

Biyolojik Bilimlerde Derlemeler

● Editör

Doç. Dr. Ramazan Yazıcı



BİDGE Yayınları

Biyolojik Bilimlerde Derlemeler

Editör: Doç. Dr. Ramazan Yazıcı

ISBN: 978-625-372-997-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2025

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

EVCİL HAYVANLARDA YAŞLANMANIN BİYOLOJİSİ, KRONİK HASTALIKLAR VE OKSİDATİF STRESİN ROLÜ: BİYOKİMYASAL MEKANİZMALAR VE KLİNİK YAKLAŞIMLAR.....	4
MUSTAFA MURAT ÖZTÜRK	4
BALIK DAVRANIŞLARI: FARKLI BESLENME STRATEJİLERİ	28
SAMİ KAYA.....	28
OKAN YAZICIOĞLU	28
BALIKLARDA AĞIR METAL BİRİKİMİ VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ: ÇEVRESEL KAYNAKLAR, BİRİKİM MEKANİZMALARI VE GÜNCEL RİSK DEĞERLENDİRMELERİ.....	42
GÜLİNAZ GÜR SOYURTEKİN	42
RAMAZAN YAZICI	42

EVCİL HAYVANLARDA YAŞLANMANIN BİYOLOJİSİ, KRONİK HASTALIKLAR VE OKSİDATİF STRESİN ROLÜ: BİYOKİMYASAL MEKANİZMALAR VE KLİNİK YAKLAŞIMLAR

MUSTAFA MURAT ÖZTÜRK¹

Giriş

Evcil hayvanlarda yaşlanma, zaman içinde biriken moleküler, hücresel ve doku düzeyindeki hasardan kaynaklanan fizyolojik, metabolik ve bilişsel işlevlerdeki kademeli bir düşüşle karakterize edilen çok boyutlu ve ilerleyici bir biyolojik süreçtir. Yaşlanma evrensel bir biyolojik olgu olmasına rağmen, kedi ve köpek gibi evcil hayvanlar, genetik faktörler, çevresel maruziyetler, beslenme ve veteriner bakımındaki gelişmelerden etkilenen türe özgü yaşlanma yörüngeleri sergiler. Evcil hayvanlardaki yaşlanma sürecinin altında yatan temel mekanizmalar, insanlarda tanımlananlara paraleldir ve oksidatif stres, mitokondriyal disfonksiyon, epigenetik değişiklikler, kronik inflamasyon ve hücresel yaşlanmayı içerir (López-Otín vd., 2013; Campisi, 2013).

¹ Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Çiçekdağı Meslek Yüksekokulu, Veterinerlik Bölümü, Kırşehir, Turkey, mustafa.ozturk@ahievran.edu.tr, Orcid: 0000-0002-2302-0018

Yaşlanmanın temel etkenlerinden biri, reaktif oksijen türleri (ROS) ile antioksidan savunma sistemleri arasındaki dengesizlikten kaynaklanan oksidatif strestir. Yüksek ROS seviyeleri, proteinlere, lipitlere ve nükleik asitlere oksidatif hasara yol açarak hücrel işlevi bozmakta ve mitokondriyal gerilemeyi hızlandırmaktadır (Halliwell, 1995). Yaşlanan köpeklerde, oksidatif hasar doğrudan bilişsel işlev bozukluğu ve nörodejeneratif değişikliklerle ilişkilendirilmiştir; bu da veteriner hekimlik pratiğinde klinik önemini vurgulamaktadır (Head, 2011).

Mitokondriyal disfonksiyon, yaşlanmanın bir diğer önemli belirtisidir. Yaşla ilişkili mitokondriyal solunum bozuklukları ve artan ROS sızıntısı, hücrel enerji kapasitesini azaltır ve oksidatif hasarı daha da kötüleştirir (Sun vd., 2016). Mitokondriyal eksiklikler, yaşlı köpek ve kedilerde sıklıkla görülen kalp rahatsızlıkları, kronik böbrek hastalığı ve metabolik sendromlar da dahil olmak üzere birçok kronik hastalığın patogenezinde katkıda bulunur.

DNA metilasyon desenlerindeki değişiklikler, histon modifikasyonları ve mikroRNA düzenlemesi gibi epigenetik değişiklikler, yaşam boyu gen ekspresyonunun düzenlenmesinde kritik roller oynar. Son çalışmalar, köpeklerdeki DNA metilasyonuna dayalı epigenetik saatlerin, biyolojik yaş tahmini ve hastalık duyarlılığının öngörülmesi için umut vadeden biyobelirteçler olarak hizmet edebileceğini ortaya koymuştur (Zimin vd., 2020; Fick vd., 2012).

Yaşlanmanın bir diğer önemli etkeni ise, yaygın olarak inflamasyonla yaşlanma olarak adlandırılan kronik düşük dereceli inflamasyondur. Bu durum, akut enfeksiyon yokluğunda bile IL-6, TNF- α ve CRP gibi inflamatuvar medyatörlerin sürekli olarak yüksek seviyelerde bulunmasıyla karakterize edilir. İnflamasyonla yaşlanma, evcil hayvanlarda bağışıklık düzensizliğine, doku

dejenerasyonuna ve osteoartrit ve kardiyovasküler disfonksiyon gibi kronik hastalıkların gelişimine katkıda bulunur (Dorsey & Le Boedec, 2023).

Hücresel yaşlanma, telomer kısalması, oksidatif stres veya DNA hasarı tarafından tetiklenen, hücre çoğalmasının geri dönüşümsüz olarak durması olarak tanımlanır ve SASP (yaşlanma ile ilişkili salgısal fenotip) olarak bilinen pro-enflamatuar faktörler salgılayan yaşlanmış hücrelerin birikmesine yol açar. SASP, doku yeniden yapılanmasına, fibrozise, azalmış rejeneratif kapasiteye ve genel olarak organizmanın yaşlanmasına katkıda bulunur (Campisi, 2013).

Veteriner hekimliğinde, yaşlanmanın altında yatan mekanizmaları anlamak, yaşlı hastalar için hedeflenmiş önleyici stratejiler ve klinik müdahaleler geliştirmek açısından hayati önem taşır. Enflamasyon, oksidatif stres ve organ fonksiyonu ile ilgili biyobelirteçlerin rutin olarak izlenmesi, yaşa bağlı hastalıkların erken teşhisini sağlar. E vitamini, C vitamini, karotenoidler, polifenoller ve omega-3 yağ asitleri gibi antioksidanlarla zenginleştirilmiş diyetler de dahil olmak üzere beslenme yaklaşımları, yaşlı hayvanlarda oksidatif yükü azaltmada ve metabolik sağlığı desteklemede önemli roller oynar (Laflamme, 2005). Dahası, senolitik ajanlar, mitokondriye yönelik antioksidanlar ve epigenetik biyobelirteçlerin uygulanması gibi yeni ortaya çıkan terapötik stratejiler, evcil hayvanlarda sağlık ömrünü ve genel yaşam kalitesini iyileştirme potansiyeli taşımaktadır.

Yaşlanmanın Moleküler Temelleri

2.1. Hücresel Yaşlanma ve Telomer Kısalması

Hücresel yaşlanma, çeşitli iç ve dış stres faktörlerinin etkileri nedeniyle hücrelerin bölünme ve yenilenme kapasitesinin geri dönüşümsüz olarak sona ermesiyle karakterize edilen, yaşlanma

biyolojisinin merkezi bir bileşenidir. Bu süreçte, hücreler metabolik olarak aktif kalsalar bile, artık mitotik bölünmeye katılamazlar ve dokuların rejeneratif potansiyelindeki düşüşe önemli ölçüde katkıda bulunurlar. Telomer dinamikleri, yaşlanmanın başlangıcında özellikle kritik bir rol oynar. Telomerler, kromozomların uçlarını koruyan ve her hücre bölünmesiyle yapısal olarak kısalan özel DNA tekrar dizilerinden oluşur. Bu ilerleyici kısalma, telomer uzunluğu belirli bir eşiğin altına düştüğünde hücre içinde DNA hasar yanıt mekanizmalarının aktivasyonuna yol açar; sonuç olarak, hücre çoğalma döngüsünden çıkarılır ve yaşlanma fenotipine girer (Blackburn, 1991). Bu biyolojik mekanizma sadece kronolojik yaşlanmayı belirlemekle kalmaz, aynı zamanda çeşitli kronik hastalıkların gelişiminde de rol oynar. Nitekim, köpeklerde yapılan klinik ve moleküler çalışmalar, telomer kısalmasının kardiyovasküler hastalık gelişme riskiyle önemli ölçüde ilişkili olduğunu göstermiştir. Telomerlerin büyük ırk köpeklerde daha hızlı kısaldığı ve kalp fonksiyon bozukluğu, damar sertliği ve yaşa bağlı kalp dejenerasyonu gibi klinik durumlara yatkınlığı artırdığı bildirilmiştir (Fick, vd., 2012). Bu bulgular, telomer biyolojisinin veterinerlik yaşlanma araştırmalarında önemli bir prognostik belirteç olabileceği fikrini desteklemektedir.

2.2. Mitokondriyal Disfonksiyon ve Serbest Radikal Üretimi

Mitokondriler, hücresel enerji üretiminden sorumlu temel organellerdir ve oksidatif fosforilasyon süreci sırasında kaçınılmaz olarak belirli miktarlarda reaktif oksijen türleri (ROS) üretirler. Bu reaktif moleküller fizyolojik seviyelerde sinyal iletiminde önemli roller oynarken, aşırı üretildiklerinde hücresel makromoleküllere zarar verebilirler. Yaşlanma süreci ilerledikçe, mitokondriyal DNA çevresel ve metabolik stres faktörlerine karşı daha kırılgan hale gelir ve bu da mutasyon oranlarında artışa yol açar. Mitokondriyal DNA mutasyonlarının birikmesi, elektron taşıma zincirindeki komplekslerin yapısal bütünlüğünü ve işlevsel verimliliğini bozarak

elektron sızıntısını ve dolayısıyla ROS üretiminde önemli bir artışı tetikler (Sun vd., 2016). Elektron taşıma zincirindeki bu verimsizlik, hücre içinde kronik oksidatif stresi sürdüren temel mekanizmalardan biri olarak kabul edilir. Özellikle yüksek metabolik aktiviteye ve yoğun fiziksel performansa sahip çalışma köpek ırklarında (örneğin, çoban köpekleri, kızak köpekleri ve arama kurtarma köpekleri), mitokondriyal oksijen tüketimi ve enerji dönüşümü daha yüksek olduğu için bu yaşa bağlı bozuklukların etkileri daha erken ve daha belirgin bir şekilde gözlemlenir. Bu hayvanlarda, artan enerji talebi, mitokondrilerin sürekli olarak yüksek seviyelerde çalışmasına neden olarak uzun vadede mitokondriyal aşınmayı hızlandırır ve oksidatif strese dayalı yaşlanma süreçlerinin daha hızlı ilerlemesine katkıda bulunur.

2.3. Epigenetik Düzenleme ve Gen İfadesi

DNA metilasyonu, histon proteinlerindeki kovalent modifikasyonlar ve mikroRNA (miRNA) ekspresyon profillerindeki değişiklikler, yaşlanma biyolojisinin temel epigenetik belirleyicileri arasındadır. Bu epigenetik mekanizmalar, hücre dışı bir sinyal olmaksızın gen ekspresyonunu düzenleyerek yaşa bağlı fonksiyonel gerilemenin moleküler temelini sağlar. Özellikle, DNA metilasyonundaki genel azalma ve belirli promotör bölgelerinde gözlemlenen bölgesel hipermetilasyon, yaşlanmanın karakteristik epigenomik imzaları olarak tanımlanır (Sun vd., 2016).

Evcil kedi (*Felis catus*) modelleri üzerinde yapılan çalışmalar, belirli gen bölgelerindeki hipometilasyonun yaş ilerledikçe önemli ölçüde arttığını ve bununla birlikte inflamatuvar yanıtla ilişkili gen setlerinin aşırı aktivasyonunun eşlik ettiğini ortaya koymuştur. Bu, kedilerde yaşlanmanın sadece kronolojik bir süreç olmadığını, aynı zamanda bağışıklık sistemi düzenleyicilerinin epigenetik yeniden programlanmasını da içerdiğini göstermektedir. Artan hipometilasyonun, bağışıklık yanıtı, stres yanıtı ve hücresel

onarım mekanizmalarıyla ilişkili yolları etkileyerek düşük dereceli kronik inflamasyonun ("inflamasyonla yaşlanma") gelişimine katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

Bu bulgular, kedilerdeki yaşlanma sürecinin epigenetik düzeyde dinamik ve çok katmanlı bir düzenlemeye tabi olduğunu göstermektedir; ayrıca epigenetik belirteçlerin, yaşlanmanın biyolojik saatini değerlendirmek ve yaşa bağlı hastalıkları tahmin etmek için biyobelirteç olarak kullanılabileceğini de göstermektedir.

3. Oksidatif Stres ve Yaşlanma Arasındaki İlişki

3.1. Oksidatif Stresin Biyokimyasal Mekanizması

Oksidatif stres, reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumu ile antioksidan savunma sistemlerinin ortaya çıkan hasarı nötralize etme veya onarma kapasitesi arasındaki hassas dengenin bozulmasını ifade eder. Fizyolojik koşullar altında, ROS, bağışıklık tepkisi, hücresel çoğalma ve apoptoz gibi süreçlerde yer alan sinyal molekülleri olarak işlev görür. Bununla birlikte, üretimleri antioksidan mekanizmaların kapasitesini aştığında, oksidatif stres meydana gelir ve ilerleyici hücresel ve moleküler hasara yol açar (Halliwell, 1995).

Oksidatif streste rol oynayan başlıca reaktif oksijen türleri arasında, esas olarak mitokondriyal elektron taşıma zincirinde üretilen süperoksit anyonu ($O_2^{\cdot-}$); ve genellikle Fenton reaksiyonu yoluyla oluşan en reaktif ve hasar verici oksijen radikallerinden biri olan hidroksil radikali ($\cdot OH$) yer alır. ve nispeten kararlı bir reaktif oksijen türü olan hidrojen peroksit (H_2O_2), membranlar boyunca yayılabilir ve metal iyonlarının varlığında oksidatif sinyalleşmeye katkıda bulunabilir veya daha reaktif türler üretebilir (Sun ve ark., 2016).

ROS'u etkisiz hale getirmek ve redoks homeostazını korumak için, biyolojik sistemler karmaşık bir enzimatik ve

enzimatik olmayan antioksidan savunma ağına güvenir. Enzimatik antioksidanlar arasında süperoksit anyonunu hidrojen peroksit'e dönüştüren süperoksit dismutaz (SOD); hidrojen peroksiti su ve oksijene ayrıştırmaktan sorumlu katalaz (CAT); ve glutatyonu substrat olarak kullanarak hidrojen peroksiti ve lipid peroksitleri indirgeyen glutatyon peroksidaz (GPx) bulunur. Bu enzimler, zararlı oksidanların birikmesini önlemek ve hücresel bütünlüğü korumak için işbirliği içinde çalışırlar (Halliwell, 1995; Head, 2011).

Öte yandan, enzimatik olmayan antioksidanlar, serbest radikalleri doğrudan temizleyen veya diğer antioksidanların yenilenmesine yardımcı olan A vitamini (retinoidler), C vitamini (askorbik asit), E vitamini (α - tokoferol) ve glutatyon gibi moleküllerden oluşur. Örneğin, E vitamini lipid membranlarını peroksidasyondan korurken, C vitamini sulu ROS'u nötralize etmeye ve oksitlenmiş E vitaminini yenilemeye katılır. Bir tripeptit tiyol olan glutatyon, hücre içi redoks dengesinin korunmasında ve elektrofilik bileşiklerin detoksifikasyonunda merkezi bir rol oynar (López-Otín vd., 2013; Sun vd., 2016).

Köpek ve kedi gibi evcil hayvanlarda aşırı oksidatif stres, yaşlanma, kronik hastalıklar ve bilişsel işlev bozukluğu ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmalar, oksidatif dengesizliğin yaşlı hayvanlarda nörodejenerasyona, mitokondriyal gerilemeye, bağışıklık düzensizliğine ve doku onarım kapasitesinin azalmasına katkıda bulunduğunu göstermekte ve bu da veteriner klinik uygulamalarında antioksidan desteğinin önemini vurgulamaktadır (Head, 2011).

