinospor üretebilir; ve (3) dinospor (serbest yüzen enfektif aşama), tomonttan çıkar ve enfeksiyon serbestçe yüzen ve enfekte edecek yeni konaklar arayan dinosporların doğrudan balıklara tutunması ile gerçekleşir. Bulaşıcı aşama, suda ve yetiştirme ekipmanlarında (balık ağıları, devridaim sistemlerinin filtreleme malzemeleri, arameter problemleri vb.) kolayca yayılır. Ayrıca, dinosporların aerosol damlacıklarıyla da bulaşabileceği deneysel olarak doğrulanmış olup, bu da rüzgarlı atmosferik olayların (örneğin fırtınalar veya tayfunlar) ardından, daha önce amyloodiniosis vakası bildirilmemiş bazı balık çiftliklerinin nasıl etkilenebileceğini açıklamaktadır. Ayrıca, bir su damlacığındaki sadece birkaç dinospora'nın enfeksiyonu başlatmak için yeterli olduğunu belirtmek de önemlidir.



Şekil 7. *Amyloodinium ocellatum* 'un trofontunun rizoidleriyle Avrupa levre balığı solungaç epiteline tutunmuş görseli (Fotoğraf: Dr. P. Beraldo, Udine Üniversitesi, Kaynak: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trophont_of_Amyloodinium_ocellatum.png)



Şekil 8. *Amyloodinium ocellatum* 'un yaşam döngüsünün şematik gösterimi. (Fotoğraf: Paola Beraldo, Kaynak: Beraldo vd. 2021)

Belirtiler: Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* Belirtilen beyaz benek hastalığındakilere benzer. Enfekte balıklar parazitler tarafından tahriş edildiklerinden sıçrama, atlama ve sürtünme hareketleri yaparlar. Enfekte balıklar ayrıca yem almayı bırakabilir ve su yüzeyinden solunum yapmaya çalışabilirler.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:* Doku ülseri ve aşırı mukus salgısı mikroskopik olarak belirgindir. Hiperplazi ve filament yapışması, beslenme aşamasında balık konağın deri altı tabakasına derinlemesine girer. Enfekte balıkların dış yüzeyinde beyaz, kahverengi, altın rengi veya gri tozlu veya pudra benzeri bir görünüm vardır.
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Bu parazitler, birincil ve ikincil solungaç lamellerinin hiperplazisi, sütun hücrelerinin yırtılması ve klorür hücrelerinin (iyonositler) hiperplazisi ile solungaçlarda ciddi lezyonlara neden olur. Solungaç yapısı tamamen etkilenir, bu da muhtemelen normal hematozu ve elektrolit düzenlemesini bozar ve balığın sağlığını ciddi şekilde tehlikeye atar. A. ocellatum'un neden olduğu lezyonlar, balık çiftliklerinde yüksek ölüm oranlarına ve sektörde ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Korunma ve Tedavi: Ultraviyole (UV) ışınlama veya ozon ile suyu dezenfekte etmek dinosporları öldürebilir ve özellikle devridaim sistemlerinde yararlı olabilir. Her iki yöntem de ticari su ürünleri yetiştiriciliğinde ve kamuya açık akvaryumlarda rutin olarak kullanılmaktadır. UV üniteleri ev akvaryumlarında da giderek yaygınlaşmaktadır. Ev akvaryumlarında ozon dezenfeksiyonu şu anda yaygın değildir, ancak bazı küçük üniteleri piyasada bulunmaktadır. Ozon, en deneyimli akvaryumcular ve yetkililer dışında kimseye tavsiye edilmez.

Tedavide hem formalin (25 mg/L) hem de hidrojen peroksit (25 mg/L) bu parazitin tedavisinde kullanılabilir. Ayrıca, tatlı su daldırma (3-5 dakika) yöntemi, balıkların solungaçları ve derisindeki trofontların sayısını azaltmak için kullanılmaktadır. Bakır sülfat, benzalkonyum klorür ve klorokin gibi diğer kimyasallar, süs balıklarında değişen derecelerde başarı ile kullanılmıştır. Ancak bu kimyasalların hiçbirisi, kistlenmiş tomont aşamasını öldürmede etkili değildir. Bu nedenle, balıkları ve sistemi parazitten tamamen kurtarmak için, 3-10 günde bir (su sıcaklığına bağlı olarak) tekrarlanan dozlar gerekebilir.

2.5. MONOGEN ENFESTASYONLARI (*Diplectanum*, *Lamellodiscus*, *Sparicotyle*, *Microcotyle*, *Choricotyle*)

Balıkların monogen parazitleri yassı kurtlar olarak adlandırılırlar ve tatlısu, acısu ve denizlerde yaşayan balıklarda neden oldukları patolojik bozukluklar ile ya doğrudan ya da diğer hastalık etkenlerine zemin hazırlamak suretiyle hastalığın oluşmasına neden olurlar. Bilinen yaklaşık 4000 civarında türü mevcuttur. Büyük çoğunluğu dış parazit yani ektoparazittir ve balıkların vücut yüzeyi, yüzgeçleri, solungaçları, ağız ve burun boşluklarında yaşarlar. Monogenea parazitleri yüksek derecede konak ve organ seçicidirler ve bu özellikleri ile özel öneme sahiptirler. Herhangi bir ara konağa veya başkaca bir konağa ihtiyaç duymaksızın doğrudan balıktan balığa geçiş yaparlar ve dolayısıyla direct bir yaşam tarzına sahiptirler.

Etken: Monogenea sınıfına ait bu beş cinsin genel tanımlamaları ve hastalık olguları aşağıdadır.

2.5.1. *Diplectanum aequans* : Diplectaniyazise neden olan parazit türüdür (Şekil 9). Akdeniz, Ege Denizi, Karadeniz, Adriyatik Denizi'nde kültürü yapılan levrek *Dicentrarchus labrax* ve çipura *Sparus aurata* türü balıkların bilinen parazitlerindendir, yumurtayla çoğalırlar ve oncomiracidia evresinde balığa tutunurlar, balıktan balığa geçiş söz konusudur. Balıkların solungaçlarında lokalize olurlar ve konak balıkların epidermis hücreleriyle beslenirler. Yüksek sayılara ulaştıklarında ve su sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında levrek balıklarında ciddi oranda ölümlere neden olurlar. İtalya'daki kültür balıkçılığındaki yavru stoklarında %5-10 oranında ölümlere ve dolayısıyla ekonomik kayıplar bildirilmiştir, enfeste balıkların yem değerlendirme oranında düşüş söz konusudur.



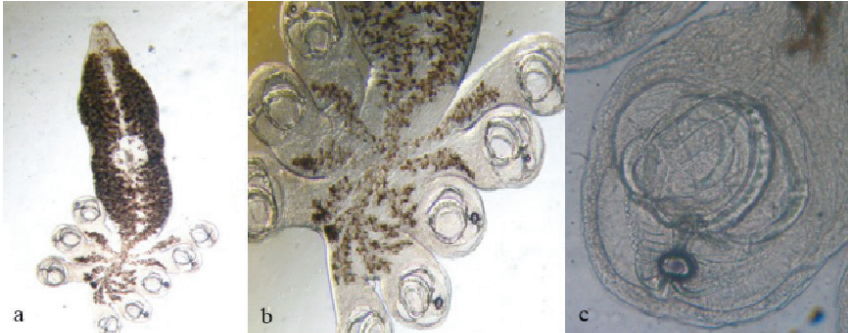
Şekil 9. *Diplectanum aequans* türü parazitin dikence balığındaki genel görünümü (Kaynak: Özer vd. 2019).

2.5.2. *Sparicotyle chrysophrii* : Sparikotilozise neden olan parazit türüdür (Şekil 10). *Sparicotyle chrysophrii*, deniz çipura (*Sparus aurata*) için spesifik olan bir solungaç parazitidir ve balık üretim kafeslerinde yüksek prevalans değerlerine (%61,5) ulaşıldığında ölümcül sonuçlara yol açar. Balık boyu artışının parazit yoğunluğuna etkisi fazla değildir yani her boy grubunda enfestasyon söz konusudur, ancak büyük balıkların solungaçlarından geçen su miktarı fazla olduğu için oncomiracidia evresindeki yavruların tutunması daha zordur. Parazit doğrudan doğruya balıktan balığa yumurta veya oncomiracidia evresindeki bireylerce geçer. Yumurtalar flagella tarzında uzantılara sahiptir ve bu durum onların solungaçlara ve hatta balık kafeslerine tutunmasına olanak sağlar. Gerek başka parazit türleri gerekse de bakteri gibi diğer hastalık etkenlerince ikincil enfeksiyonlar oluşabilir, konak balıkların yem değerlendirme oranında düşüşe neden olur.



Şekil 10. *Sparicotyle chrysophryi* parazit bireyleri (Kaynak: Mladineo, 2018)

2.5.3. *Choricotyle chrysophryi*: Sparikotilozise neden olan parazit türüdür (Şekil 11). *Microcotyle chrysophryi* olarak eski kayıtlarda bildirilmiştir ve kültürü yapılan çipura balığından (*Sparus aurata*) bildirimi yapılan ve kafes balıkçılığında önemli ekonomik kayıplara neden olan bir parazittir. *S. chrysophryi* enfeksiyonunu belirleyen ana faktör su sıcaklığıdır ve mevsimsellik önemli olup, düşük su sıcaklığı değerlerinde enfeksiyon oranı artar. Diğer taraftan, ilkbahar ve yaz mevsiminde görülen yüksek değerler hızlanan yumurta üretimi ve kısalan gelişim evresi süreciyle ilgilidir. Parazitin yaşam döngüsünde balıkların boyutu ve yaşı etkilidir.



Şekil 11. *Choricotyle chrysophryi* parazit bireyi ve tutunma organının görüntüsü (Kaynak: Akmurza, 2013)

IV. *Lamellodiscus echeneis*: Kültürü yapılan balık türlerinden levrek (*D. labrax*) ve çipura (*S. aurata*) ile parazitlerin neden olduğu ekonomik kayıplara verilebilecek en doğru örneklerden bir tanesi de yine bir başka monogen parazit olan *Lamellodiscus echenis* türüdür (Şekil 12). Boyutları 500 – 900 mikron olan ve eski adıyla *Furnestinia echeneis* olan *Lamello-discus echeneis*, sahip olduğu tutunma organı olan haptor'daki karmaşık yapılı kancalarla balığın solungaçlarına tutunurlar. Kültür balıklarından çipura türünde yüksek ölüm oranları ve büyük ekonomik kayıpların nedeni olarak bildirilmiştir. İspanya, İtalya, Yunanistan ve Türkiye'de mevsimsel değişikliklere bağlı olarak ilkbaharda en düşük, sonbaharda en yüksek oranda görülmektedir. Sıcaklık artışı, parazitin gelişimini sınırlandıran en belirgin faktördür ancak yıl boyunca balık üzerinde bulunduğu dair bildirimler vardır.



Şekil 12. *Lamellodiscus fraterinus* parazit bireyinin isparoz balığının (*Diplodus annularis*) solungaçlarındaki görünümü (Kaynak: Özer vd, 2014)

Belirtiler; Balıklarda görülen ve yukarıda belirtilen monogen türlerinin özelleşmiş etkilerinin yanı sıra genel olarak ortak değerlendirilebilecek belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. **Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:** Yukarıda bahsi geçen monogen parazitler konak balıkların solungaçlarına lokalize olurlar dolayısıyla balıkların davranışlarındaki değişimler genellikle solunum yetersizliğine dayalı olarak gerçekleşir. Örneğin, *S. chrysophrii* enfeksiyonunda oksijen yetersizliği ve şiddetli kansızlık nedeniyle uyuşukluk görülür çünkü bu patrazit balığın kanıyla da beslenir. Diğer cinslere ait parazitler tarafından enfeste olduğunda ve intensite yüksek olduğunda özellikle balık yavrularında bir süre sonra zayıflama ve uyuşukluk hali görülebilir, ardından da ölümler gerçekleşebilir. Bu ölümlerde farklı cinslere ait para-

zitlerin birlikte aynı konak balık üzerinde bulunmasının da etkisi vardır.

2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:* Parazitlerin tutunma organı olan haptor ile tutundukları dokularda parazitin güçlü organelleri ciddi doku hasarlarına neden olur ve hiperplazik tablo belirginleşir. Aşırı mukus üretimi en tipik belirtilerdendir.
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Patolojik olarak solungaç lamellerinin kısalması, şişkinlik ve birbirine yapışma, epitel dokusunun proliferasyonu ve bunun sonucunda ikincil lamellerin füzyonu ve belirgin klorür hücrelerinin varlığı *S. chrysophrii*, enfestasyonlarındaki değişimlerdir. Her bir solungaç kemerinde 8 adet parazitin bulunması durumundaki düşük enfeksiyon yoğunluğunda bile solungaç lezyonları, sistemik anemi, lamellerin füzyonu, epitel hücrelerinin dökülmesi gibi ciddi patojenite değişimleri görülür. Enfeste bölgelerde parazitin ayrılması sonrası ikincil bakteriyel ve mantar hastalıkları da görülür.

2.6. ARHTROPOD ENFESTASYONLARI (*Caligus*, *Lepeophtherius*, *Lernanthropus*, *Ceratotohoa*, *Anilocra*)

Arthropod parazitler, balıkların vücut yüzeyi, solungaçları ve yüzgeçlerinde yerleşim gösteren önemli ektoparazit gruplarından. Bu parazitler, tutunma ve beslenme aktiviteleri sırasında doğrudan doku hasarına ve çeşitli patolojik bozukluklara neden olmanın yanı sıra, taşıdıkları ikincil enfeksiyon etkenlerinin konak balıklar arasında aktarılmasında da rol oynayabilmektedir. Gerek doğal populasyonlarda yaşayan ekonomik değere sahip balıklarda gerekse akuakültür ortamlarında yetiştirilen türlerde, enfestasyonları ciddi ekonomik kayıplara yol açabilmekte olup bu nedenle yakından izlenmeleri gerekmektedir.

Krustasea alt şubesi içerisinde yaklaşık 30 aileye ait türleri kapsayan kopepodlar, baskın parazitik grup olarak öne çıkmakta ve metazoa içerisinde deniz balıklarını enfeste eden tür çeşitliliği bakımından monogen parazitlerle birlikte en zengin gruplardan birini oluşturmaktadır. Kopepodlar, farklı coğrafi bölgelerde yayılış gösteren ve çeşitli ekolojik ile yaşamsal özelliklere sahip konak balıklara karşı geliştirdikleri yüksek adaptasyon yetenekleri sayesinde hem başarılı enfestasyonlar oluşturabilmekte hem de yaşam döngülerini sürdürebilmektedir.

Krustaseler içerisinde yer alan izopodlar ise deniz balıklarında yaygın olarak rastlanan parazitlerdendir. Bu parazitler, konak balıkların beslenme aktivitelerine ortak olmalarının yanı sıra, özellikle solungaç dokusunda oluşturdukları mekanik hasar nedeniyle balıkların büyüme

performansını ve normal solunum fonksiyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir.

2.1.6.1. KALIGIDOZİS (*Caligidae* ve *Lepeophtheirus*-BALIK BİTİ)

Etken: Arthropoda filumu içinde yer alan *Caligus* ve *Lepeophtheirus* cinslerine ait parazitlerin neden olduğu genel bir hastalık tanımlama durumu olup, hem doğada yaşayan hem de kültürü yapılan levrek (*D. labrax*) hem de çipura (*S. aurata*) balıklarında önemli ekonomik kayıplara neden olduğu bildirilmiştir. konağa tutunup kan, doku ve mukusu besin olarak kullanan ektoparazitlerdir. Bu parazitler enfestasyonu arttıkça konağın fizyolojisini ve davranışını etkiler. Şili'deki Atlantik salmonu (*Salmo salar*) kültür balıkçılığında en yaygın ve patojen olarak bildirilen tür olan *Caligus rogercressyi* ile Norveç'teki Atlantik salmonlarından bildirilen *Lepeophtheirus salmonis* (Şekil 13) türleridir. Ülkemizde ise *Caligus minimus* (Şekil 14) hem levrek hem de çipura balıklarından bildirilmiştir. Ayrıca *Lepeophtheirus pectoralis* levrek balıklarından bildirilen diğer türdür.



Şekil 13. *Lepeophtheirus salmonis* bireyinin Atlantik salmonu derisindeki bulunuşuna dair genel görünüm (Kaynak: <https://thefishsite.com/disease-guide/sea-lice>)



Şekil 14. *Caligus minimus* bireyinin genel görünümü (Kaynak: <https://www.pecriominho.org/en/invertebrata/caligus-minimus>)

Belirtiler; Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* Ağır infestasyonlarda solunum stresine bağlı yüzeyde daha sık yüzme, solungaç hareketlerinde hızlanma ve anormal yüzme paterni görülebilir. Bu, solungaç fonksiyonlarının parazit tarafından zedelenmesine bağlıdır. Enfestasyon yoğunluğu arttıkça balıklarda lethargi, yüzme aktivitesinde azalma ve davranışsal yavaşlama gözlenir. Bu, parazitin doku ve mukoza beslenmesine bağlı metabolik stres ile ilişkilidir. Parazitler solungaç ve deride ciddi tahrişe neden olduğunda, balıkların beslenme davranışlarında azalma ve iştahsızlık meydana gelir; bu durum büyüme geriliğine yol açabilir. Spesifik çalışmalar levrek ve çipurada bu tip davranış değişikliklerinin olduğunu göstermektedir.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskobik Belirtiler:* *Caligidae* ve *Lepeophtheirus* parazit enfestasyonlarının dışa yansıyan klinik belirtileri, hem doğrudan doku hasarından hem de sekonder enfeksiyonlardan kaynaklanır. Parazitler deri, solungaç filamentleri ve yüzgeç tabanına yapışırlar ve yüksek sayıdaki infestasyonlarda balık yüzeyinde kolayca görülebilirler. Enfestasyon noktalarında dokularda erozyon, kanamalı odaklar ve doku yıkımı gözlenir (Şekil 15). Özellikle solungaç yapraklarının kenarlarında belirgin

yaralanmalar görülür. Hem solungaç hem de vücut yüzeyinde aşırı mukus artışı görülür. Parazitin oluşturduğu doku hasarları ikincil bakteriyel enfeksiyonlara zemin hazırlarken deri ve solungaçlarda ülserasyon, nekroz odakları, kanamalı lezyonlar gelişebilir.



Şekil 15. Atlantik salmonunun (*Salmo salar*) vücut yüzeyinde *Caligus rogercresseyi* parazit bireyleri ve neden oldukları doku hasarları (Fotoğraf: Marcelo Vera – MV, Kaynak: <https://fishhistopathology.com/spa/?p=1187>)

3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Solungaç lamellerinde epitel hücre proliferasyonu ve yüzey hücrelerinin dökülme-leri bildirilmiştir. Parazit tutunma bölgesindeki bazal membran- da bozulmalar ve lamellerin yapısal görünümünde düzensizlikler görülebilir. Solungaç dokusunda kanamalı odaklar ve interlamel- lar ödem de görülebilir. Parazitin tutunduğu bölgelerinde der- mal dokuda ayrışma ve nekrotik odaklar oluşabilir. Epidermisde kalınlaşma da bildirilmiştir.

2.7. İZOPOD ENFESTASYONLARI

Etken: *Ceratothoa*, *Anilocra*, *Gnathia* ve *Paragnathia* cinslerine ait pa-razitler en yaygın bildirilenler olup, *Ceratothoa oestroides* (Şekil 16) deniz kültür balıkçılığında en yaygın ve patojen olarak bilinen izopod türle-lerinden bir tanesidir. Akdeniz havzasında yaygın görülen ektoparazitik izopod bir türdür ve özellikle ağız boşluğunda yerleşerek (Şekil 17) konak balıklarda hem makroskobik hem histopatolojik zararlar oluşturur. Bu tür, levrek (*D. labrax*) ve çipura (*S. aurata*) gibi kültürü yapılan türlerde

önemli sağlık sorunlarına yol açar. Yavru balıklarda direkt mortaliteye neden olurken, erişkin balıklarda %20'ye varan gelişme geriliğine neden olur. Parazitin patolojik etkileri balık yaşı ile ilişkilidir. Bu nedenle kronik zayıflamayı takiben ölüme maruz kalan en duyarlı grup yavru balıklardır. Sparidae, Carangidae, Clupeidae, Maenidae, Scorpaenidae ve Mugilidae ailelerine ait balık türlerinden bildirilmiştir.