3.2. Lipid Peroksidasyonu ve Biyobelirteçler

Malondialdehit (MDA) ve 4-hidroksinonenal (4-HNE), reaktif oksijen türlerinin (ROS) hücre zarı fosfolipidlerine oksidatif saldırısı sonucu oluşan ikincil lipid peroksidasyon ürünleridir ve bu nedenle vücuttaki oksidatif stres seviyelerinin en yaygın kullanılan

biyokimyasal belirteçleri arasındadır. Esas olarak çoklu doymamış yağ asitlerinin parçalanmasından kaynaklanan kararlı bir aldehit yapısı olan MDA, hem plazmada hem de dokularda kolayca ölçülebilir ve kümülatif oksidatif hasar derecesini yansıtır. Benzer şekilde, 4-HNE, proteinlere, DNA'ya ve diğer hücresel makromoleküllere kovalent olarak bağlanabilen ve fonksiyonel bozukluklara yol açan, zar lipidlerinden türetilen oldukça reaktif bir α,β -doymamış aldehittir. Bu nedenle, 4-HNE sadece oksidatif stresin bir göstergesi değil, aynı zamanda hücre içi sinyal süreçlerini etkileyerek yaşlanmanın patofizyolojisinin aktif bir düzenleyicisi olarak da kabul edilir.

Yaşlanmayla birlikte, antioksidan savunma mekanizmalarının etkinliğindeki azalma, mitokondriyal ROS üretimindeki artış ve hücresel onarım kapasitesindeki azalma, hem MDA hem de 4-HNE seviyelerinde önemli bir artışa neden olur. Literatür, bu iki biyobelirtecin yaşlı hayvanlarda genç bireylere göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu (Del Rio vd., 2005) ve bu artışın karaciğer, kas dokusu ve merkezi sinir sistemi gibi metabolik olarak aktif organlarda daha belirgin olduğunu göstermektedir. Ayrıca, lipid peroksidasyon ürünlerindeki artışın kronik inflamasyon, doku fibrozisi ve yaşa bağlı dejeneratif hastalıkların ilerlemesiyle ilişkili olduğu vurgulanmaktadır.

Bu bağlamda, MDA ve 4-HNE seviyelerinin ölçümü, yaşlanmanın biyokimyasal değerlendirilmesinde, oksidatif stres yükünün kantitatif olarak belirlenmesinde ve yaşa bağlı patolojilerin erken teşhisinde önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Yaş ilerledikçe artan bu aldehitler, biyolojik yaşı belirlemek ve antioksidan müdahalelerin etkinliğini izlemek için değerli biyobelirteçler olarak kabul edilmektedir.

Tablo 1. Evcil Hayvanlarda Başlıca Oksidatif Stres Biyobelirteçleri

Biomarker	Tanım	Klinik Kullanım
MDA	Lipid peroksidasyon ürünü	Kronik hastalık izleme
8-OHdG	DNA oksidasyon göstergesi	Kanser ve yaşlanma ilişkisi
TOS	Toplam oksidan seviyesi	Oksidatif yük ölçümü
TAC	Toplam antioksidan kapasite	Antioksidan tedavi yanıtı

Tablodaki biyobelirteçler, vücuttaki oksidatif stres seviyesini ve buna karşı geliştirilen antioksidan savunma kapasitesini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan parametrelerdir. Her biri farklı biyomoleküllerde meydana gelen oksidatif hasarı yansıtarak hastalıkların teşhisinde, izlenmesinde ve tedavisinde değerli bilgiler sağlar.

MDA (Malondialdehit): MDA, lipid peroksidasyonunun sonucu olarak oluşan son ürünlerden biridir. Hücre zarlarının temel bileşenleri olan lipidlere verilen oksidatif hasar, hücre bütünlüğünü ve işlevini bozar. Bu nedenle, artan MDA seviyeleri, artan oksidatif stresin ve hücresel hasarın güçlü bir göstergesidir. Klinik açıdan, MDA seviyeleri sıklıkla kronik inflamatuvar hastalıklarda, kardiyovasküler hastalıklarda, diyabette ve nörodejeneratif bozukluklarda izlenir.

8-OHdG (8-Hidroksi-2'-deoksiguanosin): 8-OHdG, DNA'daki guanin bazının oksidatif modifikasyonunun sonucu olarak ortaya çıkar. DNA hasarının önemli bir biyokimyasal göstergesi olarak kabul edilir. Klinik olarak, 8-OHdG seviyeleri kanser gelişiminde, yaşlanma süreçlerinde, çevresel toksinlere maruz kalmada ve yüksek hücresel oksidatif hasar durumlarında

değerlendirilir. Yüksek 8-OHdG seviyeleri, mutasyon ve genomik instabilite riskinin arttığını gösterir.

TOS (Toplam Oksidan Durumu): TOS, vücuttaki tüm oksidan moleküllerini ölçen kapsamlı bir parametredir. Bireysel oksidanları ölçmek zor olduğundan, TOS genel oksidatif yükü belirlemek için pratik ve etkili bir yaklaşım sunar. Klinik kullanımda, iltihaplanma, metabolik hastalıklar, kardiyovasküler risk değerlendirmesi ve antioksidan kapasitesinin yetersiz olduğu durumların belirlenmesinde tercih edilir.

TAS (Toplam Antioksidan Durumu): TAS, vücuttaki tüm antioksidan moleküllerinin (enzimatik ve enzimatik olmayan) toplam savunma kapasitesini ölçer. Bu parametre, vücudun oksidatif stresle mücadelede ne kadar güçlü olduğunu gösterir. Klinik olarak, antioksidan tedavilerine verilen yanıtı değerlendirmek ve oksidatif hasarı azaltmayı amaçlayan müdahalelerin etkinliğini izlemek için kullanılır. TOS ile birlikte değerlendirildiğinde, oksidatif stres dengesinin net bir profili elde edilir.

4. Oksidatif Stresle İlişkili Kronik Hastalıklar

4.1. Kardiyovasküler Hastalıklar

Yaşlı köpeklerde konjestif kalp yetmezliği (KY), kalp kası dokusunda yapısal ve fonksiyonel bozukluklarla karakterize edilen yaygın bir geriatric hastalıktır. Son çalışmalar, oksidatif stresin bu patolojinin gelişiminde merkezi bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Özellikle, reaktif oksijen türlerinin (ROS) artışı, kardiyomiyositlerde lipid peroksidasyonuna, protein karbonilasyonuna ve DNA hasarına yol açarak kalp dokusunun fonksiyonel kapasitesini azaltır. Malondialdehit (MDA) gibi lipid peroksidasyon ürünleri, KY'li köpeklerde biyokimyasal olarak ölçülebilen ve oksidatif hasarın derecesini yansıtan önemli biyobelirteçlerdir. Klinik çalışmalar, yaşlı köpeklerdeki MDA

seviyelerinin KY'nin şiddetiyle önemli ölçüde ilişkili olduğunu ve kalp yetmezliğinin ilerlemesiyle belirgin şekilde arttığını bildirmiştir (Freeman, 2010).

Bu bulgu, oksidatif stresin sadece bir sonuç değil, aynı zamanda kalp yetmezliğinin patogeneğinde aktif bir katılımcı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, MDA düzeyleri, veteriner kliniklerinde hastalık prognozunu değerlendirmek, tedaviye yanıtı izlemek ve yaşa bağlı kardiyovasküler riskleri tahmin etmek için potansiyel bir biyobelirteç olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, antioksidan desteği ve oksidatif stresin modülasyonu, yaşlı köpeklerde konjestif kalp yetmezliğinin yönetiminde tamamlayıcı bir strateji olarak önem kazanmaktadır.

4.2. Kronik Böbrek Hastalığı

Kronik böbrek hastalığı (KBH), yaşlı kedilerde sık görülen ve böbrek fonksiyonunu giderek bozan önemli bir geriatrik hastalıktır. Son çalışmalar, oksidatif stresin, özellikle oksidatif DNA hasarının, KBH'nin patogeneğinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Artan reaktif oksijen türleri (ROS), böbrek tübül hücrelerinde DNA zincir kırılmalarına ve baz modifikasyonlarına yol açarak hücre fonksiyon kaybını ve doku fibrozunu hızlandırır. Oksidatif DNA hasarını belirlemek için kullanılan başlıca biyobelirteçlerden biri olan 8-hidroksideoksiguanosin (8-OHdG), kronik böbrek hastalığı olan kedilerde önemli ölçüde yüksektir (Finch & Syme, 2015).

Artan 8-OHdG seviyeleri, mevcut oksidatif hasarın derecesini göstermekle kalmaz, aynı zamanda hastalığın ilerleme hızını ve böbrek dokusundaki geri dönüşümsüz değişiklikleri tahmin etmeyi de sağlar. Bu bulgular, oksidatif DNA hasarının KBH'nin patogeneğinde temel bir mekanizma olduğunu ve antioksidan tedavi yaklaşımlarının hastalık ilerlemesini yavaşlatmak için potansiyel bir strateji olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, 8-OHdG'nin klinik

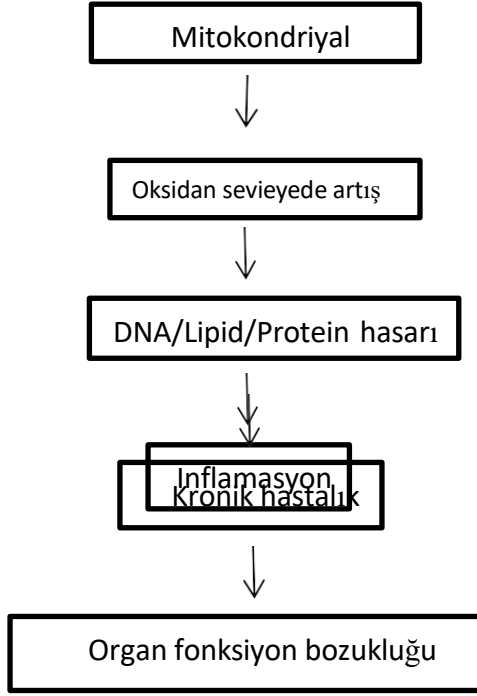
ortamda biyomarker olarak kullanılması, yaşı kederde böbrek fonksiyon kaybının erken teŗhisi ve uzun vadeli takibi için deēerli bilgiler saēlayabilir.

Nörodejeneratif Hastalıklar

Köpeklerde biliŗsel iŗlev bozukluēu sendromu (CCDS), yaşı köpeklerde gözlemlenen, klinik olarak hafıza kaybı, yönelim bozukluēu, uyku-uyanıklık döngüsünde deēiŗiklikler ve sosyal etkileŗimde azalma ile karakterize edilen nörodejeneratif bir durumdur. Bu sendrom, birçok patofizyolojik mekanizmada insanlardaki Alzheimer hastalıēına benzerlik gösterir; özellikle amiloid-beta birikimi, tau proteininin hiperfosforilasyonu ve sinaptik kayıp benzer süreçlerdir (Head, 2011).

Oksidatif protein hasarı, BDS geliŗiminde kritik bir bileŗen olarak ortaya çıkmaktadır. Artan reaktif oksijen türleri (ROS), nöronal proteinlerde karbonilasyona ve diēer oksidatif modifikasyonlara yol açarak yapısal bütünlüklerini ve iŗlevlerini bozmaktadır. Bu durum, özellikle hipokampus ve kortikal bölgelerde sinaptik iletiŗimin azalmasına, nörotransmitter dengesizliklerine ve biliŗsel iŗlevlerin bozulmasına neden olur.  alıŗmalar, oksidatif protein ürünlerinin yaşı köpeklerin beyin dokusunda biriktiēini ve biliŗsel test performansını ile önemli ölçüde iliŗekli olduēunu g stermiŗtir (Head, 2011). Bu bulgular, oksidatif protein hasarının BDS patogenezinde hem bir belirteç hem de potansiyel bir terapötik hedef olabileceēini d ŗ nd rmektedir. Antioksidan takviyeleri, diyet deēiŗiklikleri ve nöroprotektif ajanlar, yaşı köpeklerde biliŗsel gerilemeyi yavaŗlatmada stratejik öneme sahip olabilir. Dahası, bu mekanizmaların anlaŗılması, köpek modellerinin insan Alzheimer araŗtırmalarında  eviri deēeri taŗımasını saēlar.

Şekil 1. Oksidatif Stres-Hastalık İlişkisi Mekanizması



Mitokondriler, hücresel enerji üretiminden sorumlu birincil organellerdir ve oksidatif fosforilasyon sırasında sınırlı miktarda reaktif oksijen türü (ROS) üretirler. Bununla birlikte, yaşlanma, çevresel toksinlere maruz kalma, kronik inflamasyon, metabolik bozukluklar ve hipoksi gibi çeşitli stres faktörleri mitokondriyal fonksiyonun bozulmasına yol açar. Mitokondriyal disfonksiyonun başlangıcı, elektron taşıma zincirindeki verimsizlik nedeniyle hücresel enerji üretiminde azalmaya ve elektron sızıntısında artışa neden olur. Bu süreç, ROS üretiminde belirgin bir artışa yol açar.

Mitokondrilerden kaynaklanan artmış ROS, antioksidan savunma kapasitesini aşarak hücresel düzeyde oksidatif strese yol açar. Oksidatif stres, hücrenin temel biyomoleküllerinde geri döndürülemez veya geri döndürülmesi zor hasara neden olur. Bu

bağlamda, DNA, lipitler ve proteinler oksidatif saldırıya en duyarlı yapılardır; DNA'da baz modifikasyonları (örneğin, 8-OHdG oluşumu), lipit peroksidasyon ürünlerinde artış (özellikle MDA ve 4-HNE) ve proteinlerde yapısal-fonksiyonel bozulmalar meydana gelir. Hücre bileşenlerindeki bu hasarlar birikir ve "kronik hücresel hasar" olarak tanımlanan bir tablo oluşturur.

Kronik oksidatif hasar, hücresel sinyal yollarını aktive ederek inflamatuvar yanıtı tetikler. Özellikle, ROS birikimi, NF- κ B gibi transkripsiyon faktörlerini aktive ederek proinflamatuvar sitokinlerin (TNF- α , IL-6, IL-1 β) üretimini artırır. Böylece kronik inflamasyon gelişir. Kronik inflamasyon, oksidatif stresle birlikte ilerleyerek hücresel hasarı daha da kötüleştiren kısır bir döngü oluşturur.

Zamanla, bu patolojik süreç, doku ve organ düzeylerinde önemli fonksiyonel kayıplara yol açar. Oksidatif stres ve inflamasyonun birlikte ilerlediği bu süreç, endotel disfonksiyonuna bağlı kardiyovasküler hastalıkların gelişmesi, pankreas β -hücre hasarı sonucu diyabetin ortaya çıkması ve hızlanmış nöronal dejenerasyona bağlı nörodejeneratif hastalıklar gibi birçok kronik hastalığın temel mekanizmasını oluşturur. Sonuç olarak, mitokondriyal disfonksiyonla başlayan oksidatif stres-inflamasyon döngüsü, çeşitli kronik hastalıkların hem başlangıcında hem de ilerlemesinde kritik bir rol oynar.

5. Klinik Yaklaşımlar

5.1. Tanısal Değerlendirme

Oksidatif stresin klinik tanısında aşağıdaki biyokimyasal analizler kullanılır:

- ✓ TAS/TOS ölçümleri
- ✓ MDA tayini
- ✓ Antioksidan enzim aktiviteleri (SOD, GPx)
- ✓ 8-OHdG düzeyi

Evcil hayvanlarda oksidatif stresin klinik tanısı, oksidatif hasar ürünlerini veya antioksidan savunma mekanizmalarındaki değişiklikleri tespit eden bir dizi biyokimyasal analize dayanmaktadır. Bu ölçümler, redoks dengesizliğine dair önemli bilgiler sağlayarak patolojik süreçlerin erken teşhisini ve tedavi kararlarının yönlendirilmesini mümkün kılar. En sık kullanılan biyobelirteçler arasında toplam oksidan ve antioksidan kapasite değerlendirmeleri, lipid peroksidasyon göstergeleri, antioksidan enzim aktiviteleri ve oksidatif DNA hasarı belirteçleri yer almaktadır (Halliwell, 1995; López-Otín vd., 2013).

Toplam Antioksidan Kapasitesi (TAS) ve Toplam Oksidan Durumu (TOS), organizmanın genel oksidatif durumunu yansıtan yaygın olarak kullanılan parametrelerdir. TAS, enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanların birleşik etkisini ölçerken, TOS serum veya doku örneklerindeki toplam oksidatif molekül konsantrasyonunu nicelendirir. Bu ölçümler birlikte, redoks homeostazına ilişkin bütünsel bir görünüm sağlayarak, klinisyenlerin oksidatif yükün hassas bir göstergesi olan Oksidatif Stres İndeksi'ni (OSI) hesaplamasına olanak tanır (Halliwell, 1995). TAS/TOS değerlendirmeleri, evcil hayvanlarda inflamatuvar durumları, yaşlanmaya bağlı metabolik değişiklikleri ve sistemik oksidatif hasarı izlemek için kullanılmıştır (Freeman vd., 2020).

Malondialdehit (MDA), lipid peroksidasyonunun başlıca son ürünlerinden biridir ve oksidatif stres için en sık analiz edilen biyobelirteçlerden biridir. Artan MDA seviyeleri, aşırı ROS aktivitesinin neden olduğu membran lipid hasarını gösterir. Kantifikasyon genellikle ekonomik ve klinik ve araştırma laboratuvarlarında yaygın olarak kullanılan tiyobarbitürik asit reaktif maddeler (TBARS) testi kullanılarak yapılır (Sun vd., 2016). Yüksek MDA konsantrasyonlarının, yaşlanan köpek ve kedilerde bilişsel gerileme, karaciğer disfonksiyonu ve inflamatuvar bozukluklarla ilişkili olduğu gösterilmiştir (Head, 2011).