Şekil 16. *Ceratothoa oestroides* bireyinin genel görünümü, üstteki dişi ve alttaki birey ise erkek (Kaynak: Mladineo, 2003)



Şekil 17. *Ceratothoa oestroides* bireylerinin konak balığın ağız içindeki görünümü (Fotoğraf: Il fatto alimentare, Kaynak: <https://www.mer-ocean.com/le-parasite-qui-mange-la-langue-des-poissons/>)

Belirtiler; Balıklarda görülen belirtileri alt başlıklar halinde ifade etmek mümkündür. Bunlar;

1. *Hastalıkla İlişkili Davranış Değişiklikleri:* Parazitin konak balığın ağız boşluğuna yerleşmesi ve dil üzerinde tutunması nedeniyle beslenmeyi zorlaştırmasın balıklarda belirgin iştahsızlık, kondisyonda zayıflama ve besin alımında azalma gözlenir. Parazit özellikle ağız ve solunum bölgelerinde inflamasyon yaratarak balığın solunumunu zorlaştırabilir; buna bağlı olarak yüzme aktivitelerinde yavaşlama ve lethargik davranışlar görülebilir. Kronik enfestasyonlarda balıkların büyüme performansı düşer, bu da davranışsal enerji eksikliği ve gelişim problemine yol açar.
2. *Dışarıdan Görülebilen Makroskopik Belirtiler:* Parazitin erişkin bireyleri genellikle konak balığın ağız boşluğuna yerleşir ve çoğu zaman çıplak gözle görülebilir. Parazit tutunma alanında doku yıkımları, kanamalar ve lokal inflamasyon görülür ve bu durumlarda besinini yutma ve beslenme mekanizmalarını bozabilir. Parazitin kanla beslenme davranışı sonucunda kan parametreleri bozulabilir, eritrosit sayısı, hemoglobin ve hematokrit değerlerinde azalma ve sonuçta da anemi yani kansızlık görülür. Parazitlerin neden olduğu doku hasarları, özellikle *Vibrio*, *Aeromonas* gibi bakterilerin sekonder enfeksiyonları için giriş noktaları oluşturabilir ve sonuçta deri ile solungaçlarda ülserasyonlar görülebilir. Bu makroskopik belirtiler, enfestasyon düzeyine bağlı olarak derece ve yaygınlık gösterebilir ve mortaliteyi artırabilir.
3. *Hastalıkla İlişkili Histopatolojik Değişiklikler:* Parazitin yerleşim bölgesinde epitel bütünlüğünde bozulma, inflamasyon ve doku nekrozu görülür. Bu hasarlar mikroskopik düzeyde belirgindir ve enfestasyon alanının çevresine yayılabilir. Solungaç yüzeylerinde inflamatuvar hücre infiltrasyonu ve epitel hiperplazisi artışı kaydedilmiştir; bu durum solungaç yüzey alanını ve gaz değişimini olumsuz etkiler. Parazitin hematofajik davranışı sonucunda konak balığın hemoglobin, hematokrit ve eritrosit sayısında düşüklük ile birlikte artmış lökosit sayısı histopatolojik olarak bildirilmiştir.

KAYNAKÇA

- Abdelsalam M, Attia M.M., Marzouk, M.S., Korany, R.M.S., Elgendy, M.Y., Soliman, A.W., Prince, A. ve Hamada, A.H. (2024). Investigating dynamics, etiology, pathology, and therapeutic interventions of *Caligus clemensi* and *Vibrio alginolyticus* co-infection in farmed marine fish. Sci Rep. 14(1): 20704.
- Abdelsalam, M., Soliman, A.W., Hamada, A.H., Fadel, A., Korany, R.M.S. ve Attia, M.M. (2025). Seasonal dynamics of *Caligus clemensi* Infestation in European Seabass and flathead grey mullet integrating morphological, molecular, immunological, and environmental perspectives. 199: 107107
- Abowe, J.F.N., Briyai, O.F. ve Bassey, S.E. (2011). A review of some basic parasite diseases in culture fisheries Flagellids, Dinoflagellides and Ichthyophthiriasis, Ichtyobodiasis, coccidiosis Trichodiniasis, Heminthiasis, Hirudinea infestation, crustacean parasite and ciliates. British Journal of Pharmacology, 2, 213–226.
- Akmirza, A. (2013). Monogeneans of fish near **Gökçeada, Turkey**. Turkish Journal of Zoology, 37, 441-448.
- Alvarez-Pellitero, P. (2004). Report about fish parasitic diseases. Alvarez-Pellitero P, Barja JL, Basurco B, Berthe F, Toranzo AE (Eds) Mediterranean Aquaculture Diagnostic Laboratories 103-129.
- Antonelli, L., Quilichini, Y. ve Marchand, B. (2010). *Sparicotyle chrysophrii* (Van Beneden and Hesse 1863) (Monogenea: Polyopisthocotylea) parasite of cultured Gilthead sea bream *Sparus aurata* (Linnaeus 1758) (Pisces: Teleostei) from Corsica: ecological and morphological study. Parasitol Res 107, 389–398.
- Beraldo, P., Massimo, M. ve Galeotti, M. (2021). *Amyloodinium ocellatum*. In: Fish Patasites (eds: Ariadna Sitjà-Bobadilla et al.). sf. 5-62. DOI: 10.1079/9781800629127.0004
- Beraldo, P., Byadgi, O., Massimo, M., Bulfon, C., Volpatti, D. ve Galeotti, M. (2017) Grave episodio di amyloodiniosi in giovanili di branzino (*Dicentrarchus labrax*): analisi dei determinanti di malattia e rilievi anatomopatologici. Conference proceedings of the XXIII Convegno nazionale SIPI, Società Italiana di Patologia Ittica, Lecce, 5–6 October 2017, p. 30.
- Colorni, A. (1985). Aspects of the biology of *Cryptocaryon irritans*, and hyposalinity as a control measure in cultured gilt-head sea bream *Sparus aurata*. Diseases of Aquatic Organisms 1: 19–22.
- Colorni, A. ve Burgess, P. (1997). *Cryptocaryon irritans* Brown 1951, the cause of “white spot disease” in marine fish: an update. Aquarium Sciences and Conservation, 1: 217–238.
- Dequito, A.Q.D., Cruz-Lacierda, E.R. ve Corre, Jr. V.L. (2015). A case study on the environmental features associated with *Amyloodinium ocellatum* (Dinoflagellida) occurrences in a milkfish (*Chanos chanos*) hatchery. AACL Bioflux 8, 390–397.

- Francis-Floyd, R. ve Reed, P. (2009). Ichthyophthirius multifiliis (white spot) infections in fish. CIR920. Program in Fisheries and Aquatic Sciences, SFRC, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville
- Francis-Floyd, R. and Floyd, M.R. (2011). *Amyloodinium ocellatum*, an Important Parasite of Cultured Marine Fish. SRAC Publication No. 4705
- Giesta, L.B., de Paiva dos Santos, P.A., Okamoto, M.H., Romano, L.A. ve Pedrosa, V.F. (2023). Histopathological effects of *Amyloodinium ocellatum* (E.-M.Brown) E.-M.Brown & Hovasse, 1946 (Alveolata: Dinophyceae) on the gills of *Mugil liza* (Valenciennes, 1836). AquaTechnica 5(2):116-122
- Horton, T. ve Okamura, B. (2003). Post-haemorrhagic anaemia in sea bass, *Dicentrarchus labrax* (L.), caused by blood feeding of *Ceratothoa oestroides* (Isopoda: Cymothoidae). J Fish Dis. 26(7): 401-6.
- Jithendran, K.P. (2014). Chapter 12 Parasites and Parasitic Diseases in Fish Culture System. In: Veterinary Parasitology, pp. 331-376.
- Korun, J. ve Akaylı, T. (2004). Kültür levrek (*Dicentrarchus labrax*) balıklarında parazitik bir izopod: *Ceratothoa oestroides* ve sekonder bakteriyel enfeksiyonlar olgusu. **İstanbul Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi**, 30(2): 123-132.
- Kuperman, B.I. ve Matey, V.E. (1999). Massive infestation by *Amyloodinium ocellatum* (Dinoflagellida) of fish in a highly saline lake, Salton Sea, California, USA. Diseases of Aquatic Organisms 39, 65–73.
- Lawler, A.R. (1980). Studies on *Amyloodinium ocellatum* (Dinoflagellata) in Mississippi Sound: natural and experimental hosts. Gulf Research Reports 6, 403–413. Available at: <http://aquila.usm.edu/gcr/vol6/iss4/8>
- Mahmoud, N.E., Mahmoud, A.M. ve Fahmy, M.M. (2014). Parasitological and Comparative Pathological Studies on Monogenean Infestation of Cultured Sea Bream (*Sparus aurata*, Spariidae) in Egypt. Oceanography, 2(4), p.1000129.
- Martins, M.L., Lucas, C., Natalia, M, ve De Pádua, S.B. (2015). Protozoan infections in farmed fish from Brazil: diagnosis and pathogenesis. Rev Bras Parasitol Vet. 24: 1-20.
- Mladineo, I. (2018). Sparicotylosis Published on MedAID H 2020 project Blog. <http://www.medaaid-h2020.eu/index.php/2018/06/25/sparicotylosis/>
- Mladineo, I. (2003). Life cycle of *Ceratothoa oestroides*, a cymothoid isopod parasite from sea bass *Dicentrarchus labrax* and sea bream *Sparus aurata*. Diseases of Aquatic Organisms, 57: 97–101.
- Mladineo, I., Hrabar, J., Vidjak, O., Bocina, I., Çolak, S., Katharios, P, et al. (2020). Host-parasite interaction between parasitic Cymothoid *Ceratothoa oestroides* and its host, farmed European sea bass (*Dicentrarchus labrax*). Pathogens, 9:230.
- Noga, E.J. (2010). Fish disease: diagnosis and treatment. 2nd edition, Blackwell Publishing.

- Özer, A. (2020). **Deniz Balıklar ve Parazitleri**. İdeal Kültür Yayıncılık, İstanbul, Turkey.
- Özer, A. (2021). **Checklist of marine, freshwater, and aquarium fish parasites in Turkey**. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV) Publication No: 62, İstanbul, Turkey.
- Özer, A., Güneydağ, S. ve Özkan, H. (2014). First report of *Lamellodiscus elegans* and *Lamellodiscus fraternus* (Monogenea: Diplectanidae) on the gills of *Diplodus annularis* (Perciformes: Sparidae) from Turkish Black Sea coasts. Poster Presentation, FABA International Symposium, 25-27 September, Trabzon.
- Özer, A., Okay, S., Öztürk, T., Baki, B., Acar, G., Güven, A. ve Kaya Öztürk, D. (2019). Comparative *Diplectanum aequans* Monogenea infestations in cultured European seabass *Dicentrarchus labrax* in the Black Sea and the Aegean Sea Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 36 2 163 169
- Paperna, I. (1996). Ectoparasitic Protozoa (Flagellates and Ciliates). In: Parasites, infections and diseases of fishes in Africa_ An update. CIFA Technical Paper. No.31. 220.
- Petty, B.D., Francis-Floyd, R. ve Yanong, R.P.E. (2024). Parasitic Diseases of Fish, <https://www.msdsvetmanual.com/exotic-and-laboratory-animals/aquarium-fish/parasitic-diseases-of-fish>
- Piazzon, M.C., Mladineo, I., Dirks, R.P., Santidrián Yebra-Pimentel, E., Hrabar, J. ve Sitjà-Bobadilla, A. (2021). *Ceratomyxa oestroides* Infection in European Sea Bass: Revealing a Long Misunderstood Relationship. Front Immunol. 2021 Mar 11;12:645607.
- Post, G. (1987). Textbook of Fish Health. T. F. H. Publications, Inc., Neptune, New Jersey.
- Roberts, R.J. (1978). Fish Pathology. Bailliere Tindall, London.
- Roberts-Thomson, A., Barnes, A., Fielder, D.S., Lester, R.J.G. ve Adlard, R.D. (2006). Aerosol dispersal of the fish pathogen, *Amyloodinium ocellatum*. Aquaculture 257, 118–123.
- Sitjà-Bobadilla, A. ve Alvarez-Pellitero, P. (2009). Experimental transmission of *Sparicotyle chrysophrii* (Monogenea: Polyopisthocotylea) to gilthead seabream (*Sparus aurata*) and histopathology of the infection. Folia Parasitologica 56, 143–151.
- Sitjà-Bobadilla, A., de Felipe, M.C. ve Alvarez-Pellitero, P. (2006). In vivo and in vitro treatments against *Sparicotyle chrysophrii* (Monogenea : Microcotylidae) parasitizing the gills of gilthead seabream (*Sparus aurata* L.). Aquaculture 261, 856–864.
- Taylor, P.W. ve Goodwin, A.E. (2002). 3.10. External Infection by Ciliated Parasites-1, AFS Fish Health Section Blue Book, Section 1, Suggested Procedures for the Detection and Identification of Certain Finfish and Shellfish Pathogens, sf. 292-299.
- TUİK (2024). Su Ürünleri İstatistikleri. www.tuik.gov.tr

- Vagianou, S., Athanassopoulou, F., Ragias, V., Di Cave, D., Leontides, L. ve Golomazou, E. (2006). Prevalence and pathology of ectoparasites of Mediterranean Sea bream and sea bass reared under different environmental and aquaculture conditions. - The Israeli Journal of Aquaculture - Bamidgeh, 58 (2): 78-88.
- van der Wal, S. ve Haug, J.T. (2020). Shape of attachment structures in parasitic isopodan crustaceans: the influence of attachment site and ontogeny. PeerJ 8:e9181 <https://doi.org/10.7717/peerj.9181>
- Yanong, R.P.E. (2012). *Cryptocaryon irritans* Infections (Marine White Spot Disease) in Fish. UF/IFAS Extension, FA164, (doi.org/10.32473/edis-fa164-2009)
- <https://www.adfg.alaska.gov/static/species/disease/pdfs/fishdiseases/trichodiniasis.pdf>
- https://www.pubs.ext.vt.edu/content/pubs_ext_vt_edu/en/600/600-200/600-200.html

Bölüm 18

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SÜREÇLERİNİN SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Sibel DOĞAN¹

Özden BARIM ÖZ²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Fırat Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Balık Hastalıkları ABD, Elazığ/Türkiye, ORCID: 0000-0003-4569-5435/ sibeldogan@firat.edu.tr

2 Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Yetiştiriciliği ABD, Elazığ/Türkiye, ORCID0000-0002-4202-8402/ obarimoz@firat.edu.tr

1.GİRİŞ

Su ürünleri yetiştiriciliği sektörü, son yirmi yıl içerisinde küresel gıda üretim sisteminin en hızlı büyüyen ve stratejik bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Bu sektör, dünya genelinde milyarlarca insan için kolay sindirilebilir protein, sağlıklı yağ asitleri, temel besin öğeleri ve hayati vitaminlerin önemli bir kaynağını oluşturmaktadır (Kılınç ve Köprücü, 2022a). Günümüzde bu sektör, toplumların sosyoekonomik yapılarından ve yaşam biçimlerinden bağımsız olarak, hayvansal protein gereksiniminin karşılanmasında temel bir rol üstlenmektedir. Avcılığa dayalı balıkçılığın uzun süredir sürdürülebilir olmayan düzeylerde gerçekleştirilmesi, doğal stoklar üzerindeki baskının artması ve sucul ürünlere yönelik talebin yükselmesi, su ürünleri yetiştiriciliğini küresel ölçekte vazgeçilmez bir üretim modeli konumuna taşımıştır (FAO, 2018). Bununla birlikte, sektörün üretim süreçlerinin büyük ölçüde çevresel koşullara bağlı olması, iklim değişikliğini su ürünleri yetiştiriciliği açısından en önemli tehdit unsurlarından biri hâline getirmektedir (FAO, 2020; Maulu vd., 2021).

İklim değişikliği; uzun zaman dilimleri boyunca iklim sisteminin ortalama durumunda ve değişkenliğinde meydana gelen kalıcı değişimler olarak tanımlanmakta ve bu değişimlerin büyük ölçüde insan faaliyetlerinden kaynaklandığı kabul edilmektedir (IPCC, 2014). Fosil yakıtların yoğun kullanımı, ormansızlaşma ve arazi kullanımındaki değişimler sonucunda atmosfere salınan sera gazlarının birikimi, küresel sıcaklık artışının temel itici gücü olarak değerlendirilmektedir (Palmer ve Stevens, 2019). Bu süreç, yalnızca atmosferik sistemleri değil; okyanuslar, iç sular ve bu sistemlere bağlı ekosistemleri de doğrudan etkilemektedir (FAO, 2020).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) Dördüncü Değerlendirme Raporu'nun yayımlanmasının ardından, iklim değişikliğinin insan toplumu ve doğal kaynaklar üzerindeki riskleri küresel ölçekte daha fazla dikkat çekmeye başlamıştır (IPCC, 2007). Güncel gözlemler, yarı kurak ve kurak bölgelerde yağış rejimlerinin daha düzensiz hâle geldiğini, aşırı hava olaylarının sıklık ve şiddetinin arttığını ve iklimsel belirsizliğin giderek derinleştiğini göstermektedir (IPCC, 2007; Kundzewicz vd., 2007). Bu gelişmeler, su kaynaklarının miktar ve kalite açısından sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilemekte; sucul ekosistemler üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır (Park vd., 2010).

İklim değişikliğine bağlı olarak artan hava ve su sıcaklıkları, su ürünleri yetiştiriciliği sistemleri açısından en belirgin risk faktörleri arasında yer almaktadır. Yükselen su sıcaklıkları, çözünmüş oksijen seviyelerinde düşüşe, metabolik stresin artmasına ve yetiştirilen türlerin fizyolojik tolerans sınırlarının aşılmasına neden olmaktadır (Kundzewicz vd., 2007). Bu

durum; büyüme performansında düşüş, artan mortalite oranları ve üretim kayıpları ile doğrudan ilişkilendirilmektedir (Myers vd., 2017). Aynı zamanda, uzun süreli düşük akım dönemleri ve kuraklık koşulları, su kalitesinin bozulmasını hızlandırarak yetiştiricilik faaliyetlerinin sürekliliğini tehdit etmektedir (Kundzewicz vd., 2007).

Yağış rejimlerindeki değişimler ve aşırı hava olaylarının artışı da su ürünleri yetiştiriciliği üzerinde önemli olumsuz etkilere sahiptir. Şiddetli yağışlar ve sel olayları, yetiştiricilik altyapısında fiziksel hasarlara yol açmakta; havuz ve kafes sistemlerinde kaçışlar, stok kayıpları ve çevresel kirlilik riskini artırmaktadır (Park vd., 2010). Buna karşılık, uzun süreli kuraklıklar özellikle tatlı suya dayalı yetiştiricilik sistemlerinde su teminini zorlaştırmakta ve üretim kapasitesini ciddi ölçüde sınırlamaktadır (Ahmed vd., 2019).

Denizel ortamlarda iklim değişikliğinin etkileri, okyanus yüzey sıcaklıklarındaki artış, deniz seviyesinin yükselmesi ve okyanus asitleşmesi süreçleri üzerinden daha belirgin hâle gelmektedir (Dervash vd., 2023). Okyanusların artan miktarlarda karbondioksit absorbe etmesi sonucu meydana gelen asitleşme, özellikle kabuklu organizmalar ve hassas denizel türler üzerinde ciddi biyolojik baskılar oluşturmaktadır (Sun, 2023). Bunun yanı sıra, birçok balık türünün dağılım alanlarında gözlenen değişimler, bazı türlerin daha yüksek enlemlere doğru göç etmesine neden olurken; alternatif yaşam alanlarına sahip olmayan türler için yok olma riskini artırmaktadır (Dahms ve Killen, 2023).

İklim değişikliği, su ürünleri yetiştiriciliğinde hastalıkların ortaya çıkışı ve yayılımı açısından da önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Artan sıcaklıklar ve bozulan su kalitesi, patojenlerin çoğalması ve yayılması için elverişli koşullar yaratmakta; bu durum hastalık sıklığında ve şiddetinde artışa yol açmaktadır (Galappaththi vd., 2019). Hastalık salgınları, üretim kayıplarının yanı sıra ekonomik maliyetlerin artmasına ve gıda arzında istikrarsızlığa neden olmaktadır (Troell vd., 2017; Kılınç ve Köprücü, 2022b; Doğan ve Köprücü, 2024).

Küresel ölçekte su ürünleri yetiştiriciliği üretiminin büyük bir bölümünün gelişmekte olan ülkelerde ve küçük ölçekli işletmeler tarafından gerçekleştiriliyor olması, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini daha da derinleştirmektedir (FAO, 2018). Bu ülkelerde altyapı yetersizlikleri, sınırlı teknik kapasite ve ekonomik kırılganlık, iklim kaynaklı çevresel şokların etkisini artırmaktadır. Özellikle yoksullukla mücadele eden topluluklar açısından iklim değişikliği, yalnızca çevresel bir sorun değil; aynı zamanda gıda güvenliği ve geçim kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Ahmed vd., 2019; Maulu vd., 2021).

Mevcut literatür, iklim değişikliğinin su ürünleri yetiştiriciliği değer

zincirinin farklı aşamalarını olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Ancak çalışmaların büyük bir kısmı, ağırlıklı olarak üretim aşamasına odaklanmakta; değer zincirinin diğer bileşenlerine ilişkin etkiler görece daha sınırlı biçimde ele alınmaktadır (Fleming vd., 2014). Buna rağmen, üretim kayıpları, çevresel belirsizlikler ve ekosistem temelli baskılar, sektörün mevcut ve gelecekteki üretim potansiyelini tehdit eden temel unsurlar arasında yer almaktadır (Barange vd., 2018).

Bu çalışmanın amacı, iklim değişikliğinin su ürünleri yetiştiriciliği sistemleri üzerindeki çevresel, biyolojik ve sosyoekonomik etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmek ve sektörün karşı karşıya olduğu temel risk alanlarını ortaya koymaktır. Bu kapsamda; artan sıcaklıklar, yağış rejimlerindeki değişimler, tuzluluk dalgalanmaları, deniz seviyesindeki yükselme ve okyanus asitleşmesi gibi iklim kaynaklı stres faktörlerinin, yetiştirilen sucul organizmaların fizyolojisi, büyüme performansı, hastalık dinamikleri ve üretim sürdürülebilirliği üzerindeki etkileri güncel bilimsel literatür ışığında ele alınmaktadır.

2. Küresel İklim Değişikliğinin Su Ürünleri Yetiştiriciliği Üzerindeki Yansımaları

İklim değişikliği, su ürünleri yetiştiriciliği sektörünü hem kısa vadede hem de uzun vadede etkileyen temel çevresel baskılardan biri olarak öne çıkmaktadır (Maulu vd., 2021). Atmosferdeki sera gazı birikiminin artmasıyla birlikte hava ve su sıcaklıklarında yükselme, yağış rejimlerinde değişim, deniz seviyesi dalgalanmaları, okyanus asitlenmesi, rüzgâr sistemlerindeki farklılaşmalar ve tropikal siklonların şiddetinde artış gibi çok boyutlu iklimsel dönüşümler meydana gelmiştir (Leng vd., 2023). Bu çevresel değişimler, denizel ve tatlı su ekosistemlerinin yapısını ve işleyişini etkileyerek balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliği faaliyetleri üzerinde belirgin sonuçlar doğurmaktadır (Cochrane vd., 2009).

İklim değişikliğinin su ürünleri yetiştiriciliği üzerindeki etkilerinin hem doğrudan hem de dolaylı yollarla ortaya çıkacağı öngörülmektedir (Handisyde vd., 2006). Doğrudan etkiler; artan sıcaklık, okyanus asitlenmesi ve zararlı alg patlamaları gibi iklim değişikliğine bağlı stres faktörlerinin, yüzgeçli balıklar ve kabuklu canlıların fiziksel ve fizyolojik özelliklerini etkilemesi şeklinde kendini göstermektedir (Handisyde vd., 2006;). Bu durum, yetiştiricilik sistemlerinde verim kaybı, ani ölümler ile üreme dönemlerinde ve yumurta veriminde meydana gelen değişimler gibi üretim performansını doğrudan etkileyen sonuçlara yol açabilmektedir (Ho vd., 2016).

Dolaylı etkiler ise ekosistemlerin birincil ve ikincil üretkenliğinde ve yapısında meydana gelen değişimler, girdi tedarik zincirlerinde yaşanan aksamalar ve ürün fiyatları ile balık unu, balık yağı ve diğer üretim

girdilerinin maliyetlerindeki dalgalanmalar aracılığıyla ortaya çıkmaktadır (Handisyde vd., 2006; Adhikari vd., 2018). Bu etkiler yalnızca üretim sürecini değil, aynı zamanda su ürünleri yetiştiriciliğine bağlı tüm değer zincirini kapsayacak şekilde genişlemektedir (Fleming vd., 2014; Barange vd., 2018).

Çeşitli çalışmalar, iklim değişikliğinin su ürünleri yetiştiriciliği üzerindeki etkilerinin coğrafi konum, iklim kuşağı, ekonomik yapı, üretim sistemi ve yetiştirilen türlere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır (Adhikari vd., 2018; Barange vd., 2018; IPCC, 2018). Bu bağlamda, gelişmekte olan ülkelerde faaliyet gösteren ve ekonomik olarak daha kırılgan üreticilerin, gelişmiş ülkelere kıyasla iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı daha savunmasız olduğu belirtilmektedir (Barange vd., 2018). Ayrıca, iklim değişikliğinin etkilerinin tatlı su, acı su ve denizel yetiştiricilik ortamlarına göre farklılık gösterdiği bildirilmektedir (Handisyde vd., 2017).

Üretim ölçeği de iklim değişikliğine karşı kırılganlığı belirleyen önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Küçük ölçekli üreticilerin, artan üretim maliyetleri ve iklimsel şoklara uyumu destekleyecek mekanizmaların yetersizliği nedeniyle, büyük ölçekli işletmelere kıyasla iklim değişikliği risklerinden daha fazla etkilendiği ifade edilmektedir (King ve Harrington, 2018). Bu durum, iklim değişikliğinin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik etkileri olan çok yönlü bir risk faktörü olduğunu göstermektedir.

Su ürünleri yetiştiriciliğinin üretim kapasitesi ve sürdürülebilirliği açısından iklim değişikliğine bağlı olarak öngörülen başlıca tehditler; artan sıcaklık, okyanus asitlenmesi, hastalıkların ve zararlı alg patlamalarının yaygınlaşması, yağış rejimlerindeki değişimler, deniz seviyesi yükselmesi, tuzluluk dalgalanmaları, dış girdi tedarikindeki belirsizlikler ve aşırı iklim olaylarıdır (Handisyde vd., 2006; Barange vd., 2018). Bununla birlikte, su ürünleri yetiştiriciliğinin zaman, mekân ve ölçek açısından esnek bir yapıya sahip olması, sektörün belirli ölçüde uyum ve manevra kapasitesine sahip olduğunu da göstermektedir (De Silva ve Soto, 2009; Köprücü ve Köprücü, 2023).

Ancak balık popülasyonlarının yaşam döngüsünün farklı evrelerinde bu etkilerden değişen düzeylerde etkilenmesi ve iklim değişikliğinin birleşik etkilerine ilişkin bilimsel bilgi birikiminin sınırlı olması, uyum stratejilerinin planlanmasını ve uygulanmasını güçleştirmektedir (Seggel vd., 2016). Bu durum, iklim değişikliğinin su ürünleri yetiştiriciliği sektörü açısından yönetilmesi gereken karmaşık ve çok boyutlu bir risk unsuru olduğunu ortaya koymaktadır.

2.1. Artan Sıcaklık

Sıcaklık, sucul organizmaların metabolizma, büyüme ve hayatta kalma süreçlerini doğrudan kontrol eden en temel çevresel değişkenlerden biridir (Ngoan, 2018). Poikilotermik özellik gösteren balıklar ve sucul omurgasızlar, vücut sıcaklıklarını bulundukları ortamın sıcaklığına bağlı olarak düzenlediklerinden, iklim değişikliğine bağlı sıcaklık artışlarına karşı özellikle hassas organizmalar olarak kabul edilmektedir (Adhikari vd., 2018). Bu yüzyıl içerisinde küresel ortalama sıcaklığın yaklaşık 1,5 °C artacağına öngörülmesi, başta Atlantik halibutu, somon ve morina gibi soğuk su türleri olmak üzere, gelgit bölgelerinde yaşayan kabuklu canlılarda termal stres kaynaklı ölüm oranlarının artmasına neden olabilecektir (Hamdan vd., 2012).

Uzun süreli ve kronik sıcaklık artışları, su ürünleri yetiştiriciliğinde üretim performansını sınırlayan çok sayıda fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmayı tetiklemektedir. Termal stresin; nöroendokrin düzenleme, osmoregülasyon ve solunum fizyolojisini etkileyerek kardiyorespiratuvar performansı ve aerobik kapasiteyi düşürdüğü, bunun sonucunda bağışıklık yanıtlarının zayıfladığı bildirilmektedir (Zhang vd., 2019). Bu fizyolojik bozulmaların, yemden yararlanma oranlarında düşüşe ve büyüme hızında yavaşlamaya yol açarak ekonomik açıdan önemli pek çok yüzgeçli balık ve kabuklu türün üretim verimliliğini olumsuz etkilediği ifade edilmektedir (Lemasson vd., 2018).

Artan okyanus sıcaklıkları, okyanus asitlenmesi ile birlikte karbon yutak kapasitesinin zayıflamasına, su kütlelerinin hidrografik yapısında değişimlere ve zararlı alg patlamaları ile kırmızı gelgit olaylarının görülme sıklığında artışa neden olabilmektedir (Cochrane vd., 2009). Ayrıca, derin su kütlelerinde gelişen termal tabakalaşma, besin elementlerinin dikey dağılımını değiştirerek yükselme olayları sırasında açık deniz yetiştiriciliğinde ani ve ciddi üretim kayıplarına yol açabilmektedir (Seggel vd., 2016). Buna karşın, ekonomik açıdan en önemli türlerin büyük bir kısmında sıcaklık artışına karşı fizyolojik yanıtların, özellikle embriyo, larva ve yavru gibi erken ontogenetik evreler için yeterince ortaya konmamış olması, mevcut risklerin tam olarak değerlendirilmesini güçleştirmektedir.

Tatlı su sistemlerinde sıcaklık artışlarının etkileri daha hızlı ve belirgin şekilde ortaya çıkmakta, özellikle gölet temelli yetiştiricilik faaliyetleri bu değişimlerden doğrudan etkilenmektedir. Artan sıcaklıkların, gölet ekosistemlerinin işleyişini değiştirerek yüksek sıcaklıklara toleranslı siyanobakterilerin çoğalmasını teşvik ettiği ve buna bağlı olarak şiddetli ötrofikasyon süreçlerini hızlandırdığı bildirilmektedir (Kumar ve Padhy, 2015). Bu süreçlerin, biyolojik çeşitliliği azaltarak su kalitesini bozduğu ve üretim ortamlarını daha kırılgan hâle getirdiği belirtilmektedir (Elayaraj

ve Selvaraju, 2014). Buna ek olarak, kentsel ısı adası etkisiyle meydana gelen görece küçük sıcaklık artışlarının dahi sucul organizmalar üzerinde fizyolojik stres yarattığı ve büyüme sezonlarını önemli ölçüde değiştirebildiği vurgulanmaktadır (De Silva ve Soto, 2009).

Öte yandan, türlerin tolerans sınırları içerisinde kalan daha sıcak dönemler, özellikle ılıman ve yüksek enlemlı bölgelerde yetiştiricilik sezonlarının uzamasına ve sıcak su türlerinin üretiminin artmasına olanak tanıyabilmektedir (Collins vd., 2020). Arktik gibi soğuk bölgelerde, artan sıcaklıkların su ürünleri yetiştiriciliğinin coğrafi olarak genişlemesini destekleyebileceği öngörülmektedir (Chan vd., 2019). Bununla birlikte, genetik ıslah ve moleküler biyoloji uygulamalarının üretimi artırma potansiyeline rağmen, doğal popülasyonlarla melezleşme riskinin çevresel sürdürülebilirlik açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Bueno ve Soto, 2017).

2.2. Oksijen İçeriği

Çözünmüş oksijen, sucul ekosistemlerin yapısını ve işleyişini belirleyen temel çevresel değişkenlerden biri olup, konsantrasyonundaki değişimler küresel karbon ve azot döngüleri üzerinde doğrudan etkilidir (IPCC, 2014). Okyanuslardaki çözünmüş oksijen düzeyleri mekânsal olarak büyük farklılıklar göstermekte; soğuk Antarktik sularında yüksek değerlere ulaşırken, oksijen tüketiminin uzun süreler boyunca yenilenmeyi aşması durumunda bazı kıyısız sedimentlerde tamamen tükenebilmektedir. Açık okyanustaki oksijen minimum zonları (OMZ), kıyısız yükselme bölgeleri ve dolaşımın sınırlı olduğu yarı kapalı denizler, düşük oksijenli sistemlerin başlıca örneklerini oluşturmaktadır (IPCC, 2014).

1960'lı yıllardan bu yana kıyısız sularda gözlenen yaygın oksijen azalması ile birlikte tropikal bölgelerdeki oksijen minimum zonlarının genişleme göstermesi, küresel ölçekte artan bir çevresel sorun olarak değerlendirilmektedir (IPCC, 2014). Açık okyanusun birçok bölgesinde devam eden bu oksijensizleşme sürecinin temel itici gücünün, sera gazı salımlarına bağlı küresel ısınma olduğu kabul edilmektedir. Okyanusların ısınması, oksijenin suda çözünürlüğünü azaltarak küresel oksijen kaybının yaklaşık %15'ine katkıda bulunurken, özellikle üst 1 000 m'lik su tabakasındaki kayıpların büyük bir bölümünü açıklamaktadır; buna karşılık artan su sütunu tabakalaşmasının havalanmayı sınırlaması, toplam oksijen kaybının ana nedenini oluşturmaktadır (Breitburg vd., 2018; Bahri vd 2018).

Modelleme çalışmalarına dayalı projeksiyonlar, kullanılan oksijen eşik değerlerine bağlı olarak, oksijen minimum zonlarının küresel hacminin 2100 yılına kadar %10–30 oranında artabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, gözlemsel veriler ile model sonuçları arasındaki uyumsuzluklar, bu öngörülerin yüksek düzeyde belirsizlik içerdiğine işaret et-

mektedir (Fu vd., 2018).

Düşük oksijen koşulları, türler ve taksonomik gruplar arasında değişen tolerans düzeylerine bağlı olarak biyolojik süreçleri farklı biçimlerde etkilemektedir. Özellikle su sütununda düşük oksijenli alanların varlığı ve genişlemesi, bazı pelajik türlerde dikey göç derinliklerini sınırlandırarak yaşam alanlarının dikey olarak daralmasına ve balıkçılık açısından önemli türler ile bunların avlarının daha sığ derinliklerde yoğunlaşmasına neden olabilmektedir (Eby ve Crowder, 2002; Bahri vd 2018).

2.3. Deniz Seviyesindeki Artış

Deniz seviyesindeki yükselme, iklim değişikliğinin kıyısız sistemler üzerindeki en belirgin fiziksel etkilerinden biri olup, su ürünleri yetiştiriciliği açısından önemli yapısal ve ekolojik riskler oluşturmaktadır. IPCC projeksiyonları, küresel sıcaklık artışının 1,5 °C ile sınırlandırılması durumunda dahi deniz seviyesinin 2100 yılına kadar yükselmeye devam edeceğini, artışın büyüklüğü ve hızının ise gelecekteki sera gazı salım senaryolarına bağlı olarak değişeceğini ortaya koymaktadır (IPCC, 2018).

Deniz seviyesindeki artışın, mangrovlar ve tuzlu bataklıklar gibi kıyısız ekosistemlerin alan kaybetmesine ve yapısal olarak bozulmasına yol açabileceği belirtilmektedir. Bu habitatlar, doğal balık stoklarının korunması ve su ürünleri yetiştiriciliği için yavru temini açısından kritik öneme sahip olup, meydana gelebilecek kayıpların yetiştiricilik üretimini ve sektörün ekonomik sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilemesi beklenmektedir. Ayrıca, kıyı ve alçak rakımlı bölgelerde bulunan yetiştiricilik altyapılarının deniz seviyesindeki yükselmeden doğrudan etkilenmesi, üretim faaliyetlerinin sürekliliğini tehdit edebilmektedir (Kibria vd., 2017).

Buna ek olarak, deniz seviyesindeki artışın ekosistem yapısı üzerinde yarattığı baskılar; tür kompozisyonunda, organizmaların bolluk ve dağılımlarında ve ekosistem üretkenliğinde değişimlere neden olarak hem kıyısız hem de denizel su ürünleri yetiştiriciliği faaliyetlerini dolaylı biçimde etkileyebilmektedir (Doney vd., 2012). Kıyı alanlarında yürütülen su ürünleri yetiştiriciliğinin sağladığı sosyal ve çevresel faydaların bu değişimlerden etkilenmesi ise sektörün uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından dikkate alınması gereken önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir (De Silva ve Soto, 2009).

2.4. Zararlı Alg Patlamaları (HABs)

İklim değişikliğine bağlı sıcaklık artışı, zararlı alg patlamalarının (HABs) oluşumu ve şiddeti üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Su sıcaklıklarının, alglerin maksimum büyümesini destekleyen eşik değerlere yaklaşmasıyla birlikte HAB'ların yoğunluğunun arttığı ve bu durumun

özellikle ısınmaya duyarlı bölgelerde daha belirgin hâle geldiği ortaya konmuştur (Trainer vd., 2020; Gobler, 2020). Bu süreç, su ürünleri yetiştiriciliği açısından çevresel sürdürülebilirliği tehdit eden önemli bir baskı unsuru olarak değerlendirilmektedir (Gobler, 2020).

Flagellatlar ve dinoflagellatlar başta olmak üzere çeşitli zararlı alg gruplarının potansiyel olarak toksik özellikler taşıdığı; bu türlerin yüzgeçli balıklar ve kabuklu canlılar üzerinde ciddi olumsuz etkiler oluşturabildiği bildirilmiştir (Maulu vd., 2021). Ayrıca, zararlı alg patlamalarına maruz kalan ikikabuklu yumuşakçalarda inflamasyon, atrofi ve nekroz gibi yapısal bozulmaların gözlemlendiği rapor edilmiştir (Rolton vd., 2022).

Kıyısız alanlar, açık denizlere kıyasla daha hızlı ısınmaları ve yoğun besin girdilerine maruz kalmaları nedeniyle HAB'lar açısından daha yüksek risk taşımaktadır (Halpern vd., 2008). Aşırı besin yüklenmesi ve uzun su kalış süreleri, zararlı alglerin gelişimini teşvik ederken; alg patlamaları sırasında artan organik madde, mikrobiyal solunumu artırarak çözünmüş oksijenin azalmasına ve hipoksinin şiddetlenmesine yol açmaktadır (Griffith ve Gobler, 2020).