Antioksidan enzim aktivitesinin -özellikle süperoksit dismutaz (SOD) ve glutatyon peroksidaz (GPx)- değerlendirilmesi, enzimatik antioksidan savunma kapasitesi hakkında değerli bilgiler sağlar.

SOD, süperoksit radikallerini hidrojen peroksite dönüştürerek ROS toksisitesini azaltır.

GPx, glutatyonun oksidasyonu yoluyla hidrojen peroksiti ve lipid peroksitleri detoksifiye eder. Bu enzimlerin aktivitesindeki azalma, antioksidan savunma mekanizmalarının bozulduğunu yansıtır ve sıklıkla kronik inflamatuvar hastalıklar, metabolik bozukluklar, yaşlanmaya bağlı gerileme ve oksidatif doku hasarı olan hayvanlarda gözlenir (Sun vd., 2016; Packer vd., 2020).

8-Hidroksi-2'-deoksiguanosin (8-OHdG), ROS'un DNA zincirlerindeki guanin kalıntılarını oksitlemesiyle oluşan, oksidatif DNA hasarının oldukça güvenilir ve spesifik bir biyobelirteçidir. Serum, plazma veya idrar 8-OHdG seviyeleri, genomik stabilite, oksidatif hasar derecesi ve hücresel yaşlanma hakkında bilgi sağlar (López-Otín vd., 2013). Yüksek 8-OHdG konsantrasyonları, evcil hayvanlarda mitokondriyal disfonksiyon, kronik inflamasyon, kanser riski ve hızlanmış yaşlanma süreçleriyle ilişkilendirilmiştir. Artan kanıtlar, geriatrik veteriner hekimliğinde prognostik bir belirteç olarak ve antioksidan tedaviye yanıtları değerlendirmek için bir araç olarak rolünü desteklemektedir (Zicker, 2021).

Toplu olarak, bu biyokimyasal ölçümler, oksidatif stresin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır ve veteriner hekimlik pratiğinde yaşa bağlı hastalıkların tanısal incelemesinde vazgeçilmezdir. Bu yöntemlerin rutin kullanımı, erken teşhisi kolaylaştırır, tedavi stratejilerine yön verir ve oksidatif stresle ilişkili durumların genel yönetimini iyileştirir.

5.2. Beslenme ve Antioksidan Takviyeleri

Yaşlı hayvanlarda, artan oksidatif stres ve antioksidan savunma mekanizmalarının etkinliğinin azalması, hücresel hasarın birikmesine ve kronik hastalıkların ilerlemesine zemin hazırlar. Bu bağlamda, diyet veya takviyeler yoluyla sağlanan antioksidanlar, oksidatif dengenin korunmasında önemli bir rol oynar. Özellikle E vitamini, lipid membranları peroksidatif hasardan korurken, C vitamini sulu fazdaki serbest radikalleri nötralize ederek hücre içi ve hücre dışı ortamlardaki oksidatif yükü azaltır. Koenzim Q10, mitokondriyal elektron taşıma zincirinin verimliliğini artırarak reaktif oksijen türlerinin üretimini sınırlar ve aynı zamanda lipid peroksidasyonuna karşı inhibitör bir etki gösterir. Öte yandan polifenoller, fenolik yapıları nedeniyle güçlü serbest radikal temizleme özelliklerine sahiptir ve hücresel antioksidan gen ekspresyonunu düzenleyebilir (Freeman vd., 2016).

Ek olarak, omega-3 yağ asitleri, özellikle eikosapentaenoik asit (EPA) ve dokosaheksaenoik asit (DHA), sistemik inflamasyonu düzenleyerek oksidatif hasarın dolaylı olarak azaltılmasına katkıda bulunur. İnflamasyonun baskılanması, ROS üretimini ve oksidatif protein ve lipid hasarını azaltarak doku homeostazının korunmasına yardımcı olur. Klinik çalışmalar, yaşlı köpek ve kedilerde antioksidan takviyeleri ve omega-3 desteğinin birlikte kullanımının oksidatif stres biyobelirteçlerinde önemli azalmalara yol açtığını ve kardiyovasküler, böbrek ve nörolojik fonksiyonlar üzerinde koruyucu etkiler gösterdiğini bildirmiştir.

Bu bulgular, yaşlı hayvanlarda diyet ve takviye yoluyla sağlanan antioksidan desteğinin, oksidatif dengeyi yeniden sağlamada ve yaşa bağlı fonksiyonel gerilemeyi yavaşlatmada stratejik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

5.3. Farmakolojik Yaklaşımlar

Oksidatif stres ve serbest radikal oluşumu, birçok kronik hastalığın patogeneğinde kritik bir rol oynar. Bu nedenle, farmakolojik yaklaşımlar hem hedef organ hasarını azaltmak hem de sistemik oksidatif stresi kontrol etmek için kullanılır.

ACE inhibitörleri (Anjiyotensin Dönüştürücü Enzim İnhibitörleri): ACE inhibitörleri, özellikle kardiyovasküler sistem üzerindeki yükü azaltarak oksidatif stres üzerinde koruyucu etkiler gösterir. Anjiyotensin II üretimini inhibe ederek, vasküler düz kaslarda vazodilasyona neden olur, inflamatuvar yanıtı azaltır ve endotel fonksiyonunu iyileştirir. Bu mekanizmalar, hem kalp hem de böbrek dokusundaki oksidatif hasarı azaltmaya katkıda bulunur. Örnekler: Enalapril, Ramipril, Lisinopril.

Böbrek koruyucu ajanlar: Böbrek dokusunu hedef alan böbrek koruyucu ajanlar, özellikle kronik böbrek hastalığı veya diyabetik nefropati gibi durumlarda oksidatif hasarı sınırlar. Bu ajanlar glomerüler filtrasyon basıncını düşürür, anti-enflamatuvar etkiler gösterir ve reaktif oksijen türlerinin birikmesini önleyerek böbrek hücrelerinin fonksiyonel bütünlüğünü korur. Örnekler: SGLT2 inhibitörleri, bazı ACE inhibitörleri ve ARB'ler.

Nöroprotektif bileşikler: Nöroprotektif ajanlar, merkezi ve periferik sinir sistemlerinde serbest radikal oluşumunu azaltarak hücre hasarı önler. Antioksidan özelliklere sahip bazı farmakolojik bileşikler, mitokondriyal disfonksiyonu düzenler ve apoptozu önleyerek nöronal sağkalımı destekler. Bu yaklaşım Alzheimer, Parkinson ve diğer nörodejeneratif hastalıklarda önemlidir. Örnekler: Koenzim Q10, edaravone, bazı flavonoidler.

Farmakolojik yaklaşımlar genellikle tedavi stratejileriyle birleştirildiğinde daha etkilidir; yaşam tarzı değişiklikleri, diyet düzenlemeleri ve egzersizle birlikte kullanıldığında oksidatif stresi önemli ölçüde azaltabilirler.

5.4. Klinik İzleme ve Değerlendirme

Oksidatif stresi ve ilgili patofizyolojik değişiklikleri izlemek, tedavi etkinliğinin değerlendirilmesi ve komplikasyonların erken tespiti için kritik öneme sahiptir. Klinik izleme çok boyutlu ve düzenli olmalıdır:

Oksidatif stres biyobelirteçleri: Serum veya plazmada ölçülen toplam antioksidan kapasitesi (TAC), toplam oksidan seviyeleri (TOS), malondialdehit (MDA) ve süperoksit dismutaz (SOD) gibi parametreler, hücresel düzeyde oksidatif dengenin izlenmesine olanak tanır. Bu biyobelirteçler, tedaviye yanıtın objektif göstergeleri olarak kullanılabilir.

Biyokimyasal profil: Böbrek ve karaciğer fonksiyonlarını yansıtan temel laboratuvar testleri düzenli olarak izlenmelidir. Örnekler:

Üre ve kreatinin: Böbrek fonksiyonunun değerlendirilmesi.

ALT ve AST: Karaciğer enzimleri, hepatik fonksiyon ve olası hepatotoksisite için önemlidir.

Kalp fonksiyonu: Kardiyovasküler sistem yükünü ve oksidatif hasarı izlemek için ekokardiyografi, EKG, kan basıncı ölçümleri ve gerekirse kardiyak biyobelirteçler (BNP, troponin) kullanılabilir. Bu, hem subklinik hem de klinik kardiyak disfonksiyonun erken teşhisini sağlar.

Davranışsal ve bilişsel fonksiyon değerlendirmeleri: Özellikle nörodejenerasyon riski taşıyan veya nöroprotektif tedavi gören hastalarda, bilişsel fonksiyon testleri (MMSE, MoCA gibi) ve davranışsal gözlemler düzenli aralıklarla yapılmalıdır. Bu değerlendirmeler, tedavi etkinliği ve yaşam kalitesi açısından önemlidir.

Klinik takip, multidisipliner bir yaklaşımla yapılmalıdır; hekimler, diyetisyenler, fizyoterapistler ve psikologlar gibi farklı disiplinlerden uzmanlar arasındaki işbirliği, hasta yönetiminin etkinliğini artırır.

6. Gelecek Perspektifleri

Veteriner yaşlanma biyolojisi alanındaki araştırmalar giderek genetik ve moleküler mekanizmalara odaklanmaktadır. Özellikle genetik biyobelirteçler, epigenetik yaşlanma saatleri ve mitokondriyal terapiler, yaşlanma sürecini izlemek ve müdahale etmek için umut vadeden araçlar olarak ortaya çıkmaktadır.

Gelecek perspektifleri arasında, hayvan modellerinde yaşlanma karşıtı farmakolojik stratejilerin uygulanabilirliği ön plana çıkmaktadır. Örneğin:

Metformin: Hücresel enerji metabolizmasını düzenleyerek oksidatif stresi ve iltihabı azaltma potansiyeline sahiptir.

Rapamisin: mTOR yollarını hedefleyerek hücresel büyüme ve yaşlanma süreçlerini modüle eder.

Senolitik ajanlar: Yaşlanmış hücreleri seçici olarak temizleyerek doku fonksiyonunu iyileştirme potansiyeline sahiptirler.

Bu stratejilerin hayvan modellerinde uygulanabilirliği, sadece yaşlanma süreçlerini yavaşlatmak için değil, aynı zamanda kronik hastalıkları önlemek ve yaşam kalitesini iyileştirmek için de önemli bilgiler sağlayacaktır. Gelecekteki araştırmaların, veteriner kliniklerinde yaşlanma karşıtı müdahalelerin güvenli ve etkili bir şekilde uygulanmasına katkıda bulunması beklenmektedir (Kaeberlein, 2021).

7. Sonuç

Evcil hayvanlarda yaşlanma süreci, hücresel ve moleküler düzeylerde çok faktörlü mekanizmaların geniş bir yelpazesi tarafından şekillendirilir; bunlar arasında oksidatif stres merkezi ve iyi belgelenmiş bir rol oynar. Hayvanlar yaşlandıkça, reaktif oksijen türlerinin (ROS) birikimi, mitokondriyal disfonksiyon, kronik inflamasyon ve bozulmuş antioksidan savunmalar, fonksiyonel gerilemeye ve hastalıklara karşı artan duyarlılığa topluca katkıda bulunur (López-Otín vd., 2013; Sun vd., 2016). Bu değişiklikler hücresel homeostazı bozar ve doku hasarını hızlandırır; sonuç olarak yaşlı köpek ve kedilerde kardiyovasküler bozukluklar, nörodejeneratif durumlar, metabolik disfonksiyon ve azalmış bağışıklık yeteneği olarak kendini gösterir (Dorsey & Le Boedec, 2023).

Oksidatif stresin patofizyolojisini anlamak, erken teşhis, önleme ve hedeflenmiş tedavi stratejilerinin geliştirilmesi için hayati önem taşımaktadır. Son çalışmalar, yaşlı hayvanlarda oksidatif yükü değerlendirmede ve hastalık ilerlemesini izlemede toplam antioksidan kapasitesi (TAC), malondialdehit (MDA), antioksidan enzim aktivite testleri ve 8-OHdG gibi biyobelirteçlerin değerini vurgulamaktadır (Head, 2011; Zicker, 2021). Bu biyobelirteçlerin sistematik kullanımı, klinisyenlerin subklinik oksidatif hasarı belirlemelerine ve geri dönüşümsüz doku hasarı oluşmadan önce müdahaleler uygulamalarına olanak tanır.

E vitamini, C vitamini, omega-3 yağ asitleri, koenzim Q10, polifenoller ve mitokondriye özgü antioksidanlar dahil olmak üzere hedeflenmiş antioksidan tedavileri, yaşlanan evcil hayvanlarda oksidatif stresi azaltmada ve metabolik ve bilişsel sonuçları iyileştirmede umut verici sonuçlar göstermiştir (Zicker, 2021; Packer vd., 2020). Bu terapötik stratejiler, uygun şekilde kullanıldığında, yaşlı evcil hayvanlarda sağlık ömrünü ve yaşam kalitesini önemli ölçüde artırabilir. Farmakolojik desteğe ek olarak, çok disiplinli bir yaklaşım şiddetle tavsiye edilir. Bu, hayvanın

metabolik taleplerine, kalori ihtiyaçlarına ve yaşam evresine göre uyarlanmış kanıta dayalı diyet düzenlemelerini; kan tahlilleri, oksidatif stres panelleri ve organ fonksiyonu değerlendirmelerini içeren düzenli klinik izlemeyi; ve kilo yönetimi, diş bakımı ve fiziksel aktivite programları gibi önleyici sağlık stratejilerini içerir (Laflamme, 2005; Freeman vd., 2020).Bu müdahalelerin birleştirilmesi, yaşlanmanın olumsuz fizyolojik etkilerini hafifletmeye ve oksidatif hasarın ilerlemesini yavaşlatmaya yardımcı olur.

Sonuç olarak, oksidatif stresi kontrol altına almak ve kapsamlı yaşlanma karşıtı stratejiler uygulamak, evcil hayvanların genel sağlığını optimize etmek, yaşa bağlı hastalıkları önlemek ve yaşam kalitesini iyileştirmek için önemli bir potansiyel taşımaktadır.Biyobelirteç teknolojisi, beslenme bilimi ve geriatrik veteriner hekimliğindeki gelişmeler, klinisyenlerin yaşlanan evcil hayvanları bütüncül ve bireyselleştirilmiş bir şekilde değerlendirme, yönetme ve destekleme yeteneklerini geliştirmeye devam etmektedir.

Kaynakça

Blackburn, E. H. (1991). Telomeres and telomerase. *Nature*, 350, 569–573.

Campisi, J. (2013). Cellular senescence and aging. *Annual Review of Physiology*, 75, 685–705. <https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-030212-183653>

Del Rio, D., et al. (2005). Measurement of lipid peroxidation. *Clinica Chimica Acta*, 353, 1–28.

Dorsey, R. J., & Le Boedec, K. (2023). *Inflammaging in dogs and cats: mechanisms and clinical implications*. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 53(1), 45–60.

Finch, N. C., & Syme, H. M. (2015). Chronic kidney disease and oxidative stress in cats. *Journal of Feline Medicine and Surgery*, 17(2), 135–147.

Freeman, L. M. (2010). Oxidative stress and heart disease in dogs. *Journal of Veterinary Cardiology*, 12, S136–S142.

Freeman, L. M., et al. (2016). Nutritional modulation of aging and chronic disease in dogs and cats. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 46, 769–779.

Freeman, L. M., Lachaud, M. P., Matthews, S., & Rhodes, L. (2020). *Nutrition for aging dogs and cats*. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 257(9), 964–972.

Fick, S. E., et al. (2012). *Telomere length and aging in dogs*. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 67(4), 403–410.

Halliwell, B. (1995). Free radicals and antioxidants: concepts and applications. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 39, 231–235.

Head, E. (2011). Oxidative damage and cognitive dysfunction in aging dogs. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry*, 35, 753–759.

Laflamme, D. P. (2005). *Nutrition for aging cats and dogs and the importance of body condition*. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 35(3), 713–742.

López-Otín, C., Blasco, M. A., Partridge, L., Serrano, M., & Kroemer, G. (2013). The hallmarks of aging. *Cell*, 153(6), 1194–1217. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2013.05.039>

Packer, L., Cadenas, E., & Davies, K. J. A. (2020). *Antioxidants and redox regulation in aging and disease*. *Free Radical Biology and Medicine*, 152, 1–2.

Sun, N., Youle, R. J., & Finkel, T. (2016). *The mitochondrial basis of aging*. *Cell*, 166(4), 110–126.

Wang, T., et al. (2020). Epigenetic aging in domestic cats. *Scientific Reports*, 10, 702.