Tatlı su sistemlerinde ise sıcaklık artışının özellikle siyanobakteriyel alg patlamalarını güçlendirdiği; bu gruba ait türlerin, zararsız ökaryotik alg türlerine kıyasla daha yüksek optimum büyüme sıcaklıklarına sahip olduğu gösterilmiştir (Trainer vd., 2020). Ilıman bölgelerde ilkbahar döneminde gelişen alg patlamaları sırasında oluşan hızlı ısınma ve tabakalaşmanın, su sütununda eş zamanlı hipoksi ve asitleşmeyi desteklediği belirtilmektedir (Martin vd., 2011).

2.5. Artan Sıcaklığın Su Ürünleri Yetiştiriciliğinde Hastalık Dinamikleri Üzerine Etkileri

Artan su sıcaklıkları, su ürünleri yetiştiriciliğinde bakteriyel, viral, parazitik ve fungal hastalıkların görülme sıklığını ve şiddetini doğrudan ve dolaylı yollarla etkileyebilmektedir. Özellikle termal stres altında kalan yetiştirilen türlerin bağışıklık dirençlerinin azalması, hastalıklara karşı duyarlılığı artırmakta ve sıcak koşulların egzotik patojenlerin yerleşmesini kolaylaştırabileceği belirtilmektedir (Collins vd., 2020). Bu bağlamda, değişen iklim koşulları altında sıcak su kaynaklı hastalık salgınlarının daha sık ortaya çıkması ve yeni hastalıkların gelişmesi olası görülmektedir (Sae-Lim vd., 2017).

Sıcaklık artışının, patojenlerin çoğalma hızını, virülansını, yaşam döngüsünü ve türler arasındaki bulaşma potansiyelini artırdığı; bu durumun hem yüzgeçli balıklar hem de kabuklu türler için ciddi üretim kayıplarına yol açabildiği bildirilmektedir (Marcogliese, 2008). Epizootik hastalıkların ortaya çıkışı, birçok ülkede su ürünleri yetiştiriciliğinin ba-

şarısını sınırlayan temel faktörlerden biri olmaya devam etmekte ve artan tedavi gereksinimleri nedeniyle ekonomik yükü artırmaktadır (Collins vd., 2020).

Öte yandan, ılıman ve soğuk su koşullarına özgü bazı hastalıkların, artan sıcaklıklar nedeniyle giderek elverişsiz hâle gelen çevresel koşullar sonucunda önemini yitirebileceği ifade edilmektedir. Özellikle Atlantik somonunu etkileyen vibriyozis ve kış yarası gibi soğuk su hastalıklarının görülme sıklığının azalmasının, bu türün yetiştiriciliği açısından görece bir avantaj yaratabileceği öne sürülmektedir (Sae-Lim vd., 2017).

2.6. Deniz Yüzeyi Tuzluluğundaki Değişimler ve Su Ürünleri Yetiştiriciliğine Etkileri

Tuzluluk; yağış, buzulların erimesi, nehir girdileri, buharlaşma ile su kaybı ve okyanus dolaşımı gibi süreçlerin bir sonucu olarak değişkenlik gösteren temel bir çevresel parametre olarak tanımlanmaktadır (Cochrane vd., 2009). Artan sıcaklıkla birlikte buharlaşmanın şiddetlenmesi, okyanus dolaşımındaki değişimler ve iklim değişikliğinin doğrudan etkileri deniz yüzeyi tuzluluğunda belirgin değişimlere yol açabilmektedir (Robinson vd., 2005). Bu değişimler, termal tabakalaşma ve okyanus dolaşımını etkileyerek ısı, karbon ve besin maddelerinin dağılımını değiştirmekte; dolayısıyla su ürünleri yetiştiriciliğinin çevresel sürdürülebilirliği üzerinde baskı oluşturmaktadır (Seggel vd., 2016).

Çoğu sucul organizma yalnızca belirli bir tuzluluk aralığında yaşamını sürdürebilmekte olup, bu sınırların aşılması hayatta kalma, büyüme ve bağışıklık yanıtlarında bozulmalara neden olabilmektedir. Örneğin, çizgili yayın balığında yüksek tuzluluk düzeylerinin büyüme performansını ve kırmızı kan hücre sayısını azalttığı bildirilmiştir. Benzer şekilde, yüksek tuzluluğun tatlı su karideslerinde üretim performansını düşürdüğü, genç istiridyelerde ölüm oranlarını artırdığı ve tuzluluk değişimlerinin istiridyelerde bağışıklık sistemini zayıflattığı belirtilmektedir. Midyelerin daha geniş bir tuzluluk toleransına sahip olduğu ifade edilse de, uzun süreli aşırı koşullara dayanamadıkları vurgulanmaktadır. Ayrıca, iklim değişikliğine bağlı tuzlu su girişlerinin kıyı bölgelerinde abalone yetiştiriciliğinde artan ölümlere yol açabileceği öngörülmektedir (Maulu vd., 2021).

Deniz seviyesinin yükselmesine bağlı olarak tuzlu suyun iç bölgelere ilerlemesi, özellikle tatlı su su ürünleri yetiştiriciliği sistemlerini daha kırılgan hâle getirmektedir (Kibria vd., 2017). Bu durum, haliç alanlarında biyotik değişimlere neden olmakta ve yavru temini açısından kritik öneme sahip ekosistemleri olumsuz etkilemektedir (De Silva ve Soto, 2009; Kibria vd., 2017). Ek olarak, dik topoğrafya ve insan yapımı kıyı yapıları, habitatların kara içine doğru göçünü engelleyerek tuzluluk etkisini artırmakta ve üreme başarısını azaltabilmektedir (Iwamura vd., 2013).

Artan tuzluluk baskısına karşı, yetiştiricilik faaliyetlerinin yukarı havzalara kaydırılması, tuzluluğa dayanıklı suşların geliştirilmesi veya toleranslı türlerin üretime dâhil edilmesi gibi uyum stratejileri önerilmektedir (Melero-Jiménez vd., 2020). Ancak bu uygulamaların yüksek maliyetleri ve sosyo-ekonomik etkileri nedeniyle sektör açısından önemli zorluklar barındırdığı belirtilmektedir (De Silva ve Soto, 2009).

2.7. Yağış Düzenindeki Değişimler ve Su Ürünleri Yetiştiriciliği

İklim değişikliğine bağlı yağış rejimindeki değişimler, su ürünleri yetiştiriciliğini hem aşırı yağış ve taşkınlar hem de kuraklık yoluyla doğrudan etkilemektedir. Son yıllarda tayfunlar, kasırgalar ve ani sellerin, nehir ve göl sistemlerinde kurulu kafes ve havuz yetiştiriciliğinde ciddi yapısal hasarlara ve ekonomik kayıplara neden olduğu; çok sayıda balığın kaçışıyla sonuçlandığı bildirilmektedir (Soto vd., 2019). Artan sıcaklıkların muson yağışlarında belirgin dalgalanmalara yol açabileceği ve yağış miktarlarının normal seviyelerin %70'ine kadar düşebileceği öngörülmektedir (Schewe ve Levermann, 2012). Güneydoğu Asya'da aşırı muson taşkınlarına yatkınlığın artması, yetiştiricilik açısından önemli bir risk unsuru olarak değerlendirilmektedir (Loo vd., 2015).

Aşırı yağışlar ve taşkınlar, havuz ve kafes sistemlerinde balık kayıpları, istenmeyen türlerin sisteme girişi ve altyapı hasarları yoluyla üretim ve kârlılığı olumsuz etkilemektedir (Rutkayová vd., 2017). Taşkın suları ile taşınan sedimentlerin birikmesi su derinliklerini azaltmakta; balık popülasyonlarının tür bileşimi ve dağılımında değişimlere neden olmaktadır (Rutkayová vd., 2018; Nayak ve Shukla, 2023). Ayrıca, sıcak dönemlerde yoğun yağış sırasında çözülmüş oksijen düzeylerinin düşmesiyle bazı türlerde mortalite oranlarının arttığı ve şiddetli seller sırasında balıkların havuzlar arasında yer değiştirdiği bildirilmiştir (Adhikari vd., 2018). Taşkınların nehir ekosistemlerindeki besin ağlarını bozarak balık popülasyonlarını olumsuz etkilediği de vurgulanmaktadır (Yadav vd., 2024).

Öte yandan, yağış düzenindeki değişimler su stresi ve kuraklık risklerini de artırmaktadır. Küresel ölçekte 2 °C'lık ısınma koşullarında kuraklık kaynaklı risklerin daha belirgin hâle gelmesi beklenirken, su kıtlığının su ürünleri yetiştiriciliği, tarım ve diğer kullanıcılar arasında rekabeti artıracığı ifade edilmektedir (Barange vd., 2018). Asya ve Afrika'daki önemli nehir ve göllerde mevcut su miktarının azalması, balıkların üreme, göç ve yavru temini süreçlerini olumsuz etkilemektedir (IPCC, 2007). Buna karşılık, bazı tropikal ve alçak rakımlı bölgelerde artan yağışların yağmur suyuna bağımlı yetiştiricilik alanlarını genişletebileceği ve bu durumun üretim açısından sınırlı da olsa fırsatlar sunabileceği belirtilmektedir (Bell vd., 2013).

2.8. Okyanus Asitleşmesi

Okyanus asitleşmesi, başta atmosferik CO₂'nin okyanuslar tarafından emilmesi olmak üzere, deniz suyunun pH düzeylerinde on yıllar boyunca meydana gelen azalma olarak tanımlanmaktadır (Bahri vd., 2018). Sanayileşmenin başlangıcından bu yana açığa çıkan CO₂ emisyonlarının yaklaşık yarısının okyanuslar tarafından absorbe edildiği bildirilmekte olup, bu durum okyanusların küresel karbon döngüsündeki kritik rolünü ortaya koymaktadır (Seggel vd., 2016). Atmosferden alınan CO₂'nin deniz suyuyla çözünmesi, karbonat kimyasını değiştirerek pH düşüşüne ve kalsiyum karbonat doygunluğunda azalmaya neden olmaktadır (Richards vd., 2015).

Küresel sıcaklık artışının 1,5 °C ve üzerine çıktığı senaryolarda, artan CO₂ alımının birçok sucul türün büyüme, gelişme, kalsifikasyon ve hayatta kalma oranları üzerinde olumsuz etkiler yaratacağı öngörülmektedir (IPCC, 2018). Özellikle karides, midye, istiridye ve mercanlar gibi kabuk oluşturan organizmalarda karbonat iyonlarının erişilebilirliğinin azalması, iskelet oluşumunu sınırlamakta ve denizel su ürünleri yetiştiriciliği açısından önemli riskler oluşturmaktadır (Kibria vd., 2017).

Okyanus asitleşmesi, sucul organizmaların fizyolojik ve metabolik süreçlerini de etkileyerek hücreler arası taşıma mekanizmalarında bozulmalara yol açabilmektedir. Türlerin bu sürece verdiği tepkiler; adaptasyon kapasiteleri, çevresel değişimin hızı ve biyofiziksel geri besleme mekanizmalarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yüzgeçli balıklarda ise asitleşmenin etkileri henüz yeterince açıklığa kavuşmamış olmakla birlikte, otolit kalsifikasyonu, büyüme, doku bütünlüğü ve solunum fonksiyonları üzerinde olumsuz sonuçlar doğurabileceği bildirilmektedir (Maulu vd., 2021).

Makroalg üretimi açısından bakıldığında, okyanus asitleşmesinin etkileri türlerin inorganik karbon alım kinetiklerine bağlı olarak değişmekte; özellikle kalsifiye makroalglerin daha hassas gruplar arasında yer aldığı ifade edilmektedir (Chung vd., 2017). Bununla birlikte, üretimin belirli bölgelerle sınırlı olması ve karbonat kimyasındaki geleceğe yönelik değişimlerin belirsizliği, bu alandaki uzun dönemli etkilerin öngörülmesini güçleştirmektedir (Gubbins vd., 2013). Ayrıca, okyanus asitleşmesinin ticari türlerin fizyolojik ve besinsel özelliklerini etkileyerek tüketici tercihlerini dolaylı biçimde değiştirebileceği de vurgulanmaktadır (Martin vd., 2019).

2.9. Biyoçeşitlilik Üzerindeki Etkiler

İklim değişikliğinin biyoçeşitlilik üzerindeki etkileri, yerli türlerle artan kaynak ve habitat rekabeti sonucunda habitatların dönüşmesine, pato-

jen organizmaların yayılmasına ve melezleşme ile gen akışı (introgresyon) yoluyla genetik etkileşimlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Habi-bullah vd., 2022). Artan su sıcaklıkları ve değişen okyanus akıntıları, balık türlerinin daha uygun çevresel koşullara sahip yeni alanlara yönelmesini teşvik ederek, yerel tür dağılımlarını ve bölgesel biyoçeşitliliği etkilemektedir (Perry vd., 2005).

İklim değişikliğine bağlı çevresel dalgalanmalar, balıkların üreme döngülerini bozmakta; üreme mevsimlerinde ve yumurtlama davranışlarında değişimlere yol açmaktadır. Daha sıcak su koşulları bazı türlerde büyüme hızını artırırken, diğer türlerde büyümeyi sınırlayarak popülasyon yapısı ve tür çeşitliliği üzerinde farklı yönlerde etkiler yaratabilmektedir (Munday vd., 2010). Buna ek olarak, habitat kaybı; balıkların üreme, beslenme ve yavru gelişim alanlarını daraltarak popülasyon bolluğunda ve tür çeşitliliğinde azalmaya neden olmaktadır (Hughes vd., 2018).

Su ürünleri yetiştiriciliğinde uygulanan seçici ıslah çalışmaları ve genetik sürüklenmenin, kültür popülasyonlarının genetik yapısını değiştirdiği ve bazı durumlarda yüksek düzeyde akrabalı yetiştirmeye yol açtığı bildirilmektedir (Pauls vd., 2013). Yetiştiricilik sistemlerinden kaçan bireylerle doğal popülasyonlar arasında gerçekleşen genetik etkileşimler ve mutasyonlar, yabani türlerin gen havuzlarını etkileyerek doğal biyoçeşitlilik üzerinde uzun vadeli baskılar oluşturabilmektedir (Yadav vd., 2024).

3. Sonuçlar

İklim değişikliğinin su ürünleri yetiştiriciliği sektörünü çevresel, biyolojik ve sosyoekonomik boyutlarıyla çok yönlü biçimde etkilediğini ortaya koymaktadır. Artan hava ve su sıcaklıkları, çözünmüş oksijen seviyelerindeki düşüş, yağış rejimlerindeki düzensizlikler, tuzluluk dalgalanmaları, deniz seviyesindeki yükselme ve okyanus asitleşmesi; yetiştirilen türlerin fizyolojik tolerans sınırlarını zorlamakta ve üretim sistemlerinin istikrarını tehdit etmektedir. Bu çevresel baskılar, büyüme performansında düşüş, artan mortalite oranları, hastalık sıklığında artış ve üretim kayıpları ile doğrudan ilişkilendirilmektedir.

İklim değişikliğinin etkilerinin, yetiştiricilik ortamına (tatlı su, acı su ve denizel), coğrafi konuma, üretim ölçeğine ve yetiştirilen türlerin ekolojik özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde farklılaştığı görülmektedir. Özellikle küçük ölçekli ve gelişmekte olan ülkelerde faaliyet gösteren işletmeler, sınırlı teknik ve ekonomik kapasite nedeniyle iklim kaynaklı çevresel şoklara karşı daha kırılgan bir yapı sergilemektedir. Bu durum, iklim değişikliğinin yalnızca ekolojik değil, aynı zamanda gıda güvenliği, geçim kaynakları ve kırsal kalkınma açısından da kritik bir risk unsuru olduğunu göstermektedir.

Okyanus asitleşmesi ve çözünmüş oksijen azalması gibi süreçlerin, özellikle kabuklu organizmalar ve erken yaşam evreleri üzerinde yarattığı baskılar, denizel su ürünleri yetiştiriciliğinin geleceği açısından önemli belirsizlikler barındırmaktadır. Buna ek olarak, zararlı alg patlamalarının yaygınlaşması ve hastalık dinamiklerindeki değişimler, üretim sürdürülebilirliğini daha da karmaşık hâle getirmektedir. Tüm bu bulgular, iklim değişikliğinin su ürünleri yetiştiriciliği sektörü için yönetilmesi gereken çok boyutlu ve uzun vadeli bir risk alanı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, iklim değişikliğinin su ürünleri yetiştiriciliği üzerindeki etkilerinin azaltılması; bilimsel bilgiye dayalı, esnek ve uyum odaklı politikaların geliştirilmesiyle mümkün olacaktır. Bu çerçevede, çevresel sürdürülebilirlik ile ekonomik ve sosyal hedeflerin birlikte ele alındığı bütüncül yaklaşımlar, sektörün geleceği açısından kaçınılmaz bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Kaynaklar

- A, Malham S, Murray A, Stanley M (2020) Impacts of climate change on aquaculture. *MCCIP Sci Rev* 2020:482–520. [https:// doi. org/ 10. 14465/ 2020. arc21](https://doi.org/10.14465/2020.arc21). Aqu
- Adhikari S, Keshav CA, Barlaya G, Rathod R, Mandal RN, Ikmail S, Saha GS, De HK, Sivaraman I, Mahapatra AS, Sarkar S (2018) Adaptation and mitigation strategies of climate change impact in freshwater aquaculture in some states of India. *J Fish Sci Com* 12(1):16–21
- Ahmed N, Thompson S, Glaser M (2019) Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environ Manage* 63:159–172. [https:// doi. org/ 10. 1007/s00267- 018- 1117-3](https://doi.org/10.1007/s00267-018-1117-3)
- Bahri, T., Barange, M., and Moustahfid, H. (2018). “Chapter 1: climate change and aquatic systems,” in *Impacts of Climate Change on Fisheries and Aquaculture, Synthesis of Current Knowledge, Adaptation and Mitigation Options*, eds M. Barange, T. Bahri, M. C. M. Beveridge, K.L. Cochrane, S. Funge-Smith, and F. Poulaine (Rome: FAO), 1–17.
- Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C. M., Cochrane, A. L., Funge-Smith, S., and Paulain, F. (2018). *Impacts of Climate Change on Fisheries and Aquaculture, Synthesis of Current Knowledge, Adaptation and Mitigation Options*. Rome: FAO.
- Bell, J. D., Ganachaud, A., Gehrke, P. C., Griffiths, S. P., Hobday, A. J., Hoegh-Guldberg, O., et al. (2013). Mixed responses of tropical Pacific fisheries and aquaculture to climate change. *Nat. Clim. Change* 3, 591–599. doi: 10.1038/nclimate1838
- Breitbart D, Levin LA, Oschlies A, Gregoire M, Chavez FP, Conley DJ, Garcon V, Gilbert D, Gutierrez D, Isensee K, Jacinto GS (2018) Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science* 359(6371):7240. [https:// doi. org/ 10. 1126/ scien ce. aam72 40](https://doi.org/10.1126/science.aam7240)
- Bueno, P. B., and Soto, D. (2017). *Adaptation Strategies of the Aquaculture Sector to the Impacts of Climate Change*. Rome: FAO.
- Chan, F. T., Stanislawczyk, K., Sneekes, A. C., Dvoretzky, A., Gollasch, S., Minchin, D., et al. (2019). Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: current trends and future invasion risks. *Glob. Change Biol.* 25, 25–38. doi: 10.1111/gcb.14469
- Chung, I. K., Sondak, C. F. A., and Beardall, J. (2017). The future of seaweed aquaculture in a rapidly changing world. *Eur. J. Phycol.* 52, 495–505. doi: 10.1080/09670262.2017.1359678
- Cochrane, K., De Young, C., Soto, D. T., and Bahri, D. T. (2009). *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 530. Rome: FAO.