Zicker, S. C. (2021). *Cognitive and metabolic benefits of antioxidant supplementation in aging dogs and cats*. *Veterinary Journal*, 274, 105722.

Zimin, A. V., et al. (2020). *Epigenetic aging and DNA methylation patterns in domestic dogs*. *GeroScience*, 42, 1781–1793.

BALIK DAVRANIŞLARI: FARKLI BESLENME STRATEJİLERİ

**SAMİ KAYA²
OKAN YAZICIOĞLU³**

Giriş

Etoloji (davranış bilimi), hayvanlarda ortaya çıkan davranış kalıplarını ve bu davranışların ortaya çıkış nedenleri ile işlevlerini inceleyen bir bilim dalıdır. Bu alan, hayvanların birbirleriyle ve çevreleriyle nasıl etkileştiklerini ve bu davranışların zaman içinde nasıl evrimleştiğini anlamaya odaklanır (Lao, 2025). Davranış biliminde kullanılan temel kavramlar, doğrudan gözlem yoluyla elde edilen davranış verilerine dayanmaktadır. Merak, öğrenme ve oyun gibi gündelik hayatta sıkça kullanılan kavramlar ise yalnızca bilimsel tanımlarla sınırlı değildir; aynı zamanda canlıların çevresel ve biyolojik gereksinimlerine yanıt veren süreçler olarak ele alınmaktadır (Kızıroğlu,1998; Engin ve ark., 2008).

² Öğrenci, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Ana Bilimdalı, Orcid: 0009-0003-7308-0443

³ Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Orcid: 0000-0003-4302-2181 (lütfeñ link

Canlıları konu alan bilim dalları arasında, gizli kalmış, anlaşılması ve yorumlanması en güç alanlardan biri davranış bilimidir. Davranış, hayvanların değişik çevre şartlarına ve özellikle bu şartlarda oluşan çoğunlukla ani değişimlere uyum sağlamak üzere gösterdikleri sinir ve kas faaliyetlerinin eşgüdümlü bir dizisi ve anlamlı hareketleridir. Günümüzde sülfür bakterilerinden fitoplankton ve zooplanktona, sürüngenlerden, derisidikenlilere, balıklardan, memelilere yani tek hücreli canlılardan çok hücrelilere kadar birçok hayvan ve bitkinin beslenme, üreme, korunma, saldırma, sahiplenme ve yaşam boyunca sergilenen birçok aktivite türden türe büyük farklılıklar göstermektedir.

Davranışın bilimsel olarak değerlendirilebilmesi için aşağıdaki aşamaların dikkate alınması gerekmektedir:

- Çevresel koşullardaki değişimlerin belirlenmesi ve bu değişimlerin organizma üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi,
- Davranışta farklılaşmaya neden olan yapısal ve fizyolojik özelliklerin ayrıntılı biçimde incelenmesi,
- Bireysel ve sosyal düzeyde, organizmanın değişen çevresel koşullara ve içsel özelliklerine verdiği tepkilerin gözlemlenmesi,
- Ortaya çıkan davranışsal yanıtların sonuçlarının çok yönlü ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir (Ünsal, 2002).

Davranış olgusuna yönelik ilk fikirler, eski çağ düşünürlerinin canlılara ilişkin gözlemleriyle ortaya çıkmıştır. İnsanlık tarihi boyunca, özellikle erken dönemlerde besin elde etme amacıyla yürütülen avcılık faaliyetleri, hayvanların hareket ve tepkilerinin dikkatle izlenmesini zorunlu kılmış; bu gözlemler zamanla uygulamaya dayalı bir bilgi birikimine dönüşmüştür. Daha

sonraki dönemlerde hayvanların evcilleştirilmesi süreciyle birlikte, insan, davranışları tanıma ve yönlendirme konusunda daha sistemli bir yaklaşım geliştirmiştir. Davranışın bilimsel temelde ele alınması ise orta çağ sonrasında ivme kazanmış; 17. yüzyılda artan gözlemsel çalışmalar, 19. yüzyılda davranış biliminin kuramsal altyapısının oluşmasına zemin hazırlamıştır. Etoloji, bir bilim alanı olarak özellikle 20. yüzyılın ortalarında önem kazanmıştır. Ancak hayvan davranışlarının bilimsel yöntemlerle ele alınmasına yönelik ilk sistematik yaklaşımların, 19. yüzyılda ortaya çıktığı bilinmektedir (Savaş ve Yurtman, 2008).

Ayrıca 20. yüzyıldan itibaren davranış biliminde deneysel çalışmaların önem kazandığı görülmektedir. Davranış bilimi ile ilgili araştırmalar incelendiğinde, Karl Von Frich, Konrad Lorenz, Ivan Petrovich Pavlov ve Nikolaas Tinberger gibi isimler bu alanda ön plana çıkmışlardır. Su canlıları ve balık davranışıyla ilgili araştırmalar özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısında önemini artmıştır. Helmut E. Adler, George W. Barlow, Cristopher J. Barnard, John A. Endler ve Mart R. Gross gibi bilim adamları balık davranışı ile ilgili çalışmaları ile ön planda yer almışlardır (Ünsal, 2002).

ADAPTİF DAVRANIŞLAR

Hayvan davranışları üzerine araştırmalar büyük ölçüde kuşlar ve memelilerle sınırlı kalmıştır. Bu tarihsel önyargı, balık ve sürüngenlerde davranış gelişiminde öğrenmenin çok az veya hiç rol oynamadığı inancına yol açmıştır. Son on yıllardaki araştırmalar bu yanlış algıyı düzeltmeye başlamış ve artık balıkların, memeliler ve diğer karasal hayvanlarla tamamen karşılaştırılabilir etkileyici öğrenme yeteneklerine sahip zengin ve karmaşık bir davranış yelpazesi sergilediği kabul edilmektedir (Brown ve ark., 2006). Balık davranışları 1990'lı yıllara kadar adaptif davranışlar ile açıklanmaya çalışılmıştır. Sonraları modern anlamda öğretilmeye başlanmıştır. Bazı araştırmacılar her davranışı genel çevreye ve

gruba uyma özellikleri ile düşünüp adaptif davranış olarak açıklamaya çalışmışlardır. Balıklar, yaşadıkları çevresel koşullara uyum sağlayabilmek amacıyla çeşitli adaptif davranışlar geliştirmiştir. Bu davranışlar, bireyin hayatta kalma ve üreme başarısını artırmaya yönelik olup doğal seçim sürecinin bir sonucudur. Adaptif davranışlar; beslenme, kaçınma, üreme, sosyal etkileşimler ve çevresel değişimlere verilen tepkiler gibi çok sayıda davranışsal süreci kapsamaktadır.

Adaptif davranışlar on kategoriye ayrılır.

1. Gözlem ve inceleme
2. Beslenme davranışı
3. Kaçma, saklanma ve sığınak arama
4. Mücadele etme
5. Üreme davranışı
6. Sorumluluk duyma-ihtimam gösterme
7. İlgiye davet
8. Eliminatif davranış
9. Birlikte taklit
10. Uç (ekstrem) davranışlar

BESLENME DAVRANIŞI

Beslenme davranışları, balıklarda adaptif davranışların en belirgin örneklerinden biridir. Farklı türler, bulundukları habitatın sunduğu besin kaynaklarına bağlı olarak avlanma stratejileri geliştirmiştir. Örneğin, bentik balıklar dipte yaşayan omurgasızları tüketmeye yönelik davranışlar sergilerken, pelajik türler sürü halinde avlanarak plankton veya küçük balıkları hedef alır. Bu davranışsal

farklılıklar, enerji verimliliğini artırarak bireyin yaşama şansını yükseltir (Nikolsky, 1963; Helfman ve ark., 2009).

Yırtıcılardan kaçınma davranışı da balıklarda güçlü bir adaptif mekanizmadır. Kamuflaj, sürü oluşturma, ani yön değiştirme ve saklanma davranışları, predasyon riskini azaltan başlıca stratejiler arasında yer alır. Özellikle sürü davranışı, bireysel yakalanma olasılığını düşürerek topluluk halinde hayatta kalma avantajı sağlar (Pitcher ve Parrish, 1993).

Beslenme davranışı, balıkların yiyecek bulma, seçme ve tüketme şeklidir. Balıkların beslenme davranışını anlamak, balıkların beslenme ihtiyaçlarının karşılanması ve optimal büyüme için önemlidir (Pratiwy ve ark., 2023).

Balıklar, doğada eriyik halindeki besleyici maddeler, bitkisel ve hayvansal konaklar dahil olmak üzere, çok çeşitli kaynaklardan besin alırlar.

Besin çeşitlerine göre balıklar üç gruba ayrılır.

Karnivor (Etçil) balıklar: Yalnızca hayvansal besinlerle beslenen grup.

Herbivor (Otçul) balıklar: Yalnızca bitkisel besinlerle beslenen grup.

Omnivor (etçil-otçul) balıklar: Hem hayvansal hem de bitkisel besinlerle beslenen grup.

Balıklar, besinlerinin çeşitliliğine göre de üçe ayrılırlar. Bunlar sırasıyla;

Öyrişag Türler: Çok çeşitli besinlerle beslenen türlerdir.

Stenofag Türler: Belli tip besinlerle beslenen balık türleridir.

Monofag Türler: Tek bir çeşit besinle beslenen türlerdir.

Balıkların besin alış biçimleri çok çeşitlilik gösterir. Balıklar besin alış biçimlerine göre avcılar (predatörler), otlayıcılar, süzücüler, emiciler ve parazitler olmak üzere sınıflandırılırlar.

Avcılar

Avcılar, gözle görülebilecek kadar büyük besinlerle beslenirler. Besinlerin aranıp bulunmasında, görme, duyma, koku ve tat alma, dokunma, yan çizgi ve elektrik duyu organları rol oynar (Ünsal, 2002). Bu grubun üyelerinin tümünde iyi gelişmiş çeneler ile tutucu ve yakalayıcı dişler mevcuttur. Kuvvetli asit salgılayan bir sindirim sistemi bulunmaktadır. Bağırsakları da kendileriyle aynı boydaki herbivor türlere nazaran daha kısadır. Predatörlerin birçoğu örneğin *Pomatomus saltatrix* (L, 1766) (Lüfer) ve derin deniz balıklarının büyük bir kısmı avlarını etkin bir biçimde arar ve avlanır. *Epinephelus sp* gibi avcılar ise avlarının bulundukları yere gelmesini beklerler (Demir, 1998).

Lophiidae familyası ait bireylerde karanlık okyanusun zorlu ortamında avlarını cezbetmeyi sağlayan özelleşmiş, ışık yayan bir yem organı geliştirerek beslenme stratejisi geliştirmişlerdir. Olta benzeri bu aygıt, Latince ‘cezbetmek’ anlamına gelen *Illicio* kelimesinden türetilmiş olan *illicium* olarak adlandırılan ve başın dorsal bölgesinden uzanan, modifiye olmuş bir dorsal yüzgeç dikeninden köken alır. Bu yapının ucunda, Latince’de ‘yem’ anlamına gelen *ēscā* olarak adlandırılan küre biçimli, ışık yayan bir organ bulunur (Isakov, 2022)

Otlayıcılar (Brütörler)

Otçul gruplarda yapılan beslenme morfolojisi ve davranışı incelemeleri, otlama faaliyetinin iki temel biçimde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bunlar kesme ve kazıma olarak tanımlanmaktadır. Acanthuridae ve Siganidae familyalarının üyeleri olan keseci türler, beslenirken alglerin üst kısımlarını uzaklaştırır; bu

da algleri kesilmiş halde tutarak mercan yerleşimini teşvik eder ve makroalglerle geçişi önler. Buna karşılık, Scarinae alt familyasına ait kazıyıcı türler, beslenme sırasında resif alt tabakasının bir kısmını; mikroskobik epifitler ile epilitik ve endolitik fototrof organizmalarla birlikte oyup uzaklaştırır (Robinson ve ark., 2020).

Otlayıcılar, besinlerini lokmalar halinde, organizmaları kimi zaman tek tek, kimi zaman küçük gruplar halinde alırlar. Besinlerin bitkisel olması da şart değildir. Planktonla ve dipte yaşayan organizmalarla beslenen birçok otlayıcı balık vardır. Mercan adalarında yaşayan balıklardan Scaridae ve Chaetodontidae familyalarının üyeleri mercan parçalarını alg parçalarını kopararak otlarlar. Otlamanın en güzel biçimi balıkların birbiri üzerinde otlamasıdır. Buna örnek olarak Schilbeidae gösterilebilir. Bu balıkların besinin büyük bir kısmını birbirlerinin üzerinden kopardıkları pullar oluşturur (Demir,1998).

Süzücüler (Suspansivorlar)

Süzücü türler, besinlerini sudan süzerek alırlar. Bu tip besin alış biçiminde besinler, türlerine göre değil, büyüklüklerine göre seçilir. Süzücülerde görülen başlıca ortak uyarlama, çok sayıda birbirine yakın olarak dizilmiş ince ve uzun solungaç dikenlerinin bulunmasıdır. Clupeidae familyası üyelerinin birçoğu solungaç dikenleriyle süzdükleri ortam suyu içinde bulunan planktonik organizmalarla beslenir. Örneğin ergin bir *Brevoortia tyrannus* (Latrobe, 1802) bireyi solungaç dikenleriyle yaklaşık 5–10 lt su süzer ve böylece kısa bir süre içinde birkaç santimetreküp planktonik organizmayı birden yutabilir (Demir,1998).

Emiciler (Limivorlar)

Besinleri ya da besin içeren maddeleri emerek alma, genellikle besinlerini zeminden alan balıklarda görülür. Buna örnek olarak akvaryum balıklarından çöpçü balığı (*Corydoras reticulatus*),

Acipenseridae ve Catostomidae familyasının üyeleri gösterilebilir. Besinleri bu biçimde alan balıkların bazıları besinlerini içinde buldukları çamurla birlikte yutar iken, diğerleri ise besinleri yutmadan önce yabancı maddelerden ayırırlar. Besinler istenmeyen detritustan yutak bölgesinde ayrılırlar (Demir, 1998; Ünsal, 2002).

Parazitizm

Diğer hayvan gruplarında olduğu gibi balıklar arasında da az rastlanan bir beslenme biçimidir. Balıklar arasında parazitik yaşama en güzel örnekler Cyclostomata'da (yuvarlak ağızlı balıklar) görülür. Örneğin *Petromyzon marinus*, Linnaeus, 1758 genellikle bir balık olan konağın üzerinde bir delik açarak onun kanıyla beslenir. Kemikli balıklarda parazitik yaşama örnek olarak *Ceratias*'ların cüce erkekleri verilebilir. Bu balıkların erkekleri yumurtadan çıktıktan kısa bir süre sonra ağızlarıyla dişilerin vücuduna yapışır ve onların paraziti olarak yaşar.

Fenerbalıklarında (*Lophius piscatorius*) gözlenen seksüel dimorfizm, balıklar arasında uç örneklerden biridir. Erkek bireyler, dişilere kıyasla oldukça küçük olup yaklaşık bir parmak büyüklüğündedir ve çengel benzeri küçük dişlere sahiptir. Erkek birey, bu dişleri kullanarak dişi bireyin vücudunu ısırır ve kendisini ona tutturur. Zamanla erkek bireyin ağız dokusu, dişi bireyin deri dokusuyla kaynaşır ve her iki bireyin dolaşım sistemleri arasında damar bağlantıları oluşur. Bu kaynaşma sonucunda erkek birey, yaşamının geri kalan bölümünü dişi bireyin dolaşım sistemi aracılığıyla sağlanan besinleri kullanan bir parazit olarak sürdürür (Sezer ve Koçak, 2008).

BALIKLARDA GÖRÜLEN FARKLI BESLENME STRATEJİLER

Toxotes jaculator (Pallas, 1767) (Fıskiye Balığı/okçu balığı)

Fıskiye balığı olarak da bilinen okçu balığı, Güneydoğu Asya kıyılarında nehir ağızlarında ve tatlı sularda yaşarlar. Ağız öne doğru uzamış ve yukarı doğru konumludur. Boyları 25 cm kadar olabilen bu tür ülkemiz sularında mevcut değildir (Kuru, 2001). *Toxotes jaculator*'un temel besinini karasal omurgasızlar ile sucul böcekler ile küçük bir kısmını ise diğer mikro omurgasızlar ve balıklar teşkil eder (Pusey ve ark., 2004). Bu balıkların en ilginç özellikleri, doğadaki en iyi nişancılardan biri olmalarıdır. Fıskiye balıkları, suyun dışındaki bir besinine (sinek vb.) %100 isabetle su püskürtür. Bu isabetli püskürtme işlemi aslında fıskiye gibi ağızdaki suyun fışkırtılması şeklinde olur (Ünsal, 2002).

Okçu balıklarının ağız boşluğunun üst kısmında, dilin yerleştiği oluk benzeri bir yapı bulunmaktadır. Bu yapı, suyun dar ve yönlendirilmiş bir akış hâlinde ağızdan dışarı fırlatılmasına olanak sağlar. Balık, su yüzeyinin üzerinde bulunan avına doğru bu oluk boyunca yönlendirilmiş su damlacıkları püskürtür. Su jetinin hedefe isabet etmesi sonucunda böcekler suya düşer ve balık tarafından yakalanır (Helfman ve ark., 2009).

Okçu balığının bu beslenme şekli oldukça hassas ayarlamalarla gerçekleşir. Öncelikle balığın suyun içinden, havada bulunan avının yerini doğru şekilde belirlemesi gerekir. Çünkü ışık yoğunluk farkı olan ortamlar arasından geçiş yaparken açı değiştirir ve göz yanılmasına neden olur. Bu durumda ise okçu balığının da avını gerçekten yerinden daha başka bir noktada görmesi gerekir. Ama buna rağmen balık bu açı sapmasını hesaplar ve ona göre nişan alarak % 100 isabetle avını vurur. Ayrıca incelemeler sonucunda okçu balığının avını vuracağı zaman ileriye doğru yüzerek avının altına gittiği ve nişan alıp su damlalarını fırlatırken hemen hemen

dikey konumda durduğu saptanmıştır. Çünkü kırılma en aza indirilmiştir. Bu nedenle okçu balığı sudan yukarı baktığı için avının bulunduğu noktayı tam olarak görür.

***Labroides dimidiatus* (Valenciennes, 1839) (Temizlikçi Ördek Balığı)**

Balıkların birçoğu dış yüzeylerinden, ağızlarından ve solungaçlarından parazitlerin ve deri parçalarının temizlenmesi ve de koparılıp alınması için temizlikçi balıklara müsamaha gösterirler. Temizlikçi balıklar açık bir şekilde kendilerini belli etme eğilimindedir ve dikkat çekici davranışlar gösterirler. Örnek olarak temizlikçi ördek balığı (*Labroides dimidiatus*) temizleme işlemi yapacağının sinyali olan yukarı aşağı doğru karakteristik yüzme hareketiyle temizleyeceği balıklara yaklaşır. Temizlenecek balıkta temizleyici balıkların (*Labroides dimidiatus*) toplandığı yere giderek, ağzını ve solungaç kapaklarını açmak suretiyle temizleyici balıklara izin verir ve bu balıklara zarar vermezler. Temizlenecek balık çoğunlukla, temizleyicilerin boyutundaki balıkları yiyerek beslenen büyük predatörlerdir. Temizleyici balık çok ender olarak yutulma tehlikesi ile karşı karşıyadır. Temizlenecek balık parazitler ve deri parçaları toplanırken hareketsiz şekilde dururlar. Temizlenen balık hareket etmeye hazır olduğu zaman, ağzını biraz kapatarak içerideki ve vücudunu sallayarak da dışarıdaki temizleyici balığa (*Labroides dimidiatus*) temizleme işini bitirmesini bildirir. Örnek olarak, *Plectorhynchus* türleri ağızlarındaki parazitlerin koparılması için temizlikçi ördek balığı (*Labroides dimidiatus*)'nın bakımına güvenir. Bu iki tür arasında normal predatör- preya (Avcı-av) ilişkisi görülmez (Slater, 1987; Ünsal, 2002).

***Perissodus microlepis* (Pul Yiyen Çiklit)**

Perissodus microlepis, Afrika'nın Tanganyika Gölü'ne özgü bir tür olup lepidofagi olarak adlandırılan beslenme stratejisi

gösterir. Bu türün bireyleri, diğer balık türlerinin pullarını yeme üzerine beslenme özelliği göstermektedir (Takahasi ve ark., 2007).

***Periophthalmus barbarus* (Atlantik çamur balığında)**

Çamur balıkları, tropikal nehir haliçlerindeki gelgitli çamur düzlüklerinde amfibik yaşam tarzı sergilemektedir. Bazı çamur balığı türlerinin zamanlarının %90'ından fazlasını karada geçirdiği bildirilmiştir. Atlantik çamur balığı *Periophthalmus barbarus* kara ortamında beslenmede oldukça yetenekli olduğu ve ağırlıklı olarak bu ortamda beslendiği bilinmektedir. Besinlerini öncelikle su dışında ararlar ve av tespiti esas olarak görme yoluyla gerçekleşir. Karada beslenme, ağız boşluğunda tutulan suyun kullanımıyla daha da kolaylaşır. Çamur balığı önce ağız boşluğunu sıkıştırarak suyu ağzına doğru iter. Bu su daha sonra ağız boşluğunun genişlemesiyle geri emilir. Bunu yaparak, çamur balığı genellikle avını tek bir ağız açma döngüsünde yutak çene bölgesine taşımayı başarır (Michel ve ark., 2016).

***Lophius piscatorius* (Fener Balığı)**

Fener balığı (*Lophius piscatorius*), Lophiidae familyasına ait ilginç bir balık türüdür. Yüzünün önüne sarkan "feneri" ile denizin derinliklerindeki karanlıkta ışık oluşturarak ufak balıkları avlar. Türkiye'de Akdeniz, Ege denizi ve Marmara denizinde bulunur. Ayrıca Atlas Okyanusunda da bulunur. 300–350 metre derinliklerde yaşarlar. Vücudu çok yassıdır, büyük bir kafası ve çok büyük bir ağzı vardır. Ortalama 40–60 cm boyunda olurlar. Sırtında iki dorsal yüzgeci ve dikenleri vardır. Bu dikenlerin birisi diğerlerinden çok daha uzundur ve ağzının önüne kadar sarkar. Küçük balıkları yakalamak için yem olarak modifiye olmuş birinci dorsal dikenini kullanarak avını yakalar (Helfman ve ark., 2009). Bu dikenin ucunda bulunan ve fener balığı ile bir simbiyoz içinde yaşayan bakteriler, ışık üretirler. Fener Balığının üzerinde bulunan aldatici fener, diğer

balıkların çok uzak mesafelerden ışığı görerek gelmelerine, dolayısıyla avlanmalarına sebep olmaktadır.

Balıklarda gözlenen davranış çeşitliliği ve farklı beslenme stratejileri; morfolojik uyarlanmalar, fizyolojik özellikler ve çevresel koşulların etkileşimiyle şekillenmekte olup, bu stratejiler türlerin trofik konumlarının belirlenmesinde, ekosistem içindeki rollerinin anlaşılmasında ve sucul ekosistemlerin işleyişinin değerlendirilmesinde temel bir öneme sahiptir. Ayrıca balık türlerinde gözlenen farklı beslenme davranışlarının ve stratejilerinin, türlerin yaşadıkları habitatlara uyum süreçlerini yansıttığını ve sucul ekosistemlerdeki enerji akışı ile besin ağlarının yapısının anlaşılmasına önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır.

Kaynakça

Brown, C., Laland, K. & Krause, J., 2006, Fish Cognition and Behavior. Brown, C., Laland, K. & Krause, J. (eds.). Oxford; Ames, Iowa: Blackwell Publishing.

Engin, A. O., Calapoğlu, M., Seven, M. A., & kadir Yörük, A. (2008). Davranışlarımızın genetik ve çevresel boyutları. Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1(2): 37-56.

Helfman, G. S., Collette, B. B., Facey, D. E., & Bowen, B. W. (2009). The diversity of fishes: Biology, evolution, and ecology (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Helfman, G.S., Collette, B.B., Facey, D.E., Bowen, B.W., 2009. The Diversity of Fishes: Biology, Evolution and Ecology. Blackwell Publishing, 720 p, Hoboken, USA.

Isakov, N. (2022). Histocompatibility and reproduction: Lessons from the anglerfish. Life, 12(1), 113.

Kızıroğlu, İ., 1998. Genel Biyoloji. Desen Yayınları, 544 s, Ankara

Kuru, M., 2001. Omurgalı Hayvanlar. Palme Yayıncılık, 841 s, Ankara.

Lao, Z. 2025. Ethology: The Study of Animal Behaviour. International Journal of Pure and Applied Zoolog, 13(1): 1-2.

Michel KB, Aerts P, Van Wassenbergh S. Environment-dependent prey capture in the Atlantic mudskipper (*Periophthalmus barbarus*). Biol Open. 2016 Nov 15;5(11):1735-1742.

Nikolsky, G. V. (1963). The ecology of fishes. Academic Press.

Pitcher, T. J., & Parrish, J. K. (1993). Functions of shoaling behaviour in teleosts. In T. J. Pitcher (Ed.), *Behaviour of teleost fishes* (pp. 363–439). Chapman & Hall.

Pratiwy, F. M., Haetami, K., & Sinaga, J. A. (2023). Exploring fish eating habits: factors influencing feeding behavior in tropical fish. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 23(4), 1-7.

Pusey, B., Kennard, M., Arthington, A., 2004. *Freshwater Fishes of North-Eastern Australia*. Csiro Publishing, 684 p, Australia.

Robinson, J. P., McDevitt-Irwin, J. M., Dajka, J. C., Hadj-Hammou, J., Howlett, S., Graba-Landry, A., Hoey, A.S., Nash, K. L., Wilson S.K., Graham, N. A. 2020. Habitat and fishing control grazing potential oncoral reefs. *Funct Ecol.*, 34:240–25

Savaş, T., Yurtman, İ. Y., 2008. Hayvan Davranış Bilimi ve Zootekni: Tanım ve İzleme. *Hayvansal Üretim*, 49 (2), 36–42.

Sezer, M., Koçak, A., 2008. Seksüel İki-Tiplilik (Dimorphism). *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 1 (2), 27–36.

Takahashi R, Watanabe K, Nishida M, Hori M. 2007. Evolution of feeding specialization in Tanganyikan scale-eating cichlids: a molecular phylogenetic approach. *BMC Evol Biol*. 18;7:195.

Ünsal, S., 2002. Balık Davranışları. Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yayın No:70, 174 s, İzmir.

BALIKLARDA AĞIR METAL BİRİKİMİ VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ: ÇEVRESEL KAYNAKLAR, BİRİKİM MEKANİZMALARI VE GÜNCEL RİSK DEĞERLENDİRMELERİ

**GÜLİNAZ GÜRSOY URTEKİN⁴
RAMAZAN YAZICI⁵**

Giriş

Ağır metaller; doğal süreçler, jeokimyasal döngüler ve insan faaliyetleri neticesinde çevrede yaygın olarak bulunan, biyolojik sistemlerde birikme potansiyeline sahip elementlerdir. Özellikle endüstriyel kirlilik, tarımsal kimyasallar, madencilik faaliyetleri ve evsel atıklar, sucul ekosistemlerdeki metal yükünü önemli ölçüde artırmaktadır (Begum & ark., 2006: 44). Bu nedenle sucul ortamlar, metal birikiminin izlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Balıklar, besin zincirindeki konumları, metabolik aktiviteleri ve yaşam döngüleri boyunca sürekli maruziyet altında olmaları sebebiyle ağır metal kirliliğinin değerlendirilmesinde temel

⁴ Yüksek lisans öğrencisi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Ana Bilim Dalı, Kırşehir, Orcid: 0009-0003-2538-5656

⁵ Doc. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Çiçekdağı Meslek Yüksekokulu, Veterinerlik Bölümü, Orcid: 0000-0003-2274-0707

biyoindikatör gruplar arasında yer alır (Belgemen & Akar, 2004: 41). Balık dokularında biriken metaller, yalnızca balığın fizyolojik süreçlerini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda bu balıkların tüketimi yoluyla insanlar için potansiyel bir sağlık oluşturur (Çalışkan, 2005: 12). Özellikle cıva (Hg), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd) ve arsenik (As) gibi toksik metaller, düşük dozlarda dahi ciddi nörotoksik ve karsinojenik etkiler gösterebilmektedir (ATSDR, 2003: 55).

Balığın insan beslenmesindeki önemi düşünüldüğünde konu daha da kritik hâle gelir. Balık; yüksek kaliteli protein içermesi, omega-3 yağ asitleri bakımından zengin olması ve vitamin-mineral kaynağı olması nedeniyle sağlıklı beslenmede temel bir bileşendir (Köse, 2007: 63). Ancak metal birikimi yüksek olan sulardan elde edilen balıkların tüketimi, özellikle gebeler, çocuklar ve adolesan dönemindeki bireyler açısından çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilir (Çalışkan, 2005: 27).

Türkiye'nin farklı bölgelerinde yapılan çalışmalar, metal düzeylerinin sucul ortamlarda bölgesel olarak değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Örneğin Karaman yöresindeki balık türlerinde Cd, Pb ve Hg düzeylerinin çoğunlukla yasal sınırların altında olduğu, ancak demersal balıklarda As birikimlerinin daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Gümüş & ark., 2024: 130). Benzer şekilde Meriç Deltası'nda yapılan araştırmada 20'den fazla metal analiz edilmiş ve genel popülasyon için kanserojen riskin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu bildirilmiştir (Tokatlı & Ustaoglu, 2021: 8).

Ağır metallerin balıklarda birikimi; suyun kimyasal özellikleri, balığın türü, beslenme şekli, yaş, habitat tercihleri, trofik seviyesi ve metabolik hız gibi birçok faktörden etkilenir (Vernay & ark., 2007: 118). Bu nedenle metal birikiminin mekanizmalarının detaylı olarak anlaşılması ve türler arası farklılıkların değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu derleme çalışmasında amaç;

Ağır metal kavramı ve sucul ortamlardaki kaynaklarını açıklamak,

Balıklarda metal birikim mekanizmalarını literatür doğrultusunda değerlendirmek,

Toksikolojik açıdan önemli metallerin balık ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemek ve

Türkiye’den güncel örnek çalışmaların bulgularını derleyerek risk değerlendirmesi yapmaktır.

BALIKLARIN İNSAN BESLENMESİNDEKİ ÖNEMİ

Balıklar, insan beslenmesinde tarih boyunca önemli bir yer edinmiş, yüksek biyolojik değere sahip proteinleri, esansiyel yağ asitleri, vitamin ve mineralleri nedeniyle günümüzde de sağlıklı beslenme yaklaşımlarının temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Balık etinin kimyasal bileşimi; tür, yaş, beslenme şekli, mevsim ve çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterse de, genel olarak insan vücudu için gerekli pek çok besin bileşenini dengeli biçimde içermektedir (Köse, 2007: 63).

Balıklar, yüksek kaliteli ve kolay sindirilebilir protein içermeleri nedeniyle hayvansal kaynaklar arasında ayrıcalıklı bir konuma sahiptir. İnsan vücudu tarafından sentezlenemeyen esansiyel aminoasitlerin büyük bir kısmı, balık proteinlerinde yoğun biçimde bulunmaktadır. Bu nedenle balık tüketimi, protein ihtiyacının karşılanmasında önemli bir alternatiftir ve vücudun yapısal, hormonal ve metabolik süreçlerinin sürdürülmesi açısından kritik rol oynar (Çalışkan, 2005: 14).

Balık etinin en dikkat çekici özelliklerinden biri, içerdiği çoklu doymamış yağ asitleri, özellikle omega-3 grubundaki EPA (eikosapentaenoik asit) ve DHA (dokosahekzaenoik asit) bileşenleridir. Bu yağ asitleri, kardiyovasküler sistemin korunmasından bilişsel fonksiyonların desteklenmesine kadar geniş

bir yelpazede sağlık etkileri gösterir. Çeşitli klinik alışmalar, EPA ve DHA'nın anti-inflamatuvar özelliklere sahip olduğunu, trigliserid düzeylerini azalttığını, hücre zarının esnekliğini artırdığını ve oksidatif stres üzerinde düzenleyici etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur (Belgemen ve Akar, 2004: 41; Köse, 2007: 66). Bu bağlamda balık tüketimi, modern toplumlarda artış gösteren kardiyometabolik hastalıklar açısından da koruyucu bir işlev üstlenmektedir.

Balıklar ayrıca A, D ve B grubu vitaminleri ile selenyum, iyot, demir ve çinko gibi biyolojik açıdan kritik elementleri de içermektedir (Anderson, 2014: 125). İnsan sağlığı için gerekli olan bu mikrobelerin eksikliği, birçok metabolik bozukluğu beraberinde getirebilmekte; düzenli balık tüketimi ise bu eksikliklerin giderilmesine katkı sunmaktadır. Özellikle D vitamini açısından sınırlı besin seçenekleri düşünüldüğünde balığın beslenmedeki rolü daha da belirginleşmektedir.

Beslenme zerine yapılan antropolojik ve sosyolojik çalışmalar, besin tüketim tercihlerinin yalnızca biyolojik gerekliliklere değil aynı zamanda kültürel, ekonomik ve sosyal yapılarla bağlı olarak şekillendiğini belirtmektedir. Anderson (2014: 125), besin seçimlerinin toplumsal yapılarla yakından ilişkili olduğunu, bireyin kimliğini, sosyal aidiyetlerini ve kültürel pratiklerini yansıttığını vurgular. Bu çerçevede balık, hem besleyici değer hem de kültürel konumu itibarıyla pek çok toplumda merkezi bir besin kaynağı olmayı sürdürmektedir.