- Dahms C, Killen SS (2023) Temperature change effects on marine fish range shifts: a meta-analysis of ecological and methodological predictors. *Glob Change Biol* 29(16):4459–79. <https://doi.org/10.1111/gcb.16770>
- De Silva, S. S., and Soto, D. (2009). “Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation,” in *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 530, eds K. Cochrane, C. De Young, D. Soto, and T. Bahri (Rome: FAO), 151–212.
- Dervash MA, Yousuf A, Ozturk M, Bhat RA (2023) Global warming: impacts of temperature escalation. In: Dervash MA, Yousuf A, Ozturk M, Bhat RA (eds) *Phytosequestration: strategies for mitigation of aerial carbon dioxide and aquatic nutrient pollution*. Springer International Publishing, Cham, pp 27–36
- Doğan S. ve Köprücü, S. (2024). Balık hastalıklarında tıbbi bitkilerin kullanımı. Book chapter. *Livre de Lyon yayınevi. Balık Sağlığı Araştırmalarında Modern ve Geleceğe Yönelik Yaklaşımlar. Bölüm VI. Editörler: Prof. Dr. Sibel KÖPRÜCÜ, Prof. Dr. Ünal İSPİR sayfa: 131-148.*
- Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Duffy, J. E., Barry, J. P., Chan, F., English, C. A., et al. (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 4, 11–37. doi: 10.1146/annurev-marine-041911-111611
- Eby, L.A. & Crowder, L.B. 2002. Hypoxia-based habitat compression in the Neuse River Estuary: context-dependent shifts in behavioral avoidance thresholds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59(6): 952–965. (also available at <https://doi.org/10.1139/f02-067>).
- Elayaraj B, Selvaraju M (2014) Studies on some physico-chemical parameters of cyanophycean members and correlation coefficient of eutrophic ponds in Chidambaram, Tamil Nadu, India. *Int Lett Nat Sci* 16:145–56 Collins C, Bresnan E, Brown L, Falconer L, Guildler J, Jones L, Kennerley
- FAO (2018). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2018: Contributing to Food Security and Nutrition for All*. Rome: FAO.
- FAO (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in Action*. Rome: FAO.
- Fleming, A., Hobday, A. J., Farmery, A., van Putten, E. I., Pecl, G. T., Green, B. S., et al. (2014). Climate change risks and adaptation options across Australian seafood supply chains—a preliminary assessment. *Clim. Risk Manage.* 1, 39–50. doi: 10.1016/j.crm.2013.12.003
- Fu, W., Primeau, F., Moore, J. K., Lindsay, K. & Randerson J.T. 2018. Reversal of increasing tropical ocean hypoxia trends with sustained climate warming. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(4): 551–564. (also available at <https://doi.org/10.1002/2017GB005788>).
- Galappaththi E, Berkes F, Ford J (2019) Climate change adaptation efforts in coastal shrimp aquaculture: a case from Northwestern Sri Lanka. In: Johnson J, De Young C, Bahri T, Soto D, Virapat C (eds) *Proceedings of FishAdapt: The Global Conference on Climate Change Adaptation for Fisheries and Aquaculture*, Bangkok, 8–10 August, 2016, (pp. 89–98). FAO

- Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 61. FAO, Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Gobler CJ (2020) Climate change and harmful algal blooms: insights and perspective. *Harmful Algae* 91:101731. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. hal. 2019. 101731](https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101731)
- Griffith AW, Gobler CJ (2020) Harmful algal blooms: a climate change co-stressor in marine and freshwater ecosystems. *Harmful Algae* 91:101590. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. hal. 2019. 03. 008](https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.03.008)
- Gubbins, M., Bricknell, I., and Service, M. (2013). Impacts of climate change on aquaculture. *MCCIP Sci. Rev.* 2013, 318–327. doi: 10.14465/2013.arc33.318-327
- Habibullah MS, Din BH, Tan SH, Zahid H (2022) Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence. *Environ Sci Pollut Res* 29(1):1073–86. [https:// doi. org/ 10. 1007/ s11356- 021- 15702-8](https://doi.org/10.1007/s11356-021-15702-8)
- Halpern BS, Walbridge S, Selkoe KA, Kappel CV, Micheli F, d'AgrosaC, Bruno JF, Casey KS, Ebert C, Fox HE, Fujita R (2008) A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* 319(5865):948–952
- Hamdan, R., Kari, F., Othman, A., and Samsi, S.M. (2012). “Climate change, socioeconomic and production linkages in EastMalaysia aquaculture sector,” in 2012 International Conference on Future Environment and Energy IPCBEE, Vol. 28 (Singapore: IACSIT Press).
- Handisyde, N. T., Ross, L. G., Badjeck, M. C., and Allison, E. H. (2006). The Effects of Climate Change on World Aquaculture: A Global Perspective. Final Technical Report. Stirling: DFID Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture.
- Handisyde, N., Telfer, T. C., and Ross, L. G. (2017). Vulnerability of aquaculture related livelihoods to changing climate at the global scale. *Fish Fish.* 18, 466–488. doi: 10.1111/faf.12186
- Ho CH, Chen JL, Nobuyuki Y, Lur HS, Lu HJ (2016) Mitigating uncertainty and enhancing resilience to climate change in the fisheries sector in Taiwan: policy implications for food security. *Ocean Coast Manage* 130:355–372. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. Oceco aman. 2016. 06. 020](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.06.020)
- Hughes TP, Kerry JT, Baird AH, Connolly SR, Dietzel A, Eakin CM, Heron SF, Hoey AS, Hoogenboom MO, Liu G, McWilliam MJ (2018) Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature* 556(7702):492–6. [https:// doi. org/ 10. 1038/ s41586- 018- 0041-2](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2)
- IPCC (2014). Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report on the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core writing team, R. K. Pachauri and L.A. Meyer. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 151 pp. Available online at: http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- IPCC (2018). Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-industrial Levels and Related Global

Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, eds V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield.

IPCC. 2007. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, eds. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 976 pp. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf.

Iwamura T, Possingham HP, Chades I, Minton C, Murray NJ, Rogers DI, Treml EA, Fuller RA (2013) Migratory connectivity magnifies the consequences of habitat loss from sea-level rise for shorebird populations. *Proc R Soc B: Biol Sci* 280(1761):20130325. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0325>

Jahan, A., Nipa, T. T., Islam, S. M. M., Uddin, M. H., Islam, M. S., and Shahjahan, M. (2019). Striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*) could be suitable for coastal aquaculture. *J. Appl. Ichthyol.* 35, 994–1003. doi: 10.1111/jai.13918

Kılınç, N.Ö. ve Köprücü, S. (2022a). İnsan sağlığı ve su ürünleri. Eğitim Yayınevi, Sağlık Bilimleri Alanında Uluslararası Araştırmalar XII, Aralık, 211-231.

Kılınç, N.Ö. ve Köprücü, S. (2022b). Su ürünlerinden insanlara bulaşan hastalıklar ve korunma yolları. Eğitim Yayınevi, Sağlık Bilimleri Alanında Uluslararası Araştırmalar XII, Aralık, 351-375.

Kibria, G., Haroon, Y. A. K., and Dayanthi, N. (2017). Climate change impacts on tropical and temperate fisheries, aquaculture, and seafood security and implications—a review. *Livestock Res. Rural Dev.* 29:22.

King, A. D., and Harrington, L. J. (2018). The inequality of climate change from 1.5 to 2 C of global warming. *Geophys. Res. Lett.* 45, 5030–5033. doi: 10.1029/2018GL078430

Köprücü S. ve Köprücü K. (2023). Su Ürünleri Üretiminde verimliliği Artıran Teknolojiler. Ziraat Orman ve Su Ürünleri Alanında Akademik Araştırma ve Derlemeler. Bölüm 15. Editörler: Prof. Dr. Ali Musa Bozdoğan , Prof. Dr. Nigar Yarpuz Bozdoğan, sayfa 337-360.

Kumar M, Padhy PK (2015) Environmental perspectives of pond ecosystems: global issues, services and Indian scenarios. *Curr World Environ* 10(3):848–67

Kundzewicz ZW, Mata LJ, Arnell NW, Doll P, Kabat P, Jimenez B, Miller K, Oki T, Zekai S, Shiklomanov I (2007) Freshwater resources and their management. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) *Climate change: impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group ii to the fourth assessment report of the*

- intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, pp 173–210
- Lemasson, A. J., Hall-Spencer, J. M., Fletcher, S., Provstgaard-Morys, S., and Knights, A. M. (2018). Indications of future performance of native and nonnative adult oysters under acidification and warming. *Mar. Environ. Res.* 142, 178–189. doi: 10.1016/j.marenvres.2018.10.003
- Leng P, Li Z, Zhang Q, Koschorreck M, Li F, Qiao Y, Xia J (2023) Deciphering large-scale spatial pattern and modulators of dissolved greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) along the Yangtze River, China. *J Hydrol* 623:129710. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129710>
- Loo YY, Billa L, Singh A (2015) Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. *Geosci Front* 6(6):817–823. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.009>
- Marcogliese, D. J. (2008). The impact of climate change on the parasites and infectious diseases of aquatic animals. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz* 27, 467–484. doi: 10.20506/rst.27.2.1820
- Martin P, Lampitt RS, Perry MJ, Sanders R, Lee C, D’Asaro E (2011) Export and mesopelagic particle flux during a North Atlantic spring diatom bloom. *Deep-Sea Res I: Oceanogr Res* 58(4):338–49. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.006>
- Martin VAS, Gelcich S, VasquezLavin F, Ponce Oliva RD, Hernandez JI, Lagos NA, Birchenough SN, Vargas (2019) Linking social preferences and ocean acidification impacts in mussel aquaculture. *Sci Rep* 9(1):4719. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41104-5>
- Maulu S, Hasimuna OJ, Haambiya LH, Monde C, Musuka CG, Makorwa TH, Munganga BP, Phiri KJ and Nsekanabo JD (2021) Climate Change Effects on Aquaculture Production: Sustainability Implications, Mitigation, and Adaptations. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:609097. doi: 10.3389/fsufs.2021.609097
- Melero-Jimenez IJ, Martin-Clemente E, Garcia-Sanchez MJ, Banares-Espana E, Flores-Moya A (2020) The limit of resistance to salinity in the freshwater cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* is modulated by the rate of salinity increase. *Ecology and Evolution* 10(11):5045–55. <https://doi.org/10.1002/ece3.6257>
- Munday PL, Dixon DL, McCormick MI, Meekan M, Ferrari MC, Chivers DP (2010) Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification. *PNAS* 107(29):12930–4. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004519107>
- Myers SS, Smith MR, Guth S, Golden CD, Vaitla B, Mueller ND, Dangour AD, Huybers P (2017) Climate change and global food systems: potential impacts on food security and under nutrition. *Annu Rev Public Health* 38:259–277
- Nayak D, Shukla AK (2023) Review of state-of-the-art research on river hydrological hazards, restoration, and management. In: Pandey M,

- Azamathulla H, Pu JH (eds) River dynamics and flood hazards. Disaster resilience and green growth. pp 463–482. Springer, Singapore. [https:// doi. org/ 10. 1007/ 978- 981- 19- 7100-6_ 25](https://doi.org/10.1007/978-981-19-7100-6_25)
- Ngoan, L. D. (2018). Effects of climate change in aquaculture: case study in Thua Thien Hue Province, Vietnam. Biomed. J. Sci. Tech. Res. 10:2018.doi: 10.26717/BJSTR.2018.10.001892
- Palmer, T., and Stevens, B. (2019). The scientific challenge of understanding and estimating climate change. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 116, 24390–24395. doi: 10.1073/pnas.1906691116
- Park JH, Duan L, Kim B, Mitchell MJ, Shibata H (2010) Potential effects of climate change and variability on watershed biogeochemical processes and water quality in Northeast Asia. Environ Int 36(2):212–225. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. envint. 2009. 10. 008](https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.10.008)
- Pauls SU, Nowak C, Balint M, Pfenninger M (2013) The impact of global climate change on genetic diversity within populations and species. MolEcol 22(4):925–946. [https:// doi. org/ 10. 1111/mec. 12152](https://doi.org/10.1111/mec.12152)
- Perry AL, Low PJ, Ellis JR, Reynolds JD (2005) Climate change and distribution shifts in marine fishes. Science 308(5730):1912– 1915. [https:// doi. org/ 10. 1126/ scien ce. 11113 22](https://doi.org/10.1126/science.1111322)
- Richards, R. G., Davidson, A. T., Meynecke, J., Beattie, K., Hernaman, V., Lynam, T., et al. (2015). Effects and mitigations of ocean acidification on wild and aquaculture scallop and prawn fisheries in Queensland, Australia. Fish. Res. 161, 42–56. doi: 10.1016/j.fishres.2014.06.013
- Robinson, R. A., Learmonth, J. A., Hutson, A. M., Macleod, C. D., Sparks, T. H., Leech, D. I., et al. (2005). Climate Change and Migratory Species. British Trust for Ornithology. Thetford: The Nunnery.
- Rolton A, Rhodes L, Hutson KS, Biessy L, Bui T, MacKenzie L, Symonds JE, Smith KF (2022) Effects of harmful algal blooms on fish and shellfish species: a case study of New Zealand in a changing environment. Toxins 14(5):341. [https:// doi. org/ 10. 3390/ toxin s1405 0341](https://doi.org/10.3390/toxin14050341)
- Rutkayova J, Vacha F, Maršálek M, Beneš K, Civišova H, Horka P, Petrašková E, Rost M, Šulista M (2018) Fish stock losses due to extreme floods—findings from pond-based aquaculture in the Czech Republic. J Flood Risk Manag 11(3):351–359
- Sae-Lim P, Kause A, Mulder HA, Olesen I (2017) Breeding and genetics symposium: Climate change and selective breeding in aquaculture. J Anim Sci 95(4):1801–1812. [https:// doi. org/ 10. 2527/jas. 2016. 1066](https://doi.org/10.2527/jas.2016.1066)
- Schewe J, Levermann A (2012) A statistically predictive model for future monsoon failure in India. Environmen Rese Lett 7(4):044023. [https:// doi. org/ 10. 1088/ 1748- 9326/ 7/ 4/ 044023](https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044023)
- Seggel, A., De Young, C., and Soto, D. (2016). Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Summary of the Findings of the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1122. Rome: FAO.

- Soto J, Palenzuela JA, Galve JP, Luque JA, Azanon JM, Tamay J, Irigaray C (2019) Estimation of empirical rainfall thresholds for landslide triggering using partial duration series and their relation with climatic cycles. An application in southern Ecuador. *Bull EngGeol Environ* 78:1971–1987
- Sun Y (2023) Effects of ocean acidification on the marine organisms. *Highl Sci Eng Technol* 69:342–348. <https://doi.org/10.54097/hset.v69i.12130>
- Trainer VL, Moore SK, Hallegraeff G, Kudela RM, Clement A, Mardones JI, Cochlan WP (2020) Pelagic harmful algal blooms and climate change: lessons from nature's experiments with extremes. *Harmful algae* 91:101591. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.03.009>
- Troell, M., Eide, A., Isaksen, J., Hermansen, Ø., and Crépin, A. S. (2017). Seafood from a changing Arctic. *Ambio* 46, S368–S386. doi: 10.1007/s13280-017-0954-2
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33397-5>
- Zhang, P. F., Zhao, T., Zhou, L., Han, G. D., Shen, Y. W., and Ke, C. H. (2019). Thermal tolerance traits of the undulated surf clam *Paphia undulata* based on heart rate and physiological energetics. *Aquaculture* 498, 343–350. doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.08.037

Bölüm 19

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE KUANTUM NOKTA TABANLI YENİLİKLER

Özden BARIM ÖZ¹

Sibel DOĞAN²

1 Prof.Dr.,Fırat Üniversitesi,Su Ürünleri Fakültesi,Su Ürünleri Yetiştiriciliği ABD,Elazığ/Türkiye, ORCID0000-0002-4202-8402/ obarimoz@firat.edu.tr

2 Dr. Öğr. Üyesi, Fırat Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Balık Hastalıkları ABD, Elazığ/Türkiye, ORCID: 0000-0003-4569-5435/ sibeldogan@firat.edu.tr

1. Giriş

Tarım sektörleri arasında su ürünleri yetiştiriciliği, en yüksek büyüme hızına ve genişleme açısından en umut verici potansiyele sahip alanlardan biridir (FAO, 2018). Bu sektör, dünya genelinde milyarlarca insan için kolay sindirilebilir protein, sağlıklı yağ asitleri, temel besin öğeleri ve hayati vitaminlerin önemli bir kaynağını oluşturmaktadır (Kılınç ve Köprücü, 2022a; Batool vd., 2025). Aynı zamanda su ürünleri yetiştiriciliği, kârlı bir ihracat endüstrisi olma potansiyeli taşımasının yanı sıra, özellikle kırsal bölgelerde istihdam yaratmakta ve sürdürülebilir geçim kaynakları sunmaktadır (Mapfumo, 2022). FAO verilerine göre, 1961–2016 yılları arasında küresel balık tüketimi yıllık ortalama %3,2 oranında artış göstermiştir. Dünya genelinde 3,2 milyar insanın günlük hayvansal protein alımının yaklaşık %20'si su ürünleri kaynaklı olmuştur (FAO, 2018). Bununla birlikte, su ürünleri yetiştiriciliğindeki bu hızlı büyüme, çeşitli çevresel sorunlar nedeniyle ciddi kısıtlamalarla karşı karşıyadır. Yoğun yetiştiricilik uygulamaları sonucu ortaya çıkan aşırı besin yükleri, sucul ortamlarda birikerek ötrofikasyona neden olmakta ve ekosistem dengesini bozabilmektedir (Herbeck vd., 2013). Küresel iklim değişikliğine bağlı olarak artan sıcaklıklar, yükselen metan ve CO₂ seviyeleri de sektör için önemli tehditler oluşturmaktadır (FAO, 2018). Bu süreç; daha sık ve şiddetli kuraklıklar, akış rejimlerinde düzensizlikler ve hidrolojik bağlantıların bozulması gibi sonuçlara yol açmaktadır. Ayrıca su kirliliği ve toksisite düzeylerinin tespiti hâlen zaman ve emek gerektiren karmaşık süreçlerdir (Altenburger vd., 2019; Köprücü ve Köprücü, 2023).

İklim değişikliği ve çevresel bozulma, su ürünleri yetiştiriciliğinde hastalık ve enfeksiyonların yaygınlığını da önemli ölçüde artırmıştır. Epizootik ülseratif sendrom, yüzgeç ve solungaç deformasyonları gibi enfeksiyöz hastalıklar birçok yetiştiricilik sisteminde yaygın olarak görülmekte; bu hastalıklar için kesin ve etkili tedavi yöntemlerinin sınırlı olması, yüksek mortalite oranlarına neden olabilmektedir. Bu bağlamda, bilim insanları söz konusu sorunlara çözüm üretebilmek amacıyla yenilikçi ve ileri teknolojik yaklaşımlara yönelmektedir. Bu yaklaşımlar arasında, nanoteknoloji ve özellikle kuantum noktaları (QDs), su ürünleri yetiştiriciliği açısından dikkat çekici bir potansiyel sunmaktadır (Kılınç ve Köprücü, 2022b; Doğan ve Köprücü, 2024; Batool vd., 2025).

Kuantum noktaları, genellikle 1–10 nm çapında olan ve yarı iletken özellik gösteren nanoparçacıklardır. Kuantum boyut etkisi, kuantum tünelleme olgusu ve yüksek yüzey-hacim oranı gibi özgün fizikokimyasal özelliklere sahiptirler. QD'lar, yarıçapı eksiton Bohr yarıçapına eşit veya daha küçük olan yarı iletken nanokristaller olarak tanımlanmaktadır. Ayarlanabilir emisyon dalga boyları, geniş uyarma spektrumları, dar emisyon bantları ve fotobleaching'e karşı yüksek dirençleri sayesinde, bu floresan nanomalzemesler biyolojik ve tıbbi uygulamalarda önemli avantajlar sunmakta-

dır (Chen vd., 2016). Yaygın QD türleri arasında grup II–VI (ZnS, CdSe, CdTe, CdS, ZnTe, ZnSe), grup I–III–VI₂ (CuInS₂, AgInS₂), grup III–V (InP, InAs) ve grup IV–VI (PbSe, PbS) bileşiklerine dayalı yapılar yer almaktadır (Xu vd., 2016).