Dünya genelinde artan nüfus, sürdürülebilir gıda kaynaklarına olan ihtiyaı da beraberinde getirmiştir. Balık, aynı zamanda sürdürülebilirliği yüksek bir hayvansal protein kaynağı olarak öne çıkar. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus, balıkların yaşadığı sucul ortamların temizliği ve ekosistem sağlığıdır. Çünkü sucul ortamlarda bulunan ağır metaller ve diğer

kirleticiler, doğrudan balık dokularında birikebilmekte ve bu durum besin zinciri yoluyla insan sağlığı üzerinde potansiyel riskler oluşturabilmektedir (ATSDR, 2003: 55). Dolayısıyla balığın beslenmedeki önemi, yalnızca besleyicilik yönüyle değil, aynı zamanda çevresel kaliteyle olan ilişkisi açısından da değerlendirilmelidir.

Balık tüketiminin faydalarının geniş biçimde kabul edilmesine rağmen, balığın hangi koşullarda, hangi türlerden ve ne ölçüde tüketileceği konusu bilimsel temellere dayandırılmalıdır. Aresta & ark. (2015: 72), modern toplumda hızla değişen beslenme alışkanlıklarının dijital kültür, ekonomik koşullar ve yaşam tarzı farklılıklarıyla şekillendiğini belirtmektedir. Bu çerçevede balık, hem sağlık yönünden üstünlüğü hem de erişilebilirliği nedeniyle önemli bir konumda yer almakla birlikte, tüketim davranışları çevresel kalite, ekonomik faktörler ve bilgilendirme düzeyi gibi unsurlardan etkilenmektedir.

Sonuç olarak balık, yüksek besin değerine sahip bir gıda olarak insan sağlığının korunması ve geliştirilmesinde önemli bir role sahiptir. Ancak balığın beslenmedeki bu merkezi konumu, çevresel kontaminasyon risklerinin de göz önünde bulundurulmasını gerektirir. Bu nedenle balık tüketimine yönelik beslenme önerileri, sucul ekosistemlerin durumu ve kirletici düzeyleri ile birlikte değerlendirilmelidir.

AĞIR METAL KAVRAMI VE KAYNAKLARI

“Ağır metal” terimi, kimya, toksikoloji, çevre bilimleri ve biyoloji gibi farklı disiplinlerde çeşitli anlamlarda kullanılan, kesin bir tanımı bulunmayan bir kavramdır. Genellikle yüksek atom ağırlığına sahip, yoğunluğu 5 g/cm³'ten büyük olan ve biyolojik sistemlerde toksik etkiler gösterebilen metaller için kullanılmaktadır (Aközcan, 2009: 13). Bununla birlikte bazı elementler kimyasal sınıflandırma açısından metal olarak kabul edilmese dahi,

toksikolojik özellikleri nedeniyle ağır metal kategorisinde değerlendirilmektedir. Örneğin arsenik ve bor gibi elementler metal olmamakla birlikte, toksik etkileri nedeniyle çevresel ve biyolojik çalışmalarda çoğu zaman ağır metal sınıfına dahil edilmektedir (Tezcan & Tezcan, 2007: 88).

Ağır metaller çevrede doğrudan bulunabildikleri gibi, insan faaliyetleri sonucunda da su, toprak ve havaya yayılabilmektedir. Doğal kaynaklar arasında volkanik patlamalar, kayaçların ayrışması ve yerkabuğu hareketleri sayılırken; antropojenik kaynaklar arasında endüstriyel faaliyetler, metal ergitme işlemleri, madencilik, kimya sanayii, tarımsal gübre ve pestisit kullanımı, taşımacılık ve evsel atıklar yer almaktadır (Begum & ark., 2006: 44; ATSDR, 2003: 22). Bu nedenle günümüzde sucul ekosistemlerde ağır metal birikimi çoğunlukla insan kaynaklı kirlilikle ilişkilendirilmektedir.

Ağır metallerin en önemli özelliklerinden biri, doğada biyolojik olarak parçalanmamalarıdır. Bu özellikleri nedeniyle çevrede kalıcıdır ve canlı dokularında biyobirikim (bioaccumulation) ve biyobüyütme (biomagnification) süreçleri yoluyla trofik düzeyler boyunca taşınabilirler (Cervantes & ark., 2001: 71). Söz konusu süreç, özellikle balıklar gibi sucul organizmalar açısından büyük bir önem taşır çünkü metal maruziyeti su, sediman ve besin zinciri aracılığıyla eşzamanlı olarak gerçekleşebilmektedir.

Ağır metal kirliliğinin sucul ortamlar açısından kritik olmasının temel sebeplerinden biri, bu ortamlarda metal iyonlarının çözünmüş veya partikül bağlı hâlde uzun süre stabil kalabilmesidir. Sudan sedimana, sedimandan tekrar suya geçiş yapabilen metaller, ekosistem içinde dinamik bir dolaşım sergiler. Bu nedenle sediman, çoğu zaman ağır metal kirliliğinin bir “rezervuarı” olarak kabul edilmekte ve sediman kalitesi sucul ortam sağlığının önemli

göstergelerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Aközcan, 2009: 15).

Doğal Kaynaklar

Doğal jeokimyasal süreçler ağır metal salınımının temel doğal kaynaklarını oluşturur. Volkanik faaliyetler, hidrotermal yanardağ çıkışları, kayaçların çözünmesi ve erozyon süreçleri metal iyonlarının sulara karışmasına neden olur (Vernay & ark., 2007: 118). Örneğin krom (Cr), yer kabuğunda doğal olarak bol bulunan elementlerden biridir ve çoğu serpantin kayaçta yüksek konsantrasyonlarda bulunur (Cervantes & ark., 2001: 71). Aynı şekilde demir (Fe), mangan (Mn) ve çinko (Zn) da çevrede önemli doğal yoğunluklara sahip elementlerdir.

Antropojenik Kaynaklar

Günümüzde ağır metal kirliliğinin en önemli bölümü insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Antropojenik kaynaklar çok çeşitlidir:

Endüstriyel Faaliyetler

Metal kaplama, galvanizleme, rafineri, tekstil, boya, pil üretimi, plastik ve petrol sanayii ağır metal salınımının en yoğun olduğu sektörlerdendir (ATSDR, 2003: 33). Özellikle krom kaplama tesisleri Cr(VI), batarya sanayi Cd ve Pb açısından yüksek risk oluşturur.

Madencilik ve Metal Eritme

Cevherlerin çıkarılması, kırılması, yıkanması ve eritilmesi süreçlerinde ağır metal yükü sucul ortamlara taşınabilir. Kurşun ve kadmiyum madenciliği yapılan bölgelerde sucul yaşam üzerinde belirgin etkiler rapor edilmiştir (Başaran, 2010: 41).

Tarımsal Faaliyetler

Tarımsal gübre ve pestisitlerde metallerin bileşen olarak bulunması nedeniyle tarımsal drenaj sularının metal kirliliğine katkısı büyüktür. Özellikle fosfatlı gübrelerin Cd içeriği konusunda önemli çalışmalar mevcuttur (Köse, 2007: 70).

Şehirleşme ve Ulaşım Kaynakları

Atık su arıtma tesislerinden deşarj edilen sular, motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlar ve kentsel katı atıklar metal yükünü artırır. Özellikle Pb, eski dönemlerde benzine eklenen tetraetil kurşun nedeniyle geniş bir yayılım göstermiştir.

Evsel ve Belediye Atıkları

Piller, boya atıkları, elektronik atıklar ve deterjanlar metal içeriği nedeniyle çevreye önemli miktarda yük bırakabilir (Begum & ark., 2006: 44).

Sucul Ortamlara Ulaşım Mekanizmaları

Ağır metallerin sulara ulaşma yolları üç temel süreç üzerinden gerçekleşmektedir:

1. **Atmosferik çökme:** sanayi bacaları ve araç egzozlarından atmosfere yayılan metal partikülleri yağmur, kar veya kuru çökme yoluyla sulara taşınır.
2. **Yüzey akışı:** tarım alanları ve şehirleşmiş bölgelerdeki yüzey suları metallerin akarsulara ve göllere taşınmasına neden olur.
3. **Sediman-su etkileşimi:** metal iyonlarının sedimanda tutulması ve fizikokimyasal koşullara bağlı olarak tekrar su kolonuna geçmesi (Aközcan, 2009: 15).

Bu süreçlerin tamamı dinamik olup sucul ekosistemlerin kimyasal yapısını ve balık topluluklarının metal maruziyet düzeylerini doğrudan etkiler.

Ağır Metal Konsantrasyonlarını Belirleyen Çevresel Etmenler

Ağır metalin sucul ortamda bulunma şekli ve toksisitesi; pH, sıcaklık, çözülmüş oksijen, sertlik, tuzluluk, organik madde miktarı ve redoks potansiyeli gibi değişkenlere bağlıdır (Begum vd., 2006: 45). Örneğin Cr(VI) formu Cr(III)'e göre çok daha toksik ve hareketlidir; bu dönüşüm çoğunlukla pH ve redoks koşullarına bağlı olarak gerçekleşir (Tezcan ve Tezcan, 2007: 89). Aynı şekilde Cd ve Pb gibi metaller organik madde ile kompleks oluşturarak çökelme eğilimi gösterebilir, ancak çözülmüş hâlde bulunduklarında biyoyararlanabilirlikleri artar.

Bu nedenle ağır metal kirliliğinin değerlendirilmesi yalnızca toplam metal miktarı üzerinden değil, metalin kimyasal formu ve biyoyararlanabilirliği üzerinden yapılmalıdır.

BALIKLARDA AĞIR METAL BİRİKİMİ

Balıklarda ağır metal birikimi, sucul ekosistemlerdeki kirleticilerin trofik seviyelere taşınması açısından kritik bir süreçtir. Ağır metallerin biyolojik olarak parçalanamaması ve dokularda birikme eğiliminde olması nedeniyle, sucul canlılarda uzun süreli toksik etkiler ortaya çıkabilmektedir (Begum & ark., 2006: 44). Balıklarda metal birikimi; metalin çevredeki yoğunluğu, kimyasal formu, suyun fizikokimyasal özellikleri, balığın türü, yaşı, beslenme biçimi ve fizyolojik durumu gibi bir dizi faktöre bağlı olarak değişiklik gösterir (Vernay & ark., 2007: 118).

Biyobirikim (Bioaccumulation) ve Biyobüyütme (Biomagnification)

Biyobirikim, organizmaların metali doğrudan yaşadıkları ortamdan veya besin yoluyla bünyelerine alması sonucunda dokularda metal birikmesidir. Balıklar ağır metalleri üç ana yoldan alırlar:

Solungaç epiteli,

Sindirim sistemi,

Deri yüzeyi (Cervantes & ark., 2001: 71).

Solungaçlar geniş yüzey alanına sahip oldukları için özellikle çözünmüş metallerin girişinde başlıca rol oynamaktadır. Suyun iyon dengesinin sağlanması için sürekli aktif transport gerçekleştiğinden, metaller çoğu zaman iyonlarla benzer yolları kullanarak solungaç epiteline bağlanmaktadır (Belgemen & Akar, 2004: 41). Örneğin Cd, Ca^{2+} taşıyıcılarını kullanarak hücre içine taşınabilir.

Biyobüyütme ise metalin besin zinciri boyunca trofik seviyelere aktarılmasıdır. Bu süreçte yüksek trofik düzeyde yer alan balık türlerinde metal konsantrasyonları alt düzeydeki türlere göre daha fazla olabilir. Özellikle Hg ve Pb için biyobüyütme etkisi güçlüdür, bu nedenle predatör balıklarda daha yüksek konsantrasyonlar görülür (ATSDR, 2003: 55).

Balıklarda Metal Alım Yolları

a) Solungaçlar Aracılığıyla Alım

Solungaç epiteli, sucul ortamla doğrudan temas hâlinde olduğu için metal alımında en kritik organlardan biridir. Metal iyonları pasif difüzyon, kolaylaştırılmış difüzyon veya aktif transport mekanizmalarıyla hücre içine geçebilir. Solungaç epitelinin ince ve geçirgen yapısı, iyon değişim süreçlerindeki

sürekli aktivite ile birleştğinde metal girişini artırabilmektedir (Tezcan & Tezcan, 2007: 89).

b) Besin Yoluyla Alım

Metallerin en önemli giriş yollarından biri de besin zinciridir. Balıkların beslendiği planktonlar, omurgasızlar veya küçük balıkların dokularında biriken metaller, av-yırtıcı etkileşimi ile trofik seviyede yukarı doğru taşınır (Köse, 2007: 70). Besin yoluyla alınan metallerin biyoyararlanabilirliği, metallere bağlı proteinler, sitokrom enzim sistemleri ve karaciğerdeki detoksifikasyon mekanizmaları ile ilişkilidir.

c) Deri ve Yüzey Dokuları Aracılığıyla Alım

Balık derisi normalde koruyucu bir bariyerdir; ancak aşırı kirli ortamlarda metal iyonlarının mukus tabakasıyla bağlanarak dokulara geçişi mümkündür (Aközcan, 2009: 15). Yine de deriden alım, solungaç ve besin yoluyla alıma kıyasla ikincil bir süreçtir.

Fizyolojik ve Türsel Farklılıkların Etkisi

Her balık türünün metal birikim kapasitesi farklıdır. Bu farklılıklar; metabolizma hızı, trofik düzey, yüzme aktivitesi, solungaç yapısı, yağ dokusu miktarı ve karaciğerin detoksifikasyon kapasitesi gibi biyolojik özelliklerle ilişkilidir (Begum & ark., 2006: 45).

- Demersal türler, (dipte yaşayan balıklar), sedimanla daha fazla temas ettikleri için özellikle As ve Pb gibi sediman kaynaklı metalleri daha yüksek düzeyde biriktirebilirler. Karaman yöresindeki çalışmada demersal türlerde As birikiminin yüksek olması bu durumun örneklerinden biridir (Tokatlı & Ustaoglu, 2021: 8).
- Pelajik türler, daha çok su kolonu üzerinden metal maruziyetine sahiptir.

- Predatör türlerde, besin zinciri uzunluğu nedeniyle biyobüyütme daha belirgindir.

Ayrıca genç bireyler genellikle daha hızlı büyüme ve metabolizma hızına sahip olduklarından, metal alımı ve doku dağılımı yetişkin bireylerden farklı olabilir. Fakat bu çalışmada yaş kategorileri ayırmayacağımız için derleme genel türsel farklılıklar üzerinden yürütülmüştür.

Suyun Fizikokimyasal Özelliklerinin Etkisi

Ağır metallerin çözünürlüğü ve toksisitesi suyun özelliklerine bağlı olarak değişir:

- **pH:** Düşük pH, metallerin çözünürlüğünü artırır ve toksisiteyi yükseltir.
- **Sertlik (Ca^{2+} ve Mg^{2+}):** Sert su, Cd ve Pb gibi iyonlarla rekabete girerek metal toksisitesini azaltabilir (Tezcan & Tezcan, 2007: 90).
- **Organik Madde:** Metal iyonları organik maddelere bağlanarak çökelme eğilimi gösterebilir.
- **Redoks koşulları:** Cr(VI) okside ve toksik formdadır; Cr(III) ise daha düşük toksisiteye sahiptir (Cervantes & ark., 2001: 72).

Bu nedenle aynı metalin toksik etkisi sucul ekosistemin kimyasal yapısına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir.

Balık Dokularında Metal Dağılımı

Balıklarda metal birikimi genellikle şu organlarda yoğunlaşır:

- **Karaciğer:** Detoksifikasyon merkezi olduğu için en yüksek metal yoğunluğu burada görülür.

- **Böbrek:** Metal–protein komplekslerinin filtrelendiği önemli bir organdır.
- **Solungaç:** Ortama doğrudan maruz kalır.
- **Kas Dokusu:** Genellikle daha düşük metal düzeyine sahip olsa da, tüketim açısından en kritik organdır (Köse, 2007: 72).

Örneğin Zn esansiyel bir elementtir ve karaciğer ile böbreklerde daha yüksek yoğunlukta bulunabilir (Çalışkan, 2005: 22). Buna karşılık Hg, kas dokusuna bağlanma eğilimi nedeniyle predatör türlerde tüketici sağlığı açısından özellikle risklidir.

AĞIR METALLERİN BALIK DOKULARINDA DAĞILIMI

Balıklarda ağır metal birikiminin en önemli yönlerinden biri, metallerin vücutta belirli organ ve dokularda farklı yoğunluklarda depolanmasıdır. Her metalin biyokimyasal özellikleri, çözünürlüğü, bağlanma kapasitesi ve taşınma mekanizmaları birbirinden farklıdır. Bu nedenle ağır metallerin balık dokularında dağılımı türden türe değişiklik göstermekle birlikte genel bazı biyolojik prensipler bütün balıklarda ortaktır (Cervantes & ark., 2001: 71).

Ağır metal dağılımını etkileyen temel faktörler arasında;

- ✓ metalin kimyasal formu,
- ✓ metalin esansiyel veya toksik oluşu,
- ✓ balığın yaş–tür–trofik seviye özellikleri,
- ✓ metabolik aktivite düzeyi,
- ✓ karaciğer ve böbrek fonksiyonları gibi değişkenler yer alır (Begum & ark., 2006: 45).

Aşağıda balıkların en sık etkilenen organ ve dokularında metallerin dağılımı sistematik biçimde açıklanmıştır.

Karaciğer

Karaciğer, ağır metal birikiminin en yoğun görüldüğü organdır. Bunun başlıca nedeni, karaciğerin detoksifikasyon süreçlerinden sorumlu olması ve metallothionein adlı metal bağlayıcı proteinleri yüksek miktarda içermesidir. Metallothioneinler; Cd, Zn, Cu, Hg gibi metallere yüksek afiniteye sahiptir ve metallerin geçici depolanmasını sağlar (Köse, 2007: 72).

Özellikle Cd, Cu ve Zn, karaciğer dokusunda diğer organlara göre daha yüksek konsantrasyonlarda bulunur. Bunun nedeni karaciğerde yürütülen bağlanma, kompleksleşme ve dönüştürme (metabolizma) faaliyetleridir. Örneğin Cd maruziyetinden sonra metallothionein sentezi hızlanır ve metalin büyük kısmı karaciğerde tutulur (Çalışkan, 2005: 22).

Karaciğer, ağır metal toksisitesinin erken göstergesi kabul edildiğinden ekotoksikoloji çalışmalarında en sık incelenen organlardan biridir (Vernay & ark., 2007: 118).

Böbrek

Böbrek, metal-protein komplekslerinin filtrelendiği, iyon regülasyonunun gerçekleştiği ve vücudun mineral dengesinin sağlandığı temel organlardan biridir. Bu nedenle özellikle Cd, Pb ve Hg birikimi açısından kritik bir dokudur (ATSDR, 2003: 58).

Böbrekte metal birikimini artıran mekanizmalar:

- Glomerüler filtrasyon yoluyla metal taşınması,
- Proksimal tübüllerde metal kompleksi geri emilimi,
- Metallothionein-metal bağlanması sonrası renal tutulmadır (Tezcan & Tezcan, 2007: 89).

Literatürde Cd'nin özellikle böbrek dokusunda belirgin birikim gösterdiği, bu nedenle böbreğin Cd toksisitesinin

biyobelirteç organlarından biri olduğu sıkça vurgulanmaktadır (Begum & ark., 2006: 46).

Solungaçlar

Solungaçlar su ile doğrudan temas hâlinde olduğu için metal girişinin ilk gerçekleştiği organlardan biridir. Solungaç epiteli ince, geçirgen yapıda ve iyon değişim süreçlerine sürekli açık olduğundan:

- ✓ çözünmüş metal iyonları solungaçtan kolayca geçebilir,
- ✓ solungaç yüzeyi metal bağlanması için uygun ligandlar taşır,
- ✓ dokunun geniş yüzey alanı alımı artırır (Cervantes & ark., 2001: 71).

Özellikle Pb ve Cd'nin solungaçlarda birikiminin yüksek olduğu çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur. Bu durum, metallerin Ca^{2+} iyonu ile rekabet ederek Ca kanallarına bağlanmasıyla açıklanır (Tezcan & Tezcan, 2007: 90).

Solungaç birikimi; suyun pH'ı, sertliği ve iyonik kompozisyonundan doğrudan etkilenir.

Kas Dokusu

Kas dokusu çoğu zaman ağır metal birikimi açısından görece düşük değerlere sahip olsa da insan tüketimi açısından en kritik dokudur. Balığın yenilen kısmı kas olduğundan, halk sağlığı değerlendirmeleri kas metal düzeyleri üzerinden yapılır (Köse, 2007: 70).

Bazı metallerde kas dokusundaki birikim yüksek olabilir:

- Cıva (Hg) özellikle metilcıva formunda kas dokusuna yüksek bağlanma eğilimindedir.

- Hg, trofik seviyenin yükselmesiyle güçlü biyobüyütme gösterdiği için predatör türlerde risk artmaktadır (ATSDR, 2003: 62).

Metilcıva kas proteinlerine sıkı bağlandığı için pişirme ve işleme yöntemleriyle azaltılması zordur.

Bu nedenle kas dokusundaki Hg seviyeleri, balık tüketimi risk analizlerinde en önemli parametrelerden biridir.

Deri ve Yüzey Dokuları

Deri, mukus tabakası nedeniyle genellikle koruyucu bir bariyer oluşturur. Ancak yüksek kirleticili ortamlarda metal iyonlarının mukusla bağlanarak deriye nüfuz etmesi mümkündür (Aközcan, 2009: 15).

Deri birikimi, solungaç ve karaciğer kadar yoğun değildir fakat özellikle Zn ve Cu gibi esansiyel elementler, deri dokusunda belirli bir oranda bulunabilir.

Kemik ve Sert Dokular

Kurşun (Pb) ve kadmiyum (Cd), kalsiyumla benzer iyonik özellikler taşıdığı için balıkların kemik ve pullarında birikebilir. Bu elementlerin sert dokularda uzun süre depolanması, kronik toksisite açısından önemlidir (Begum & ark., 2006: 47).

Organlar Arası Dağılımın Belirleyicileri

Balıklarda metal dağılımı şu faktörlerle ilişkilidir:

- **Metalin Esansiyel Olup Olmaması:** Zn ve Cu gibi esansiyel metaller düzenleyici mekanizmalara sahiptir; Cd ve Pb’de ise böyle mekanizmalar yoktur.
- **Karaciğer detoksifikasyon kapasitesi:** Metallotionein düzeyi yüksek türlerde karaciğer birikimi daha fazladır.

- **Beslenme Düzeyi ve Trofik Basamak:** Yırtıcı türlerde Hg ve Pb daha yüksek olabilir.
- **Sedimanla Temas:** Dip balıkları As, Pb ve Hg gibi elementleri daha fazla biriktirebilir (Tokatlı & Ustaoglu, 2021: 8).

Metal–organ ilişkilerinin anlaşılması, ekotoksikoloji çalışmalarında risk değerlendirmesi için temel bir adımdır.

AĞIR METAL TÜRLERİ VE TOKSİKOLOJİK ETKİLERİ

Ağır metallerin her biri farklı kimyasal ve biyolojik özelliklere sahiptir; bu nedenle balıklarda birikim düzeyi, toksisite mekanizmaları ve insan sağlığı üzerine etkileri değişiklik gösterir. Aşağıda toksikolojik açıdan önem taşıyan temel ağır metaller sistematik biçimde ele alınmıştır.

Cıva (Hg)

Cıva, çevrede elementel (Hg^0), inorganik (Hg^{2+}) ve organik (özellikle metilcıva, CH_3Hg^+) formlarda bulunur. En toksik formu metil cıva olup, sucul ortamlarda mikroorganizmaların metilasyon süreçleriyle oluşur (ATSDR, 2003: 62). Metilcıva yüksek lipofilisiteye sahip olduğu için balıkların kas dokusunda güçlü biçimde birikir.

Balıklarda Birikim

- Kas dokusunda proteinlere bağlanarak depolanır.
- Predatör (kılıçbalığı, turna, yayın vb.) türlerde biyobüyütme etkisiyle yüksek düzeyde birikir.
- Metilcıva, su kolonundan çok besin yoluyla alınır (Köse, 2007: 72).

Toksik etkiler

- Sinir sistemi üzerinde güçlü nörotoksik etkiler.
- Gelişimsel toksisite (özellikle omurga ve beyin gelişimi).
- Balıklarda davranış bozuklukları, koordinasyon kaybı ve üreme başarısında düşüş (Cervantes & ark., 2001: 72).

İnsan sağlığına etkiler

- Merkezi sinir sistemi hasarı, dikkat bozukluğu, tremor.
- Gebelikte fetal beyin gelişiminde geri dönüşsüz hasarlar.
- Dünya genelinde balık tüketimiyle ilişkili en kritik ağır metal olarak kabul edilir (ATSDR, 2003: 66).

Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum, metal kaplama, batarya üretimi ve fosfatlı gübrelerden kaynaklanan önemli bir çevresel kirleticidir. Doğada Zn ve Pb mineralleriyle birlikte bulunur.

Balıklarda Birikim

- En çok karaciğer ve böbrekte birikir (Çalışkan, 2005: 22).
- Ca^{2+} iyonlarıyla benzer transport mekanizmalarını kullanır.
- Solungaçlarda Ca-kanalı rekabeti nedeniyle yüksek giriş eğilimi vardır (Tezcan & Tezcan, 2007: 90).

Toksik Etkiler

- Böbrek tübüllerinde dejenerasyon.
- Oksidatif stresin artması.
- Karaciğerde metallotionein bağlanması ve detoksifikasyon yükü (Begum & ark., 2006: 46).

İnsan Sağlığına Etkiler

- İskelet sistemi bozuklukları, osteomalasi, renal yetmezlik.
- Kanserojen sınıfındadır (ATSDR, 2003: 74).
- Uzun süreli düşük doz maruziyetlerde dahi etkisi birikebilir.

Kurşun (Pb)

Kurşun, benzin katkı maddeleri, bataryalar, boya sanayii ve metal ergitme tesislerinden kaynaklanan yaygın bir kirleticidir.

Balıklarda Birikim

- Solungaç ve karaciğerde yüksek düzeyde birikir.
- Ca^{2+} kanallarını bloke ederek iyon dengesizliğine yol açar (Tezcan ve Tezcan, 2007: 90).
- Sedimanla temas eden dip balıklarında konsantrasyonları daha yüksek olabilir (Tokatlı & Ustaoglu, 2021: 8).

Toksik Etkiler

- Hematopoetik fonksiyon bozuklukları.
- Balıklarda büyüme geriliği ve davranışsal anomaliler.
- Oksidatif stresin artması (Cervantes & ark., 2001: 74).

İnsan Sağlığına Etkiler

- Nörotoksisite: Özellikle çocuklarda bilişsel gerileme, IQ düşüşü.
- Kardiyovasküler bozukluklar.
- Böbrek fonksiyon kaybı.

- WHO tarafından en tehlikeli çevresel toksinlerden biri olarak sınıflanır.

Arsenik (As)

Arsenik kimyasal olarak metal olmamasına rağmen toksikitesi nedeniyle ağır metal kategorisinde değerlendirilir.

Balıklarda Birikim

- Genellikle organik arsenik formları (arsenobetain) daha baskındır.
- Dip balıklarında sediman temasına bağlı daha yüksek düzeyde bulunabilir.
- Karaman yöresindeki çalışmada demersal balıklarda As düzeylerinin nispeten yüksek olduğu bildirilmiştir (Tokatlı & Ustaoglu, 2021: 8).

Toksik Etkiler

- Oksidatif stres ve DNA hasarı.
- Balıklarda iştah kaybı, büyüme geriliği ve solungaç hasarı.
- Yüksek toksisite çoğunlukla inorganik As türlerinden kaynaklanır (Begum & ark., 2006: 45).

İnsan Sağlığına Etkiler

- Deri lezyonları, kardiyovasküler bozukluklar, nörolojik etkiler.
- Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC) tarafından **Grup 1 kanserojen** olarak sınıflandırılmıştır.

Nikel (Ni)

Nikel; metal alaşımlar, paslanmaz çelik, seramik ve pil üretimi gibi birçok endüstriyel faaliyette yaygın olarak kullanılır.

Balıklarda Birikim

- Özellikle solungaç ve karaciğerde depolanır.
- Suda Ni^{2+} formunda bulunur ve biyoyararlanabilirliği yüksek olabilir (Aközcan, 2009: 15).

Toksik Etkiler

- Solungaç epitelinde irritasyon, mukus artışı.
- İyon regülasyonu üzerinde bozucu etki.
- Yüksek dozlarda mortaliteye yol açabilir.

İnsan Sağlığına Etkiler

- Alerjik reaksiyonlar, dermatit, solunum sistemi problemleri.
- Bazı formlarının kanserojen etkileri olduğu belirtilmiştir.

Çinko (Zn)

Çinko, esansiyel bir elementtir ve çok sayıda enzimatik reaksiyonun düzenlenmesinde görev alır. Ancak aşırı alımı toksik etkilere yol açabilir.

Balıklarda Birikim

- Karaciğer ve böbrek dokularında yüksek düzeyde birikir (Çalışkan, 2005: 22).
- Zn, balıklarda en yüksek düzeyde doğal olarak bulunan iz elementlerden biridir (Belgemen & Akar, 2004: 41).

- Sucul ortamdaki Zn düzeyi balıktaki birikimle doğrudan ilişkilidir.

Toksik Etkiler

- Aşırı Zn maruziyeti solungaç hasarı ve iyon dengesizliği yaratır.
- Oksidatif stres artışı görülebilir.

İnsan Sağlığına Etkiler

- Bağışıklık baskılanması, iştah kaybı, yara iyileşmesinin gecikmesi.
- Eksikliği ise büyüme geriliği ve bağışıklık sorunlarına yol açabilir (Çalışkan, 2005: 25).

Krom (Cr)

- Krom hem doğal hem de antropojenik kaynaklara sahiptir. Tekstil, deri sanayi ve paslanmaz metal üretimi Cr kirliliğinin başlıca nedenleridir.

Balıklarda Birikim

- Cr(III) ve Cr(VI) farklı toksisite profillerine sahiptir.
- Cr(VI) formu daha hareketli ve daha toksiktir (Cervantes & ark., 2001: 71).
- Solungaç ve karaciğerde birikim daha yüksektir (Aközcan, 2009: 13).

Toksik Etkiler

- Oksidatif stres, DNA hasarı, enzim inhibisyonu.
- Solungaçta nekroz ve epitel kalınlaşması (Tezcan & Tezcan, 2007: 91).

İnsan Sağlığına Etkiler

- Cr solunum yolu kanserleriyle ilişkilidir.
- Kronik maruziyet karaciğer ve böbrek hasarına yol açabilir.

BALIK TÜKETİMİ YOLUYLA İNSANA GEÇİŞ

Ağır metaller, sucul ekosistemlerde çeşitli yollarla biriktikten sonra besin zinciri aracılığıyla insanlara taşınabilir. Bu süreç özellikle balık tüketimiyle ilişkilidir, çünkü balıklar metal kirliliğinin biyolojik göstergeleri olmalarının yanı sıra birçok toplumun temel protein kaynakları arasında yer almaktadır (Köse, 2007: 63). Ağır metaller doğrudan çevresel maruziyet, solungaç yoluyla alım ve besin zinciri üzerinden biriktikten sonra balık dokularında depolanır; insanlar ise bu metalleri çoğunlukla **kas dokusu tüketimi** üzerinden alır (Çalışkan, 2005: 22).

Gıda Zinciri Yoluyla Maruziyet

Gıda zinciri yoluyla maruziyetin en önemli mekanizması **biyobüyütme (biomagnification)** sürecidir. Ağır metallerin çoğu biyolojik olarak parçalanamadığı için trofik seviyeler boyunca taşınır ve üst düzey predatörlerde çok daha yüksek konsantrasyonlara ulaşabilir. Özellikle metilcıva (CH_3Hg^+), organik formunun yüksek lipofilitesi nedeniyle plankton → küçük balık → predatör balık → insan zincirinde güçlü birikim gösterir (ATSDR, 2003: 62).

Bu nedenle turna, yayın, kılıçbalığı gibi yırtıcı türlerde Hg düzeyleri çoğu zaman daha yüksektir. Buna karşılık, Cd ve Pb gibi metaller çoğunlukla karaciğer, böbrek ve solungaç gibi organlarda biriktiğinden, kas dokusunda biyobüyütme etkisi daha sınırlıdır (Tezcan & Tezcan, 2007: 91).

Balık Tüketim Sıklığı ve Kaynağın Önemi

İnsanların ağır metal maruziyeti;

- ✓ tükettikleri balığın türüne,
- ✓ yaşadığı sucul ortamın kirlilik düzeyine,
- ✓ balığın trofik düzeyine,
- ✓ tüketim sıklığına

bağlı olarak değişir.

Örneğin Karaman yöresinde yapılan bir çalışmada balıklardaki Cd, Pb ve Hg düzeylerinin büyük oranda yasal sınırların altında olduğu, ancak bazı demersal türlerde As birikiminin yükseldiği belirtilmiştir (Tokatlı & Ustaoglu, 2021: 8). Bu bulgu, balığın habitat tercihinin maruziyet riskini doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Ayrıca su ürünlerinde metal kontaminasyonu yalnızca deniz balıklarıyla sınırlı değildir; göl ve baraj ekosistemleri de tarımsal faaliyetler ve sanayi atıkları nedeniyle önemli maruziyet kaynakları olabilir (Begum & ark., 2006: 44).