QD'lar uzun yıllardır güneş pilleri, organik LED'ler ve ışık yayan di-yotlar gibi fotonik uygulamalarda kullanılmakta olup son yıllarda biyoloji ve biyotıp alanlarında da yenilikçi araçlar olarak öne çıkmıştır. Özellikle hücre belirteçleri ve biyolojik görüntüleme uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (Batool vd., 2025). Geleneksel organik floresan boyalarla karşılaştırıldığında, QD'ler çok daha yüksek fotostabiliteye sahiptir ve defalarca uyarılmalarına rağmen floresans özelliklerini koruyabilmektedir. Bu durum, hücre ve doku çalışmalarında uzun süreli ve güvenilir analizler yapılmasına olanak tanımaktadır (Yang vd., 2019a, b). Ayrıca canlı ve ayarlanabilir renk özellikleri, biyolojik sistemlerin çok bileşenli yapısının eş zamanlı olarak incelenmesini mümkün kılmaktadır (Batool vd., 2025).

QD'lerin biyokimya, genomik, proteomik, hücresel ve moleküler biyoloji, ilaç taraması ve biyomakromoleküler etkileşimler gibi çok sayıda alanda kullanımı giderek artmaktadır (Yang vd., 2019a, b). Bununla birlikte, QD'ların çevresel ve biyolojik sistemlerde oluşturabileceği potansiyel risklerin doğru biçimde değerlendirilmesi için maruziyet, toksisite ve etki mekanizmalarının ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Cd içeren (CdTe, CdSe) ve Cd içermeyen (grafen kuantum noktaları ve grafen oksit kuantum noktaları gibi) QD türlerinin toksisiteleri hem in vitro hem de in vivo çalışmalarla ortaya konmuştur. Günümüzde QD araştırmaları, malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanlarında hızla artan bir ilgi görmektedir. Özellikle karbon kuantum noktaları (CQDs), yüksek biyoyoumlulukları, geniş floresans spektrumları ve üstün fotostabiliteyi sayesinde son yıllarda öne çıkmış ve su ürünleri yetiştiriciliği gibi biyolojik sistemlerle doğrudan ilişkili alanlarda önemli bir potansiyel sunmuştur (Batool vd., 2025).

2. Biyolojik Sistemlerde Kuantum Noktaları

Biyolojik sistemlerde QD'ların genel biyoyoumluluk, taşınım ve dağıtım ile ilgili veriler Samia vd., (2006) tarafından yapılan çalışmada toplanmıştır. Buna göre;

a-Biyoyoumluluk: Kuantum noktaları genellikle apolar organik çözücülerde sentezlenmekte olup, bu nedenle ilk elde edilen örnekler sulu tamponlarda çözünür değildir. Biyolojik uygulamalarla uyumlu hâle getirebilmeleri için ilk aşamada, yüzeylerini kaplayan ligandların, hem suda çözünürlüğü sağlayacak hem de hedef biyomoleküllerle konjugasyona olanak tanıyacak materyallerle değiştirilmesi gerekmektedir. Son yıllarda, QD'ların suda çözünür hâle getirilmesi ve fonksiyonelleştirilmesi amacıyla çok çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar; bifonksiyonel tiol molekül-

leri, dendronlar, oligomerik fosfinler ve peptitler ile yapılan basit ligand değişimlerinden; polimer boncuklar, blok kopolimerler, silika kabuklar ve fosfolipit miselleri içinde enkapsülasyonu içeren daha karmaşık yöntemlere kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır.

Bu tekniklerin tamamı, amin veya karboksil uç gruplarına sahip QD'ların elde edilmesini sağlamakta ve bu yapılar standart biyokonjugasyon reaksiyonları aracılığıyla biyomoleküllerle çapraz bağlanabilmektedir. Bir diğer yaklaşım ise QD'lar ile proteinler veya adaptör moleküller arasındaki etkileşimlerden yararlanmaktadır. Fonksiyonelleştirme basamakları, biyofonksiyonelliğin eklenmesi veya değiştirilmesi amacıyla tekrarlanabilmektedir. Örneğin, streptavidin ile kaplanmış QD'lar, biyotinlenmiş proteinler ve antikorlar ile birlikte kullanılarak belirli hücre tipleri ve organeller hedeflenebilmektedir. Bu bağlamda, fonksiyonelleştirilmiş QD'ların düşük konsantrasyonlarda, canlı hücre ve küçük hayvan etiketleme deneylerinde, deney süresi boyunca (birkaç saatten birkaç güne kadar) belirgin bir olumsuz etki oluşturmada kullanılabildiği gösterilmiştir.

b-Taşınım ve Dağıtım: Kuantum noktaların hücreler ve dokular içine etkin bir şekilde iletilmesi, gelecekteki in vivo biyomedikal uygulamalar açısından temel bir sorun teşkil etmektedir. Bir terapötik ajan in vitro koşullarda ne kadar etkili olursa olsun, in vivo ortamda etki bölgesine ulaşamaması durumunda işlevsiz kalmaktadır. Ayrıca, etkin bir taşıma sistemi, dozun azaltılmasına, özgül olmayan yan etkilerin önlenmesine ve toksisite risklerinin düşürülmesine katkı sağlayabilmektedir. Hücre içi ilaç taşınımı için geliştirilen birçok teknoloji, QD'ların taşınmasında da uygulanabilmektedir. Bu yöntemler genel olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır: (1) hücresel içselleştirme mekanizmaları, (2) fiziksel veya mekanik yöntemler ve (3) biyomolekül destekli taşınım.

Hücresel içselleştirme mekanizmaları: Bazı hidrofobik moleküller hücre zarını basit difüzyon yoluyla geçebilse de, suda çözünür maddelerin büyük çoğunluğu hücre içine girişi kolaylaştıracak mekanizmalara ihtiyaç duymaktadır. Bu süreç genellikle, hücre zarının yüksek seçiciliğini aşmak için ATP kaynaklı enerji kullanan aktif taşınım mekanizmalarını gerektirir. Enerjiye bağımlı bu mekanizmalardan biri olan endositoz, hücre zarından doğrudan geçiş olmaksızın hücre içine girişe olanak tanımaktadır. Endositoz, plazma zarının içe doğru invajinasyonu ve zar füzyonu sonucu hücre içinde vezikül oluşumu ile gerçekleşir. Son çalışmalarda, belirli yüzey kaplamaları kullanılarak QD'ların endositoz mekanizmaları aracılığıyla canlı hücreler tarafından içselleştirilebildiği gösterilmiştir. Her ne kadar bu QD'lar hücre içerisinde endositotik veziküllerle sınırlı kalsa da, bu yöntemler QD'ların terapötik amaçlı kullanımına yönelik önemli bir ilerleme sunmaktadır.

Fiziksel veya mekanik yöntemler: Hücre zarının mekanik kuvvetler yardımıyla geçirgen hâle getirilmesine dayanan ilaç taşıma yöntemleri, QD tabanlı terapötik ajanların taşınmasında da kullanılabilir. Örneğin, DNA kaplı mikropartiküllerin hücre zarına penetrasyonunu sağlayan partikül bombardımanı yöntemi, QD taşınımına uyarlanabilir. Benzer şekilde, elektrik alanları kullanılarak zar geçirgenliğini geçici olarak artıran elektroporasyon tekniği de QD'lar için uygulanabilir. Ayrıca, mikroenjeksiyon yönteminin fonksiyonelleştirilmiş QD'ların mitokondriye veya hücre çekirdeğine iletilmesinde etkili olabileceği gösterilmiştir. Ancak bu yöntem, nispeten yavaş ve zahmetli olması nedeniyle in vivo uygulamalar açısından pratik değildir.

Biyomolekül destekli taşınım: Hücrenin kendi taşınım mekanizmalarına ilişkin çalışmalar, terapötik ajanların hücre içine taşınmasında bu doğal yolların kullanılabileceği yeni yaklaşımların geliştirilmesini sağlamıştır. Henüz QD taşınımında yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, bu yöntemler gelecekte önemli bir potansiyel sunmaktadır. Örneğin, hücre içine girebilen kısa peptit dizileri olarak tanımlanan hücre penetran peptitler ya da protein transdüksiyon domainleri (PTD'ler), QD'ların hücre içi alımını kolaylaştırmak amacıyla kullanılabilir. PTD aracılı taşınımın boyuttan bağımsız olduğu, 700 kDa'dan büyük proteinlerin yanı sıra 200 nm'den daha büyük liposomların bile hücre içine alınabildiği gösterilmiştir. Ayrıca, PTD'lerin hem in vitro hem de in vivo koşullarda terapötik ajanların taşınmasında başarıyla kullanıldığı ve intraperitoneal enjeksiyon yoluyla canlı hayvan modellerinde fonksiyonel protein taşınabildiği rapor edilmiştir. Bu yöntemin en önemli avantajı, yalnızca PTD'ye kovalent olarak bağlanan türlerin hücre içine girebilmesini sağlayan yüksek özgüllüğüdür; bu özellik, özellikle in vivo uygulamalar açısından kritik öneme sahiptir.

3. Su Ürünleri Yetiştiriciliğinde Kuantum Noktalarının Önemi

Artan küresel nüfus, sürdürülebilir protein kaynaklarına olan talebi artırmaktadır. Kolay sindirilebilirliği ve yüksek besin değeri nedeniyle balık, küresel hayvansal protein tüketiminin yaklaşık %17'sini karşılayan temel bir besin kaynağıdır (FAO, 2022). Ancak, doğal tatlı su ve deniz kaynaklarının sınırlı olması, artan talebin yalnızca avcılıkla karşılanmasını mümkün kılmamaktadır. Bu nedenle, kontrollü koşullar altında yürütülen akuakültür sistemleri, küresel balık arzının sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Akuakültürde yüksek verim; dengeli besleme, patojen kontrolü, su kalitesinin sürekli izlenmesi ve uygun yönetim stratejilerine bağlıdır. Bu kapsamda nanoteknoloji, akuakültür yönetimi ve üretim verimliliğinin artırılmasında yenilikçi çözümler sunmaktadır. Özellikle kuantum noktaları, ayarlanabilir optik ve lüminesans özellikleri sayesinde akuakültürde çok

yönlü uygulama potansiyeline sahiptir. Kuantum noktaları; su kalitesi ve gölet yönetimi, balık sağlığının izlenmesi, yem geliştirme ve hedefli madde taşınımı gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu nanomalzemeler, akuakültür üretim verimliliği ve ürün kalitesinin artırılmasında stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir (Batool vd., 2025).

Ağır metal kirliliği, akuakültür sistemleri için önemli bir çevresel tehdit oluşturmaktadır. Kurşun, cıva, krom, kadmiyum ve arsenik gibi ağır metaller, sucul organizmalar üzerinde ciddi toksik etkilere sahiptir Kuantum noktalarının ağır metal iyonları varlığında gösterdiği floresans sönümleme veya artış mekanizmaları, bu iyonların hassas ve seçici biçimde tespiti edilmesine olanak tanımaktadır (Ahamed ve Kumar, 2019; Batool vd., 2025).

4. Akuakültürde Kuantum Nokta Uygulamaları

Kuantum noktaları akuakültürde hastalık kontrolü, yem iyileştirme, büyüme performansı ve su kalitesi yönetimi gibi birçok alanda kullanılabilmektedir. Özellikle hastalık kontrolünde viral proteinlerin nanopartiküller içinde enkapsülasyonu (Priya ve Raja 2024), su kalitesi yönetiminde sıcaklık, pH ve oksijen düzeylerinin nanosensörlerle gerçek zamanlı izlenmesi gibi uygulamalar öne çıkmaktadır Batool vd., 2025). Ayrıca QD'lar balık ilacı, paketleme, cinsiyet dönüşümü ve besinsel etki gibi süreçlerde de kullanılmaktadır. Sağladıkları yararları rağmen akuakültür atıkları hâlâ önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu eksikliği gidermek amacıyla QD'ler, balık kalitesini artırarak ve çevresel etkiyi azaltarak sürdürülebilir akuakültür uygulamalarında katkı sağlayabilir (Aklakur vd., 2016).

5. Balık Fraksiyonunun Tespiti

QD'lerin en önemli özellikleri floresan karakteristikleri, fotostabilite, yüksek parlaklıkları ve ayarlanabilir emisyon spektrumlarıdır. Bu avantajlarına karşın, bu sıfır boyutlu materyallerle temasın sağlık açısından bazı endişeler oluşturduğu unutulmamalıdır (Libralato vd., 2017). Metal bazlı QD'lere kıyasla daha az toksik olmaları, bol ham madde kaynağına sahip olmaları, düşük maliyetli olmaları ve daha iyi biyouyumluluk göstermeleri nedeniyle karbon kuantum noktaları fotoelektrik dönüşüm, fotokataliz, algılama ve görüntüleme alanlarında yoğun bir şekilde araştırılmaktadır (Xu vd., 2004).

6. Havuz Yönetimi

Akuakültürdeki üretim kayıplarının yaklaşık %50'si bakteriler, virüsler, protistler, kabuklular ve mantarlar dâhil çeşitli patojenlere bağlanabilmektedir. Nehirler ve kıyı suları akuakültür için su kaynağı olarak kullanıldığından, balık patojenleri bu ortamlarda sıkça bulunduğu için kontaminasyonu ve yayılımı önlemek amacıyla bu suların önceden dezenfekte edilmesi önem taşımaktadır. Fiziksel ve biyolojik adsorpsiyon yöntemleri

bazı kirleticilerin arıtılmasında kullanılabilse de antibiyotikleri ve belirli organik bileşikler parçalamada yetersiz kalmaktadır (Bui vd., 2020). Fotokataliz, antibiyotikleri CO₂ ve H₂O gibi daha küçük moleküllere ayrıştırma kapasitesi nedeniyle antibiyotik iyileştirme uygulamalarında büyük ilgi görmektedir (Juine vd., 2023). Havuz yönetiminde, karides yetiştiriciliğinde kullanılan resirkülasyonlu akuakültür sistemi (RAS) benzeri bir yapıda üretilen tetrasiklin (TC) ve diğer organik bileşiklerin arıtımında GQD kaplı grafitik karbon nitrür (g-C₃N₄) tabanlı fotokatalitik sistemler kullanılmaktadır (Thao vd., 2024). QD'ler havuz dezenfeksiyonunda ve kirlilik tespitinde önemli bir rol oynamaktadır (Batool vd., 2025). Akuakültür dezenfeksiyonundaki ilerlemelere rağmen su kaynaklı enfeksiyonlar devam etmektedir. Antibakteriyel, fotokatalitik ve adsorban ajan olarak kullanımlarının yanı sıra, çinko, gümüş ve titanyum gibi iyi bilinen nanopartiküller su kaynaklı patojenleri yok etme kapasiteleri açısından kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Mohamed vd., 2024). Nanomalzeme aracılı fiziko-kimyasal süreçler sayesinde, biyofouling ile ilişkili patojenler ve diğer kirleticiler karbon bazlı nanomalzemeler veya metal/metal oksit nanopartiküller ile fotokatalizörlerin birlikte kullanılması yoluyla giderilebilmektedir (Sadegh vd., 2017).

7. Balık Üreme

Dünya üzerindeki tüm canlılarda olduğu gibi, balıkların da yaşamlarını sürdürebilmesi üremeye bağlıdır. Balıklarda erkek ve dişi gonatlar yumurta ve spermi üretir; bunların döllenmesiyle yavrular meydana gelir ve üremenin temelini oluşturur. Monokoriye ek olarak balıklarda hermafroditlik ve tek ebeveynli üreme gibi üreme modelleri de görülmektedir (Shen vd., 2018). Çoğu balık türü, belirli üreme dönemlerinde çevredeki çevresel koşulların etkisiyle sucul ortamlarda doğal olarak ürer (Bhat, 2023).

Modern nanoteknoloji, balıklara ilaçların, genlerin, aşılardan ve hormonların hedefe yönelik taşınmasını mümkün kılarak gonad gelişimini artırmakta, indüklenmiş üremeyi kolaylaştırmakta ve üreme verimini yükseltmektedir (Wu vd., 2020). Örneğin, somon luteinize edici hormon salgılatıcı hormonunun (sLHRH) chitosan ile tek başına veya 114 ve 192 nm boyutlarında altın nanoparçacıklarıyla birlikte kullanılmasıyla, sazan (*Cyprinus carpio*) dişilerine uygulandığında üreme hormonlarının kontrollü salınımları sağlanmış ve balıkların üreme kapasitesi artmıştır (Rather vd., 2013).

Yüksek basınçlı homojenizasyon yoluyla, 157 nm chitosan nanoparçacıkları feromonlar olan 17 α 20 β dihidroksi-4-pregnen-3-on (17a 20b P) ve prostaglandin F 2 α ile birleştirilmiş ve ardından yayın balığına (*Clarias batrachus*) uygulanmıştır (Sharma vd., 2014; Bhat 2023). Feromonların tek başına enjeksiyonuna kıyasla, chitosan konjugat grubunda FSH (folikül uyarıcı hormon) ve LH (luteinize edici hormon) serum seviyeleri daha

uzun süre yüksek kalmış ve böylece üreme performansı artmıştır (Kookaram vd., 2021).

Sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliği, sağlıklı sucul proteinler ve lipidler sağlayarak beslenmeyi ve gıda güvenliğini destekleyebilir. Bununla birlikte, kirlilik, su kıtlığı ve iklim değişikliği gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Nanoteknoloji; balık sağlığı yönetimi, genetik, üreme, akuakültür biyoteknolojisi ve çevresel kalite gibi alanlarda yeni uygulamalar sunmaktadır. Gen ve ilaç taşıma sistemleri, DNA nanovaksinleri, nanomalzemeler, deniz ürünlerinin korunması, nanosensörler ve nanotaglama gibi nanoteknolojik araçlar; hayvan sağlığı, üreme, üretim, hastalık önleme ve tedavi alanlarındaki sorunların çözümüne katkı sağlamaktadır (Foo vd., 2024). Artan dünya nüfusu bu problemi daha da derinleştirmektedir. 2030 yılı hedefi, üretim ve tedarik zinciri boyunca gıda kayıplarını azaltmak ve perakende ile tüketim aşamalarında kişi başına düşen küresel gıda israfını yarıya indirmektir (FAO 2022).

8. Balık Yemi Geliştirme, Taşınması ve Korunması

Günümüzde küresel nüfusun neredeyse üçte biri yetersiz beslenme ile karşı karşıya olmasına rağmen çok büyük miktarda gıda israf edilmektedir. Meyve ve sebzelerin %47'si kaybolmakta veya israf edilmekte, ayrıca tüketim aşamasında et ve hayvansal ürünlerin %12'si kaybedilmektedir (Halonen vd., 2020). Artan dünya nüfusu bu sorunu daha da büyötmektedir. 2030 eylem planı, üretimden hasat sonrası işleme aşamasına kadar tüm tedarik zincirinde gıda kayıplarının azaltılmasını ve perakende-tüketici düzeyinde kişi başına düşen gıda israfının azaltılmasını hedeflemektedir (FAO, 2022).