Beslenme Biçimi ve Pişirme Yöntemleri

Bazı metaller (örneğin Pb ve Cd) pişirme sırasında yüzey dokularından bir miktar uzaklaştırılabilir; ancak metilciva gibi organik formlar pişirme ile azalmamakta ve kas proteinlerine sıkı bağlanmaktadır (Cervantes & ark., 2001: 72). Bu nedenle Hg maruziyeti, tüketilen balığın pişirme şekline değil **tür ve büyüklüğüne** bağlıdır.

Balığın yağlı veya yağsız olması da metal dağılımını etkileyebilir. Lipofilik bileşikler yağlı dokuda daha fazla tutulsa da metilciva esas olarak **proteine bağlandığından**, balığın yağ oranı önemli bir belirleyici değildir.

İnsanlarda Maruziyet Değerlendirmesi: EDI, THQ, HI ve CR

Son yıllarda ağır metal çalışmaları için uluslararası düzeyde kullanılan çeşitli risk değerlendirme indeksleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında en yaygın olanları:

- EDI (Estimated Daily Intake / Tahmini Günlük Alım):
- Bireyin günlük balık tüketimi üzerinden ne kadar metal aldığı hesaplanır.
- THQ (Target Hazard Quotient / Hedef Tehlike Katsayısı):
- $THQ > 1$ ise sağlık riski artabilir.
- HI (Hazard Index / Tehlike İndeksi):
- Birden fazla metal için toplam risk göstergesidir.
- CR (Cancer Risk / Kanser Riski):

Özellikle arsenik gibi kanserojen metaller için uzun dönem riski değerlendirir.

Örneğin Meriç Deltası'ndaki çalışmada (Tokatlı & Ustaoglu, 2021: 8), balıklarda çok sayıda metal analiz edilmiş ve genel tüketim düzeyinde THQ, HI ve CR değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu rapor edilmiştir. Bu sonuç, bölgedeki balık tüketiminin mevcut metal düzeyleri açısından akut veya kronik bir sağlık riski oluşturmadığını göstermektedir.

Balık Tüketimi Kaynaklı Risklerin Belirleyicileri

Ağır metal geçişi açısından risk düzeyini belirleyen temel değişkenler şunlardır:

- **Tüketilen balığın türü:** Predatör türler daha yüksek risk taşır.

- **Tüketim miktarı ve sıklığı:** Düzenli ve aşırı tüketim daha yüksek maruziyet oluşturabilir.
- **Metal türü:** Hg riski kas üzerinden; Cd ve Pb riski karaciğer ve böbrek tüketimiyle ilişkilidir.
- **Bireysel duyarlılık:** Hamile bireyler ve çocuklar nörotoksik metallere karşı daha hassastır.
- **Coğrafi bölge:** Sanayi bölgelerine yakın alanlarda metal yükü artabilir.

Sonuç olarak balık tüketimi yoluyla metallere maruziyet, çok yönlü çevresel ve biyolojik süreçlerin birleşimiyle şekillenen kompleks bir mekanizmadır.

AĞIR METALLERİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Ağır metaller insan vücuduna başlıca **gıda tüketimi, içme suyu, hava ve toprak** yoluyla geçebilir. Özellikle balık tüketimi, sucul ekosistemlerde biriken metallerin insanlar tarafından alınmasındaki en önemli yollardan biridir (Köse, 2007: 63). Ağır metaller biyolojik olarak parçalanmadıkları için insan dokularında birikme eğilimindedir ve uzun dönemde çeşitli organ sistemlerinde toksik etkiler oluştururlar (ATSDR, 2003: 72).

Aşağıda balıklardan insanlara geçişi en kritik olan ağır metaller, toksisite mekanizmaları ve insan sağlığı üzerine etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Civa (Hg) ve Metilciva (CH_3Hg^+)

Civa maruziyeti özellikle **metilciva** formunda son derece tehlikelidir. Metilciva lipofilik bir bileşik olduğundan hızla kana karışır, kan-beyin bariyerini geçer ve merkezi sinir sisteminde birikir (ATSDR, 2003: 66).

Başlıca Etkileri

- **Nörotoksisite:** Koordinasyon kaybı, denge bozukluğu, kas güçsüzlüğü, konuşma ve görme bozuklukları. Minamata vakası bunun tarihi örneğidir.
- **Fetal gelişim bozuklukları:** Gebelikte düşük doz maruziyet bile beyin gelişiminde geri dönüşü olmayan hasarlara yol açabilir.
- **Kardiyovasküler etkiler:** Kan basıncında artış, kalp ritim bozuklukları.

Riskli Gruplar

- Hamileler
- Bebekler ve çocuklar
- Düzenli yüksek miktarda balık tüketen bireyler

Metilcıva kas dokusuna sıkı bağlandığı için pişirme yöntemleri ile azaltılamaz (Cervantes & ark., 2001: 72).

Kurşun (Pb)

Kurşun, en tehlikeli çevresel toksinlerden biri olarak kabul edilir. Vücutta kalsiyum benzeri davranır ve kemik, kıkırdak, böbrek ve beyin dokusunda uzun süreli birikim gösterir.

Sağlık Etkileri

- **Nörolojik hasar:** Özellikle çocuklarda IQ düşüşü, dikkat eksikliği, öğrenme güçlüğü, davranış bozuklukları (Tezcan & Tezcan, 2007: 91).
- **Hematolojik etkiler:** Hem sentezinin bozulması, anemi.
- **Renal toksisite:** Böbrek fonksiyonlarında azalma.

- **Kardiyovasküler etkiler:** Hipertansiyon ve damar sertliği.

Kurşun maruziyetinde güvenli bir alt sınır olmadığı kabul edilir; düşük maruziyet bile nörolojik etkilere yol açabilir.

Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum, vücutta yavaş atılan ve özellikle böbrek dokusunda biriken bir elementtir.

Başlıca Etkileri

- **Böbrek toksisitesi:** Proksimal tübül hasarı, proteinüri, filtrasyon bozukluğu (Çalışkan, 2005: 22).
- **Kemik hastalıkları:** Osteomalasi, Itai-Itai hastalığı bunun en bilinen örneğidir.
- **Akciğer etkileri:** Kronik soluma maruziyetinde akciğer ödemi ve amfizem.
- **Kanserojenite:** Cd, IARC tarafından **Grup 1 kanserojen** olarak sınıflandırılmıştır.

Gıdalar yoluyla kronik düşük doz maruziyet, dünya genelinde en yaygın Cd maruziyet yoludur.

Arsenik (As)

Arsenik hem doğal hem de antropojenik kaynaklı bir kirleticidir. Balık dokusunda genellikle organik arsenik formları (arsenobetain) bulunur; bunlar nispeten daha düşük toksisiteye sahiptir. Ancak içme suyu ve sediment temaslı balık tüketimi, inorganik arsenik formlarına maruziyete yol açabilir.

Başlıca Etkileri

- **Kanser:** Cilt, akciğer, karaciğer, mesane kanseri ile güçlü ilişki (Begum & ark., 2006: 45).

- **Dermatolojik belirtiler:** Ciltte lekeler, keratoz, hiperpigmentasyon.
- **Kardiyovasküler etkiler:** Ritim bozuklukları, damar sertliği.
- **Nörotoksisite:** Hafıza problemleri ve refleks bozuklukları.
- IARC, arseniki **Grup 1 kanserojen** olarak sınıflandırmaktadır.

Nikel (Ni)

Nikel, daha çok endüstriyel faaliyetlerle ilişkilidir ancak gıdalar yoluyla düşük doz maruziyet yaygındır.

Sağlık Etkileri

- **Alerjik reaksiyonlar:** Kontakt dermatit Ni ile ilişkili en bilinen klinik tablodur (Aközcan, 2009: 15).
- **Solunum yolu etkileri:** Toz formunun solunması akciğer kanseri riskini artırabilir.
- **Genetik hasar:** DNA kırıkları ve hücrel stres yanıtı.

Balıktaki Ni düzeyi genellikle toksik sınırların altındadır; ancak endüstriyel bölgelerde yaşayan türlerde daha yüksek olabilir.

Çinko (Zn)

Çinko esansiyel bir element olmasına rağmen aşırı alımı toksisite oluşturabilir.

Fazlalığının Etkileri

- Bulantı, iştahsızlık, bağışıklık baskılanması.
- Bakır metabolizmasının bozulması (Çalışkan, 2005: 25).

- Uzun süreli yüksek maruziyette gastrointestinal bozukluklar.

Eksikliğinin Etkileri

- Büyüme geriliği
- Bağışıklık fonksiyonlarının zayıflaması
- Koku ve tat alma bozuklukları

Zn'nin toksik etkileri diğer metallere göre daha düşüktür; ancak sanayi bölgelerinde sucul ortamlara verilen Zn yükü balıklar üzerinden insanlara geçebilir.

Krom (Cr)

Krom iki temel formda bulunur:

- **Cr(III):** Esansiyel bir elementtir.
- **Cr(VI):** Yüksek derecede toksik ve kanserojendir.

Cr Maruziyetinin Etkileri

- DNA hasarı, mutasyon ve oksidatif stres (Cervantes & ark., 2001: 71).
- Akciğer kanseri riskinde artış.
- Mide ve bağırsak irritasyonu.
- Karaciğer ve böbrek hasarı.

Balık tüketimi yoluyla Cr maruziyeti çoğu zaman düşük olsa da endüstriyel bölgelerde bu risk artabilir.

İnsan Sağlığı Açısından Genel Değerlendirme

Ağır metallerin insan sağlığı üzerindeki etkileri;

✓ metalin kimyasal formu,

- ✓ maruziyet dozu,
 - ✓ maruziyet süresi,
 - ✓ kişinin yaşı, fizyolojik durumu ve hassasiyeti
- gibi çok sayıda değişkene bağlıdır.

Hamileler, çocuklar ve düşük bağışıklık sistemine sahip bireyler bu metallere karşı daha duyarlıdır. Dünya genelinde ağır metal maruziyetine bağlı sağlık problemlerinin büyük kısmı kronik düşük doz maruziyetlerden kaynaklanmaktadır (ATSDR, 2003: 72).

SONUÇ VE GENEL DEĞERLENDİRME

Ağır metaller, çevrede doğal olarak bulunmalarına karşın günümüzde yoğun endüstriyel ve tarımsal faaliyetler sonucu sucul ekosistemlerde artan birikimleri nedeniyle ekolojik ve halk sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Biyolojik olarak parçalanmamaları, uzun süre çevrede kalmaları ve besin zinciri boyunca taşınmaları, bu elementleri hem sucul organizmalar hem de insanlar için riskli hâle getirmektedir. Bu derleme çalışmasında, ağır metallerin kaynakları, sucul sistemlerdeki dolaşımları, balıklarda birikim mekanizmaları, organlarda dağılımı, toksik etkileri ve balık tüketimi yoluyla insan sağlığına etkileri çok yönlü bir yaklaşımla ele alınmıştır.

Balıklar, ağır metal kirliliğinin doğrudan biyobelirteçleri olmalarının yanı sıra, insanlar için önemli bir protein ve omega-3 kaynağıdır. Ancak ağır metallerin, özellikle civa (Hg), kurşun (Pb), arsenik (As) ve kadmiyum (Cd) gibi toksik elementlerin balıklarda birikmesi, besin zincirinde yukarıya doğru bir taşınım oluşturarak insan sağlığı üzerinde ciddi sonuçlara yol açabilir. Balık türlerinin yaşam alanları, trofik seviyeleri, metabolik hızları ve beslenme özellikleri metal birikim düzeylerinin belirleyicisidir. Özellikle predatör türlerde biyobüyütme nedeniyle daha yüksek metal

seviyeleri görülmesi, balık tüketimi ile ilgili sağlık risklerinin tür bazında değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Balıklarda ağır metal birikimi; solungaç, karaciğer, böbrek ve kas gibi farklı dokularda değişken düzeylerde gerçekleşmektedir. Karaciğer ve böbrek detoksifikasyon süreçleri ve metal bağlayıcı proteinlerin varlığı nedeniyle metallerin en yoğun biriktiği organlardır. Kas dokusu çoğu metal için daha düşük düzeylerde birikim göstermesine rağmen, balığın yenilen kısmı olduğu için halk sağlığı açısından en kritik dokudur. Özellikle metilciva proteine sıkı bağlandığından pişirme yöntemiyle azaltılması mümkün değildir.

İnsan sağlığı açısından değerlendirildiğinde, ağır metaller çeşitli mekanizmalar üzerinden toksik etkilere neden olmaktadır. Civa ve kurşun güçlü nörotoksiktir; arsenik kanserojen sınıfındadır; kadmiyum böbrek ve kemik sistemi üzerinde geri dönüşü zor hasarlar oluşturur. Çinko ve krom gibi elementler esansiyel olmalarına rağmen yüksek dozlarda toksisite gösterebilir. Dünya Sağlık Örgütü ve ATSDR gibi kurumlar, bu metaller için güvenli alım sınırlarını belirlemiş olsa da maruziyetin kronik ve düşük dozlarda bile birikim etkisi yaratabileceği unutulmamalıdır.

Balık tüketimi, dengeli ve kontrollü olduğu sürece sağlık için son derece yararlıdır. Ancak ağır metal kirliliğinin arttığı bölgelerde düzenli izleme çalışmalarına ihtiyaç vardır. THQ, HI ve CR gibi risk değerlendirme indekslerinin yaygınlaşması, tüketici güvenliğinin sağlanması açısından önem taşımaktadır. Çevresel politikaların güçlendirilmesi, endüstriyel deşarjların kontrolü, tarımsal kimyasal kullanımının düzenlenmesi ve sucul ekosistemlerin sürekli izlenmesi, hem ekosistem sağlığı hem de insan sağlığı için temel gerekliliklerdir.

Sonuç olarak ağır metaller, yalnızca bir çevre kirliliği meselesi değil; sucul ekosistemlerin bütünlüğünü, balık sağlığını, gıda güvenliğini ve halk sağlığını doğrudan etkileyen çok boyutlu

bir sorundur. Bu nedenle ağır metal çalışmaları disiplinler arası bir yaklaşım gerektirmekte, ekotoksikoloji, evre mühendisliği, biyoloji, gıda bilimi ve halk sağlığı gibi alanlar arasında bütünleşik bir iç birliği zorunlu hâle gelmektedir. Ağır metal kirliliğinin etkilerini azaltmak ve insan sağlığını korumak için sucul ortamlarda düzenli izleme, balıkçılık yönetiminde bilinçli politika üretimi ve tüketicinin doğru bilgilendirilmesi öncelikli adımlar olmalıdır.

Kaynakça

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2003). *Toxicological profile for mercury*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services.

Aközcanlar, B. (2009). *Sucul ekosistemlerde ağır metal kirliliği ve canlılar üzerindeki etkileri*. içinde Ankara: Nobel Yayıncılık.

Anderson, E. N. (2014). *Everyone eats: Understanding food and culture*. içinde New York: New York University Press.

Aresta, A., Di Grumo, G., & Zambonin, C. (2015). Food consumption patterns and cultural changes in the digital age. *Journal of Cultural Studies*, 12(1), s. 65-78.

Başaran, N. (2010). *Madencilik faaliyetlerinin sucul ekosistemler üzerine etkileri*. içinde İstanbul: Çantay Kitabevi.

Begum, A., Ramaiah, M., Harikrishna, R., Khan, I., & Veena, K. (2006). Heavy metal pollution and chemical profile of Cauvery River water. *E-Journal of Cremistry*, 3(1), s. 33-44.

Belgemen , T., & Akar, N. (2004). Çinkonun yaşamsal fonksiyonları ve çinko metabolizması ile ilişkili genler. *Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Mecmuası*, 57(3), s. 161-166.

Cervantes, C. (2001). Interactions of chromium with microorganisms and plants. *FEMS Microbiology Reviews*, 25(3), s. 335-347.

Çalışkan, E. (2005). Asi Nehri'nde su, sediment ve balıklarda metal birikiminin araştırılması (Yüksek lisans tezi). Hatay: Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gümüş, N., Gökbel, F., & Aydın, Z. (2024). Determination of heavy metal concentration in some fish species consumed in

Karaman Province, Türkiye. *COMU Journal of Marine Sciences and Fisheries*, 7(2), s. 127-137.

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). *Arsenic, metals, fibres, and dusts (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans)*. IARC.

Köse, E. (2007). *Su ürünleri ve insan beslenmesi*. içinde İstanbul: Evrensel Yayınları.

Tezcan, S., & Tezcan, S. (2007). *Ağır metallerin çevresel ve biyolojik etkileri*. içinde Ankara: Palme Yayıncılık.

Tokatlı, C., & Ustaoglu, F. (2021). Assessment of heavy metal pollution and health risk in fish species from the Meriç Delta, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, s. 1-12. doi:10.1007/s10661-021-08957-3

Veynay, P., Gauthier- Moussard, C., & Hitmi, A. (2007). *Chemosphere*, 68(8), s. 1563-1575.

World Health Organizatör. (2011). *Evaluation of certain food additives and contaminants: Seventy-second report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA)*. Geneva: World Health Organization.