Kuantum noktaları (QDs), akuakültürde daha verimli üretim ve yem teslimi amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde gıda güvenliği, doğrudan halk sağlığı ile ilişkili en büyük sorunlardan biridir. Pestisitler, veteriner ilaçları, ağır metaller, bakteriler ve tehlikeli katkı maddeleri gibi çok sayıda kirletici, modern endüstri ve tarımın gelişmesiyle gıda güvenliği açısından tehdit oluşturmaktadır (Tan vd., 2023). Bu nedenle, gıda ürünleri tüketicilere ulaşmadan önce kirleticilerin tespiti için etkili analitik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hedef doğrultusunda, üretimden dağıtım ve tüketime kadar gıda tedarik zincirinin tüm aşamalarında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Grafen metal-organik iskeletler (MOF'lar), karbon nanotüpler (CN'ler) ve manyetik nanoparçacıklar (MNP'ler) gibi ileri fonksiyonel nanomalzemeler, gıda analizinde yeni bir paradigma sunmaktadır (Yu vd., 2021). Bu nanoparçacıklar, matris malzemelerin fizikokimyasal özelliklerini iyileştirebilmekte veya yeni özellikler kazandırabilmekte; bu durum gaz ayırımı, enerji, çevre, filtrasyon ve biyomedikal gibi pek çok alanda kullanım potansiyelinin araştırılmasını teşvik etmektedir

(Vatanpour vd., 2023).

Esnek yapıları ve özellikleri nedeniyle QD'lar, gıda sektöründe çeşitli uygulamalar için büyük bir potansiyel göstermektedir. Birincisi, elektrokimyasal ve floresan temeline dayalı duyarlı algılama avantajları sayesinde QD'lar gelişmiş nanosensör malzemeleri olarak kullanılmaktadır. İkincisi, önceki araştırmalar QD'ların ışıkla aktive edildiğinde reaktif oksijen türleri (ROS) üretebilmesi nedeniyle antibiyotik fotodinamik tedavi için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Nguyen vd., 2022).

Genel olarak, QD'ların ambalaj materyallerine eklenmesi, ambalajın antibakteriyel ve antioksidan özelliklerini artırmakta ve gıda koruma sürecine değer katmaktadır. Gıdaların raf ömrünü uzatmak amacıyla çok sayıda QD ile zenginleştirilmiş aktif ambalaj filmi geliştirilmiştir. Buna ek olarak, QD'ların yüzey ve kenarlarında bulunan karboksil, karbonil, hidroksil ve epoksi gibi çok sayıda fonksiyonel grup, bağlanma ve yükleme kapasitelerini artırmaktadır. Hidrofobik etkileşimler sayesinde QD'lar nano-taşıyıcı olarak kullanıldığında biyolojik olarak aktif bileşiklerin kapsüllenmesi ve taşınmasına imkân tanır. Sonuç olarak QD'lar; gıda muhafazası, ambalajlama ve gıda kirleticilerinin tespiti ile izlenmesinde kullanılmakta olup gıda kalitesi ve güvenliğinin kontrolünde önemli uygulamalara sahiptir (Ghanbari vd., 2021).

9. Nanoparçacık Geliştirilmesinde Biyokaynak Olarak Balık Kullanımı

Balık atıkları, nanoparçacık geliştirilmesinde biyokaynak olarak kullanılmaktadır. Tilapia (*Oreochromis mossambicus*) balığının özellikle bağırsak ve solungaçlarından elde edilen atıklar kullanılarak gümüş (Ag) nanoparçacıkları üretilmektedir (Das vd., 2024). Bu nanoparçacıklar, insanların refahı için akuakültür ve diğer biyolojik bilimlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Krishnani vd., 2022). Düşük maliyetli balık pulu atıkları, tek aşamalı basit bir hidrotermal karbonizasyon süreciyle hidrofilik, yeşil floresan özellik gösteren ve suda çözünür karbon kuantum noktalarına (CQD'lar) dönüştürülebilmektedir. Üretilen CQD'ların optik, fiziksel ve kimyasal özellikleri UV-Vis ve fotoluminesans (PL) spektrumlarıyla analiz edilmektedir. PL, 330 nm uyarımda 406 nm'de yüksek yeşil emisyon göstermekte; UV-Vis spektrumları ise sırasıyla $\pi \rightarrow \pi^*$ ve $n \rightarrow \pi^*$ geçişlerine karşılık gelen 266 ve 371 nm'de iki ana pik sergilemektedir. Sentezlenen CQD'lar küresel bir şekle sahip olup yaklaşık 6 ± 1 nm boyutundadır. Sentezlenen CQD'ların uygulamaları arasında su ve enerji arıtımı bulunmaktadır (Dhandapani vd., 2020).

10. Balık Sağlığı Yönetimi

Balık, ucuz, yüksek proteinli, sağlıklı ve günlük beslenmede önem-

li bir gıda maddesidir (Abarike, 2011). Olağanüstü floresan özellikleri ve kolay sentezlenebilir olmaları nedeniyle kuantum noktalar, akuakültürde floresan teknolojileri alanında büyük ilgi görmüştür (Gidwani vd., 2021). QD'lar, balık sağlığı yönetiminde çeşitli faydalar sağlamaktadır. Örneğin, yüzeyinde pozitif yüklere sahip bir karbon nanomalzeme olan spermidin karbon kuantum noktaları (CQDSpd), negatif yüklü bakteri hücre zarına bağlanarak bakterileri ilaç direnci oluşturmadan öldürebilmektedir (Chou vd., 2021). Akuakültür uygulamalarındaki yüksek performansı, düşük toksisitesi ve güçlü antibakteriyel özellikleri nedeniyle CQDSpd'ların yem katkı maddesi olarak kullanılması mümkündür. Besleme aşamasında, sirkülasyonlu akuakültür sistemlerinde (RAS) çeşitli enfeksiyonlarla mücadele etmek için yılan balığı yetiştiricileri sıklıkla antibiyotik kullanmaktadır. Ancak aşırı antibiyotik kullanımı; balık bağışıklığının azalması, antibiyotik direnci, su kirliliği ve gıda güvenliği sorunları gibi olumsuz etkilere yol açmaktadır (Chen vd., 2020).

Yılan balığı üretkenliğini artırmak için üç temel strateji kullanılmaktadır:

1. Su ekosisteminin yönetiminin optimize edilmesi,
2. Sorunların erken aşamada önlenmesi,
3. Balık bağışıklığının güçlendirilmesi.

Bununla birlikte, CQD'ların japon ve bazı yılan balıkları üzerindeki etkileri konusunda bilgi eksikliği bulunmaktadır. Bu çalışma, CQD'ların bu türlerde büyüme, bağırsak morfolojisi, bağışıklık ve *Edwardsiella tarda*'ya karşı direnç üzerindeki etkilerini araştırarak bu boşluğu doldurmuştur. Ayrıca araştırmacılar, CQD'ların her iki tür için de sirkülasyonlu akuakültür sistemlerinde (RAS) potansiyel bir diyet antibiyotik ikamesi olarak kullanımını incelemiş ve sürdürülebilir yılan balığı yetiştiriciliği için umut verici bir çözüm ortaya koymuştur (Lin vd., 2023).

11. Kirlilik Yönetimi

Endüstriyel atık sular, atık gazlar ve atık kalıntılar ağır metal kirliliğinin başlıca kaynaklarıdır; bu kirleticiler sucul yaşam üzerinde olumsuz etkiler oluşturmakta ve insanlar için ciddi sağlık riskleri taşımaktadır. Bu nedenle çevresel kirliliği azaltmak için kapsamlı ve etkili metal tespit yöntemlerine ihtiyaç vardır. QD floresansının şiddeti, ağır metal iyonlarının QD'lar üzerindeki artırıcı veya söndürücü etkisine bağlıdır (Biranje vd., 2021). Bu nedenle QD'lar kullanılarak ağır metal iyonları tespit edilebilir. Örneğin, tiyoglikolat modifiye CdTe QD'lar Hg^{2+} tespiti için kullanılmaktadır. Suda güvenli mikrobiyal inaktivasyon özellikleri nedeniyle gümüş kuantum noktaları, su dezenfeksiyonunda en yaygın kullanılan maddelerden biridir. Tüm antibakteriyel tedaviler arasında, nanokristalin gümüş kuantum nok-

taları (SQD'lar) mikroorganizmalara karşı en güçlü antimikrobiyal aktiviteyi ve en geniş biyosidal etki spektrumunu göstermiştir. Ayrıca, AgNP'ler kolay ve düşük maliyetle üretilebilir olmasının yanı sıra çok sayıda çalışmada etkili biyositler olarak tanımlanmış olup mikroorganizmaların bunlara karşı direnç geliştirme olasılığı oldukça düşüktür (Batool vd., 2025).

12. Balıklarda Kuantum Noktalarının İşlevi ve Besinsel Nitelikleri

Çeşitli QD türleri, onların ayırt edici özellikleri ve balık beslenmesi ile balık sağlığını artırmadaki potansiyel uygulamaları Batool vd., (2025) tarafından yapılan araştırmalar sonucu, biraraya getirilerek sıralanmıştır. Buna göre;

1-Çinko QDs: Düşük çinko düzeyleri, balıkların genel fizyolojik işlevini ve yapısal bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, çinko eksikliğinin giderilmesine yönelik en etkili stratejilerden biri, çinko temelli nanomateriyallerin kullanılmasıdır. Balık yemlerine çinko sülfat veya çinko oksit kuantum noktaları (QDs) gibi çinko noktalarının ilavesinin yararlı olduğu gösterilmiştir. Diyete çinko oksit nanopartiküllerinin eklenmesiyle hemogloblin düzeylerinde artış gözlenmiş; ancak beyaz kan hücresi (WBC) sayısında herhangi bir değişiklik saptanmamıştır (Than-gapandiyen ve Monika, 2020). Öte yandan, farklı düzeylerde çinko oksit nanopartikülleri ile muamele edilmiş tilapia yemlerinin protein içeriğinde artış olduğu bildirilmiştir (Tawfik vd., 2017). Ayrıca, çinko oksit kuantum noktaları içeren takviye yemlerle beslenen Afrika yayın balığı (*Clarias gariepinus*) yavrularında yemden yararlanma ve yem dönüşüm oranlarının arttığı belirlenmiştir (Onuegbu vd., 2018).

2- Krom QDs: Krom kuantum noktalarının (Cr-QDs) takviye yemlere ilave edilmesi, bağışıklık sisteminin güçlenmesine, insülin ve kortizol düzeylerinin azalmasına ve büyüme performansının artmasına katkı sağlamıştır. Özellikle, *Cirrhinus mrigala* türünde krom nanopartiküllerinin büyüme faktörünü artırdığı rapor edilmiştir. Ayçiçeği tohumu bazlı diyetlere, canlı ağırlık başına 1,5–2 mg/kg dozunda krom kuantum noktalarının eklenmesi durumunda, büyüme performansında belirgin bir iyileşme gözlenmiştir. Ayrıca, yem içerisindeki krom kuantum noktası içeriğinin artırılması, kan plazmasındaki immünoglobulin düzeylerinde artışa neden olmuştur (Ahmad vd., 2019).

3- Demir QDs: Demir (Fe) kuantum noktaları (QDs), yüksek yüzey alanları ve küçük boyutları nedeniyle genellikle balık ve kabuklu yemlerine ilave edilmektedir. Bu nanoyapılar, balıklarda protein düzeylerinin artmasını teşvik etmekte ve bakterilere karşı güçlü bağışıklık yanıtları ortaya koymaktadır. *Oreochromis niloticus* üzerinde yapılan çalışmalarda, demir oksit veya demir nanopartikülleri gibi demir kuantum noktalarının 63,75 mg/kg dozunda yeme eklenmesinin önemli derecede olumlu etkiler oluşturdu-

ğu belirlenmiştir (El-Shenawy vd., 2019). Elde edilen bu faydalar arasında sağlık durumunun, büyümenin ve bağışıklık fonksiyonlarının iyileşmesi; besinsel profilin gelişmesi; antioksidan kapasitenin artması ve hastalıklara karşı direncin güçlenmesi yer almaktadır. Ayrıca, demir nanopartiküllerinin balıkların büyümesi, yemden yararlanma kapasiteleri ve metabolik faaliyetleri üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir.

4- Gümüş QDs: Gümüş kuantum noktaları (Ag QDs), antibakteriyel özelliklere sahip olup çeşitli bakteri, virüs, mantar ve patojenlere tutunarak suyun etkin bir şekilde arıtılmasında kullanılabilir (Le vd., 2012). Bu etkiyi, bakteriyel hücre zarına bağlanarak zar geçirgenliğini artırmaları yoluyla göstermektedirler. Bu süreç sonucunda DNA ve hücre zarında hasar meydana gelmekte, mikroorganizmalar apoptoza zorlanarak ölmektedir.

Ag kuantum noktaları, güçlü antibakteriyel etkileri sayesinde atık suların arıtılmasında potansiyel bir uygulama alanı sunmaktadır. Ag QDs'nın etki mekanizmasının temelinde, hücrelerde oksidatif stres oluşturması yer almaktadır (Seo vd., 2014).

5- Titanyum dioksit QDs: TiO_2 çeşitli virüsleri etkin bir şekilde nötralize edebilme kapasiteleri sayesinde balıkçılar ve diğer kullanıcılar için faydalı bir araç olarak öne çıkmaktadır. TiO_2 nanopartiküllerinin, farklı virüs türlerini etkili biçimde ortadan kaldırarak atık suların arıtılmasına katkı sağladığı bildirilmektedir. Antiviral özellikleri nedeniyle TiO_2 kuantum noktaları, su kaynaklarındaki viral kirleticilerin giderilmesinde son derece değerli bir uygulama potansiyeline sahiptir. Atık suların TiO_2 nanopartikülleri kullanılarak arıtılması, daha güvenli ve daha kaliteli bir çevrenin sağlanmasını garanti altına almakta; temiz suya bağımlı olan balıkçılar ve diğer bireyler için önemli faydalar sunmaktadır (Batool vd., 2025).

6- Demir oksit ve çinko oksit QDs: Demir oksit kuantum noktaları (iron oxide QDs), geniş bant aralığı ve oksidatif fotokatalitik özellikleri sayesinde atık suların etkin bir şekilde arıtılmasına olanak tanıyan özgün niteliklere sahiptir. Rana vd., (2018) tarafından yürütülen çalışmalar, bu özellikleri açıkça ortaya koymuştur. UV ışığına maruz kalmaları durumunda, demir oksit nanopartiküllerinin oksidatif fotokatalitik kapasiteleri sayesinde atık sularda bulunan organik kirleticileri parçalayabildikleri belirlenmiştir. Ayrıca bu partiküllerin, su ortamındaki azotlu atıkların azaltılmasına katkı sağladığı rapor edilmiştir (Zheng vd., 2011).

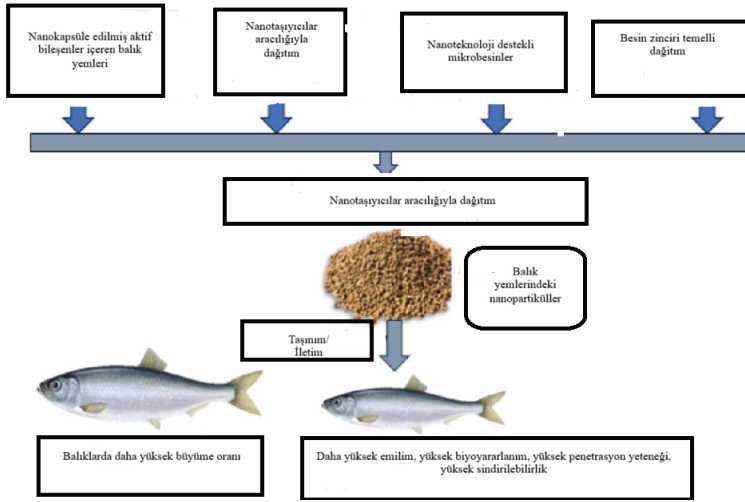
13. Balıkçılıkta Kuantum Noktalarının Uygulamaları

Nanoteknoloji, metre ölçeğinin milyarda biri büyüklüğündeki nanoskopik maddelerin mühendisliği ve manipülasyonuna odaklanan hızla gelişen bir alandır. Bu teknolojinin geniş uygulama alanları akuakültür veya

balık-kabuklu yetiştiriciliği gibi birçok sektörü dönüştürebilecek potansiyelindedir. Kuantum noktaları (QD'lar), ekonomik büyümeyi desteklemek ve balıkçılık sektöründeki bireyler için daha iyi fırsatlar sunmak amacıyla akuakültürde kullanılmaktadır (Batool vd., 2025).

14. QDs Kullanılarak Akuakültürde Beslenme

Ticari akuakültürde yem formülasyonu ve besinsel takviyelerin sağlanması, balık beslenmesi ve büyümesinin temel bileşenleridir (Şekil 1).



Şekil 1 Balık büyümesinin iyileştirilmesinde çeşitli kuantum noktalarının kullanımı (Batool vd., 2025).

Nanoparçacıkların yeme eklenmesi, tat, renk veya çekici özellikler kazandırarak tüketim davranışını değiştirebilmektedir. Nanoparçacık tabanlı işlemler sayesinde, suda çözünmeyen bazı vitaminler ve karotenoidler, besinsel katkılar olarak yeme eklenip biyoyararlanımı artırılmış biçimde balıklara sunulabilir (Singha vd., 2017).

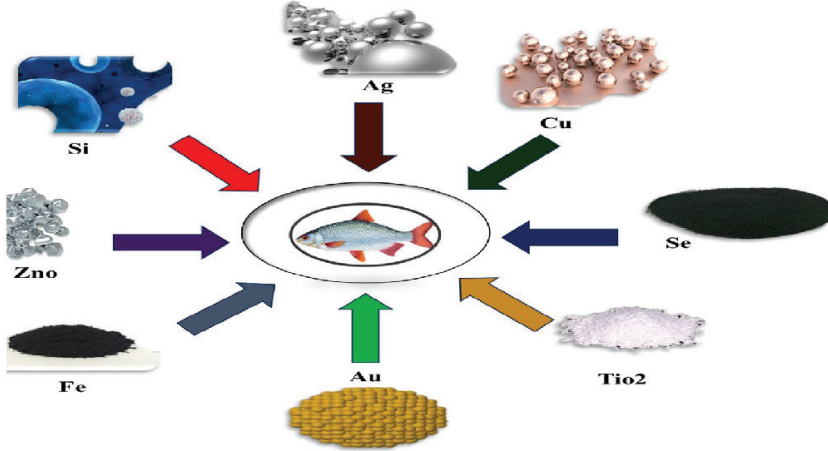
Günümüzde, akuakültür için nutrasötiklerin taşınmasını ve biyoyararlanımını artıran ileri mikro- ve nanoenkapsülasyon yöntemlerine dayalı çeşitli ticari ürün mevcuttur. Örneğin, Zymes LLC (ABD) Unisol-Aqua™ Taşıyıcı Sistem Teknolojisini; AQUANOVA (Almanya) ise NovaSOL sistemini geliştirmiştir. UbisolAqua™, koenzim Q10, A ve B vitaminleri, skualen ve balık yağı (EPA/DHA) dahil çok çeşitli biyolojik olarak aktif bileşenleri başarıyla çözündürmüştür. AQUANOVA, kapsül içindeki aktif hammadde­lerin taşınmasını sağlayan “çözündürme” olarak da adlandırılan sıvı taşıyıcı çözümleri sunmaktadır (Aklakur vd., 2016). Bu nano ve mikro taşıyıcılar, balık büyümesi için gerekli pahalı biyolojik bileşenleri taşır, stabilize eder ve korur.

15. Kuantum Noktalarının Balık Gelişimi Üzerindeki Etkileri

Mikroskobik ölçekte bazı nanoparçacıklar, balık yemine eklendiklerinde büyüme artırıcı veya immünomodülatör olarak işlev görebilir. Örneğin, havuz balığı (*Carassius auratus*) üzerinde yapılan çalışmalarda, bazal diyete selenyum nanoparçacıkları eklendiğinde kilo artışı, kas dokusunda biyobirikim ve antioksidan profilinde iyileşme gözlenmiştir (Wang vd., 2017). Ayrıca, metalik selenyuma kıyasla nanoselenyumun enzim düzenleyici etkisinin daha güçlü ve toksisitesinin daha düşük olduğu bildirilmiştir. Gümüş nanoparçacıklar zebra balığında genel büyümeyi ve proteaz ile metalloproteaz aktivitesini artırdığı da gözlenmiştir (Sarkar vd., 2015). Benzer şekilde, çim sazanı (*Cyprinus idella*) ve adi sazanın (*C. carpio*) yemine çinko oksit ve selenyum NPları eklendiğinde büyüme eğilimlerinin olumlu yönde seyrettiği rapor edilmiştir (Faiz vd., 2015). Magnezyum oksit nanoparçacıkları da balık gelişimini teşvik etmede önemli görülmektedir (Batool vd., 2025).

16. Akuakültürde QDs Toksisitesi

Biyomedikal, elektronik ve enerji alanlarında kapsamlı kullanım alanı bulan QD'lar, yeni nesil nanomalzemeler arasında yer almaktadır (Gidwani vd., 2021). QD'ların benzersiz fizikokimyasal özellikleri nedeniyle canlılar üzerindeki olumsuz etkileri uluslararası düzeyde dikkat çekmiştir; ancak uzun vadeli ekolojik sonuçlarına ilişkin araştırmalar sınırlıdır. QD'ların ekotoksikolojisine yönelik çalışmalar, sucul organizmalar üzerindeki toksisiteyi sistematik biçimde özetlemede hâlâ yetersizdir (Şekil 2).



Şekil 2. Su Ürünleri Yetiştiriciliğinde Farklı Kuantum Nokta Türleri (Batool vd., 2025).

Toksikolojik araştırmalar, QD'ların organizmaya girdikten sonra vücudun farklı bölgelerine taşınabildiğini ve daha sonra boşaltım sistemiyle uzaklaştırılabildiğini göstermektedir. Ancak bir kısmının vücutta kalması;

metabolik bozukluklara, enzim fonksiyonlarının azalmasına, gen ekspresyonunun düzensizleşmesine, DNA iplikçik kırılmalarına, apoptoza ve hatta hayatta kalma ile üreme üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Trofik düzeyler arasında QD geçişi, sucul ekosistem üretkenliğini azaltmakta ve biyokimyasal döngüler üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu durum, QD'ların bireysel türleri etkileyerek popülasyon, topluluk ve ekosistem düzeyinde risk oluşturabileceğini göstermektedir (Zhang vd., 2024). QD toksisitesi; büyüklük, bileşim, doz, uygulama yöntemi ve kaplama malzemesi gibi faktörlere bağlıdır. Düzenlemeler hâlâ geliştirilmekte olsa da, QD'lar genel olarak güvenli kabul edilmektedir. 2011 yılında ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA), QD teknolojisiyle ilgili ilk klinik insan deneyine onay vermiştir. Teknolojideki ilerlemeler, çoğu sitotoksik ve kemoterapötik madde için QD formülasyonlarının geliştirilmesini mümkün kılarak farmakolojik etkinliği artırmıştır (Gidwani vd., 2021).

Toksik kuantum noktalarına subletal düzeylerde maruz kalındığında, canlılarda hücresel ve biyokimyasal düzeylerde değişimlerin meydana geldiği bildirilmektedir (Şekil 2). QD'ların organizma içerisine girdikten sonra hedef bölgeler veya reseptörlerle etkileşimi sonucu artan oksidatif stres, proteomik ya da proteomik olmayan yanıtların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Vale vd., 2016). Bu yanıtlar kapsamında, reaktif oksijen türlerine karşı organizmayı korumak amacıyla antioksidan savunma sistemi devreye girmekte; glutasyon peroksidaz, süperoksit dismutaz, katalaz gibi antioksidan enzimler ile glutasyon-S-transferazlar gibi genel detoksifikasyon enzimleri ve metalloproteinler gibi stres proteinleri rol oynamaktadır.

Kuantum noktaları, hücresel homeostazı bozarak reaktif oksijen türlerinin üretimini artırabilmekte; savunma mekanizmalarının zayıflamasına, enzimlerin inaktivasyonuna, protein oksidasyonuna, DNA hasarına ve lipidler gibi diğer biyomoleküllerin zarar görmesine yol açabilmektedir. QD'ların sucul organizmalarda oksidanlar ile antioksidanlar arasındaki hassas dengeyi bozma potansiyeli, artmış ROS düzeyleri ve oksidatif stres oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Bu etkiler, özellikle antioksidan sistemle ilişkili transkripsiyon genlerini kapsayan oksidatif stres biyobelirteçleri aracılığıyla etkin bir şekilde izlenebilmektedir (Libralato vd., 2017).

Kaynaklar

- Abarike ED (2011) Growth performance of fry and fingerlings of *Oreochromis niloticus* fed on different agro-industrial by-products. Dissertation, University of Cape Coast, Cape Coast, Ghana
- Ahamed MI, Kumar KS (2019) Studies on Cu₂SnS₃ quantum dots for O-band wavelength detection. *MatSci Poland* 37:225–229
- Ahmad N, Hussain SM, Ali Q, Jabeen F, Asrar M, Shahzad MM, Arsalan MZUH (2019) Effects of chromium nanoparticles supplementation on body composition of *Cirrhinus mrigala* fingerlings fed sunflower meal based diet. *Int J Biol Macromol* 14:186–193. <https://doi.org/10.12692/ijb/14.1.186-193>
- Aklakur M, Asharf Rather M, Kumar N (2016) Nanodelivery an emerging avenue for nutraceuticals and drug delivery. *Crit Rev Food Sci Nutr* 56(14):2352–2361. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.839543>
- Altenburger R, Brack W, Burgess RM, Busch W, Escher BI, Focks A, Krauss M (2019) Future water quality monitoring: improving the balance between exposure and toxicity assessments of real-world pollutant mixtures. *Environ Sci Eur* 31(1):1–17. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0193-1>
- Batool U., Hussain, SM., Ali S., Rasul A., Shahzad MM., Naeem A., Ahmad N., Munir M., Ghafoor A., Alshehri MA (2025). Nano-revolution in aquaculture: quantum dot innovations for sustainable fisheries. *Aquaculture International*, 33:187. <https://doi.org/10.1007/s10499-025-01867-3>
- Bhat IA (2023) Nanotechnology in reproduction, breeding and conservation of fish biodiversity: current status and future potential. *Rev Aquac* 15(2):557–567
- Biranje A, Azmi N, Tiwari A, Chaskar A (2021) Quantum dots based fluorescent probe for the selective detection of heavy metal ions. *J Fluoresc* 31(5):1241–1250
- Bui TS, Bansal P, Lee BK, Mahvelati-Shamsabadi T, Soltani T (2020) Facile fabrication of novel Ba-doped g-C₃N₄ photocatalyst with remarkably enhanced photocatalytic activity towards tetracycline elimination under visible-light irradiation. *Appl Surface Sci* 506:144184
- Chen B, Zou L, Wu Z, Sun M (2016) The application of quantum dots in aquaculture pollution detection. *Toxicol Environ Chem* 98(3–4):385–394
- Chen J, Sun R, Pan C, Sun Y, Mai B, Li QX (2020) Antibiotics and food safety in aquaculture. *J Agric Food Chem* 68(43):11908–11919
- Chou DL, Mao JY, Anand A, Lin HJ, Lin JHY, Tseng CP, Wang HY (2021) Carbonized lysine-nanogels protect against infectious bronchitis virus. *Inter J Mol Sci* 22(11):5415
- Das K, Krishnani KK, Upadhyay AK, Shukla SP, Prasad KP, Chakraborty P, Sarkar B (2024) Fish waste capped and colloidal nanosilver and its

- valorization as natural zeolite conjugates for application in aquaculture. J Disper Sci Technol 45(7):1281–1295. <https://doi.org/10.1080/01932691.2023.2204980>
- Dhandapani E, Duraisamy N, Periasamy P (2020) Highly green fluorescent carbon quantum dots synthesis via hydrothermal method from fish scale. Mater Today: Proceed 26:A1–A5
- Doğan S. ve Köprücü, S. (2024). Balık hastalıklarında tıbbi bitkilerin kullanımı. Book chapter. Livre de Lyon yayınevi. Balık Sağlığı Araştırmalarında Modern ve Geleceğe Yönelik Yaklaşımlar. Bölüm VI. Editörler: Prof. Dr. Sibel KÖPRÜCÜ, Prof. Dr. Ünal İSPİR sayfa: 131-148.
- El-Shenawy AM, Gad DM, Yassin SA (2019) Effect of iron nanoparticles on the development of fish farm feeds. Alexandria J Vet Sci 60(1):102. <https://doi.org/10.5455/ajvs.28123>
- Faiz H, Zuberi A, Nazir S, Rauf M, Younus N (2015) Zinc oxide, zinc sulfate and zinc oxide nanoparticles as source of dietary zinc comparative effects on growth and hematological indices of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). Int J Agric Biol 17(3): 1–7. <http://www.fspublishe rs. Org>
- FAO (2022) The state of world fisheries and aquaculture 2022. Towards blue transformation. Rome, p 266
- Foo WH, Chia WY, Ende S, Chia SR, Chew KW (2024) Nanomaterials in aquaculture disinfection, water quality monitoring, and wastewater remediation. J Environ Chem Eng 12(5):113947–113965. <https://doi.org/10.1016/j.jclep ro.2015.10.117>
- Ghanbari N, Salehi Z, Khodadadi AA, Shokrgozar MA, Saboury AA, Farzaneh F (2021) Tryptophan functionalized graphene quantum dots with enhanced curcumin loading capacity and pH-sensitive release. J Drug Delivery Sci Technol 61:102137
- Gidwani B, Sahu V, Shukla SS, Pandey R, Joshi V, Jain VK, Vyas A (2021) Quantum dots: perspectives, toxicity, advances and applications. J Drug Delivery Sci Technol 61:102308
- Halonen N, Palvolgyi PS, Bassani A, Fiorentini C, Nair R, Spigno G, Kordas K (2020) Bio-based smart materials for food packaging and sensors—a review. Front Mater 7:82–96. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00082>
- Herbeck LS, Unger D, Wu Y, Jennerjahn TC (2013) Effluent, nutrient and organic matter export from shrimp and fish ponds causing eutrophication in coastal and back-reef waters of NE Hainan, tropical China. Cont Shelf Res 57:92–104. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.05.006>
- Juine RN, Sahu BK, Das A (2023) ZnS nano-photocatalysts with elemental type s defects for the visible light harvest and efficient antibiotic, explosive and azo dye pollutants degradation. J Environ Chem Eng 11(6):111175
- Kılınç, N.Ö. ve Köprücü, S. (2022a). İnsan sağlığı ve su ürünleri. Eğitim Yayınevi, Sağlık Bilimleri Alanında Uluslararası Araştırmalar XII, Aralık, 211-231.

- Kılınç, N.Ö. ve Köprücü, S. (2022b). Su ürünlerinden insanlara bulaşan hastalıklar ve korunma yolları. Eğitim Yayınevi, Sağlık Bilimleri Alanında Uluslararası Araştırmalar XII, Aralık, 351-375.
- Kookaram K, Mojazi Amiri B, Dorkoosh FA, Nematollahi MA, Mortazavian E, Abed Elmdoust A (2021) Effect of oral administration of GnRHa+ nanoparticles of chitosan in oogenesis acceleration of goldfish *Carassius auratus*. Fish Physiol Biochem 47:477–486
- Köprücü S. ve Köprücü K. (2023). Su Ürünleri Üretiminde verimliliği Artıran Teknolojiler. Ziraat Orman ve Su Ürünleri Alanında Akademik Araştırma ve Derlemeler. Bölüm 15. Editörler: Prof. Dr. Ali Musa Bozdoğan , Prof. Dr. Nigar Yarpuz Bozdoğan, sayfa 337-360.
- Krishnani KK, Boddu VM, Chadha NK, Chakraborty P, Kumar J, Krishna G, Pathak H (2022) Metallic and non-metallic nanoparticles from plant, animal, and fisheries wastes: potential and valorization for application in agriculture. Environ Sci Poll Res 29(54):81130–81165
- Le AT, Le TT, Tran HH, Dang DA, Tran QH, Vu DL (2012) Powerful colloidal silver nanoparticles for the prevention of gastrointestinal bacterial infections. Adv Natural Sci: Nanosci Nanotechnol 3(4):045007
- Libralato G, Galdiero E, Falanga A, Carotenuto R, De Alteriis E, Guida M (2017) Toxicity effects of functionalized quantum dots, gold and polystyrene nanoparticles on target aquatic biological models: a review. Mol 22(9):1439
- Lin YT, Pan YF, Han YS (2023) Effects of adding spermidine carbon quantum dots in feed on growth, intestinal morphology, immunity and disease resistance of *Anguilla japonica* and *Anguilla marmorata*. Aquac Rep 33:101847
- Mapfumo B (2022) Regional review on status and trends in aquaculture development in sub-Saharan Africa–2020. FAO Fisheries and Aquaculture Circular N. 1232/4. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7817en>
- Mohamed MBED, Abo El Ela FI, Mahmoud R, Farghali AA, Othman SI, Allam AA, Abdel Aleem SAA (2024) Assessment of biocidal efficacy of zinc oxide-zeolite nanocomposites as a novel water disinfectant against commercial disinfectants used in water purification. Appl Water Sci 14(11):1–19
- Nguyen VN, Zhao Z, Tang BZ, Yoon J (2022) Organic photosensitizers for antimicrobial phototherapy. Chem Soc Rev 51(9):3324–3340
- Onuegbu CU, Aggarwal A, Singh NB (2018) ZnO nanoparticles as feed supplement on growth performance of cultured African catfish fingerlings. J Sci Indus Res 77(4):213–218
- Priya V, Raja S (2024) Nanomaterials-based treatment against white spot syndrome virus of penaeid shrimp. Aquac Int 32(2):2005–2018. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01255-9>
- Rana N, Ghosh KS, Chand S, Gathania AK (2018) Investigation of ZnO nanoparticles for their applications in wastewater treatment and antimicrobial activity. Indian J Appl Pure Phy 56:19–25

- Rather MA, Sharma R, Gupta S, Ferosekhan S, Ramya VL, Jadhao SB (2013) Chitosan-nanoconjugated hormone nanoparticles for sustained surge of gonadotropins and enhanced reproductive output in female fish. PLoS ONE 8(2):57094
- Sadegh H, Ali GA, Gupta VK, Makhlof ASH, Shahryari-Ghoshekandi R, Nadagouda MN, Megiel E (2017) The role of nanomaterials as effective adsorbents and their applications in wastewater treatment. J Nanostructure Chem 7:1–14. <https://doi.org/10.1007/s40097-017-0219-4>
- Samia A.C.S., Dayal S., Burda C. (2006). Quantum Dot-based Energy Transfer: Perspectives and Potential for Applications in Photodynamic Therapy. Photochemistry and Photobiology, 82: 617-625.
- Sarkar B, Bhattacharjee S, Daware A, Tribedi P, Krishnani KK, Minhas PS (2015) Selenium nanoparticles for stress-resilient fish and livestock. Nanoscale Res Lett 10:1–14. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1073-2>
- Seo Y, Hwang J, Kim J, Jeong Y, Hwang MP, Choi J (2014) Antibacterial activity and cytotoxicity of multiwalled carbon nanotubes decorated with silver nanoparticles. Int J Nanomedicine 9:4621–4629. <https://doi.org/10.2147/IJN.S69561>
- Sharma R, Rather MA, VijaykumarLeela R, Saha H, PadinhatePurayil SB, Dar SA, Munilkumar S (2014). Preliminary observations on effect of nano-conjugated pheromones on *Clarias batrachus* (Linnaeus, 1758). Aquac Res 45(8):1415–1420
- Shen L, Wang H, Liu S, Bai Z, Zhang S, Zhang X, Zhang C (2018) Assembling of sulfur quantum dots in fission of sublimed sulfur. J American Chem Soc 140(25):7878–7887
- Singha S, Das K, Jha N (2017) Nano-systems for micro-nutrient delivery in aquaculture: a critical analysis. Ann Aquac Res 4(4):1046–1047
- Tan X, Lv C, Chen H (2023) Advances of nanopore-based sensing techniques for contaminants evaluation of food and agricultural products. Critical Rev Food Sci Nutr 63(31):10866–10879
- Tawfik M, Moustafa M, Abumourad IM K, El-Meliegy E, Refai M (2017) Evaluation of nano zinc oxide feed additive on tilapia growth and immunity. In: 15th international conference on environmental science and technology, vol 1342. Rhodes, Greece pp 1–9.
- Thangapandiyan S, Monika S (2020) Green synthesized zinc oxide nanoparticles as feed additives to improve growth, biochemical, and hematological parameters in freshwater fish *Labeo rohita*. Biol Trace Elem Res 195:636–647. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01873-6>
- Thao NTP, Tri NLM, Kien TT, Van Tung T, Hieu TT, Thang NV, Le Thanh H (2024) Valorization of the treatment of antibiotic and organic contents generated from an in-situ-RAS-like shrimp farming pond by using graphene-quantum-dots deposited graphitic carbon nitride photocatalysts. Heliyon 10(5):e26783. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26783>

- Vale G, Mehennaoui K, Cambier S, Libralato G, Jomini S, Domingos RF (2016) Manufactured nanoparticles in the aquatic environment-biochemical responses on freshwater organisms: a critical overview. *Aquat Toxicol* 170:162–174
- Vatanpour V, Yuksekdog A, Ağtaş M, Mehrabi M, Salehi E, Castro-Munoz R, Koyuncu I (2023) Zeolitic imidazolate framework (ZIF-8) modified cellulose acetate NF membranes for potential water treatment application. *Carbo Polymers* 299:120230
- Wang N, Tan HY, Li S, Xu Y, Guo W (2017) Feng Y (2017) Supplementation of micronutrient selenium in metabolic diseases: its role as an antioxidant. *Oxid Med Cell Longev* 1:7478523–7478536. [https:// doi. org/ 10. 1155/ 2017/ 74785 23](https://doi.org/10.1155/2017/7478523)
- Wu Y, Rashidpour A, Almajano MP, Meton I (2020) Chitosan-based drug delivery system: applications in fish biotechnology. *Polymers* 12(5):1177
- Xu X, Ray R, Gu Y, Ploehn HJ, Gearheart L, Raker K, Scrivens WA (2004) Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *J Am Chem Soc* 126(40):12736–12737. [https:// doi. org/ 10. 1021/ ja040 082h](https://doi.org/10.1021/ja040082h)
- Xu G, Zeng S, Zhang B, Swihart MT, Yong KT, Prasad PN (2016) New generation cadmium-free quantum dots for biophotonics and nanomedicine. *Chem Rev* 116(19):12234–12327
- Yang W, Srivastava PK, Han S, Jing L, Tu C, Chen S (2019a) Optomechanical time-gated fluorescence imaging using long-lived silicon quantum dot nanoparticles. *Analyt Chem* 91(9):5499–5503. [https:// doi. org/ 10. 1021/ acs. analc hem. 9b005 17](https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b00517)
- Yang W, Srivastava PK, Han S, Jing L, Tu CC, Chen SL (2019b) A cost-effective time-gated fluorescence imaging system and its bioimaging applications. *Optics in Health Care Biomed Optics IX* 11190:158–164. [https:// doi. org/ 10. 1117/ 12. 25370 97](https://doi.org/10.1117/12.2537097)
- Yu X, Zhong T, Zhang Y, Zhao X, Xiao Y, Wang L, Zhang X (2021) Design, preparation, and application of magnetic nanoparticles for food safety analysis: a review of recent advances. *J Agric Food Chem* 70(1):46–62
- Zhang Y, Qin C, Wang H, Hu X, Gao Y (2024) Occurrence, behavior, and ecotoxicity of quantum dots in aquatic environments. *Environ Sci: Nano* 11(10):4044–4059
- Zheng X, Wu R, Chen Y (2011) Effects of ZnO nanoparticles on wastewater biological nitrogen and phosphorus removal. *Environ Sci Technol* 45(7):2826–2832. [https:// doi. org/ 10. 1021/ es200 744](https://doi.org/10.1021/es200744)