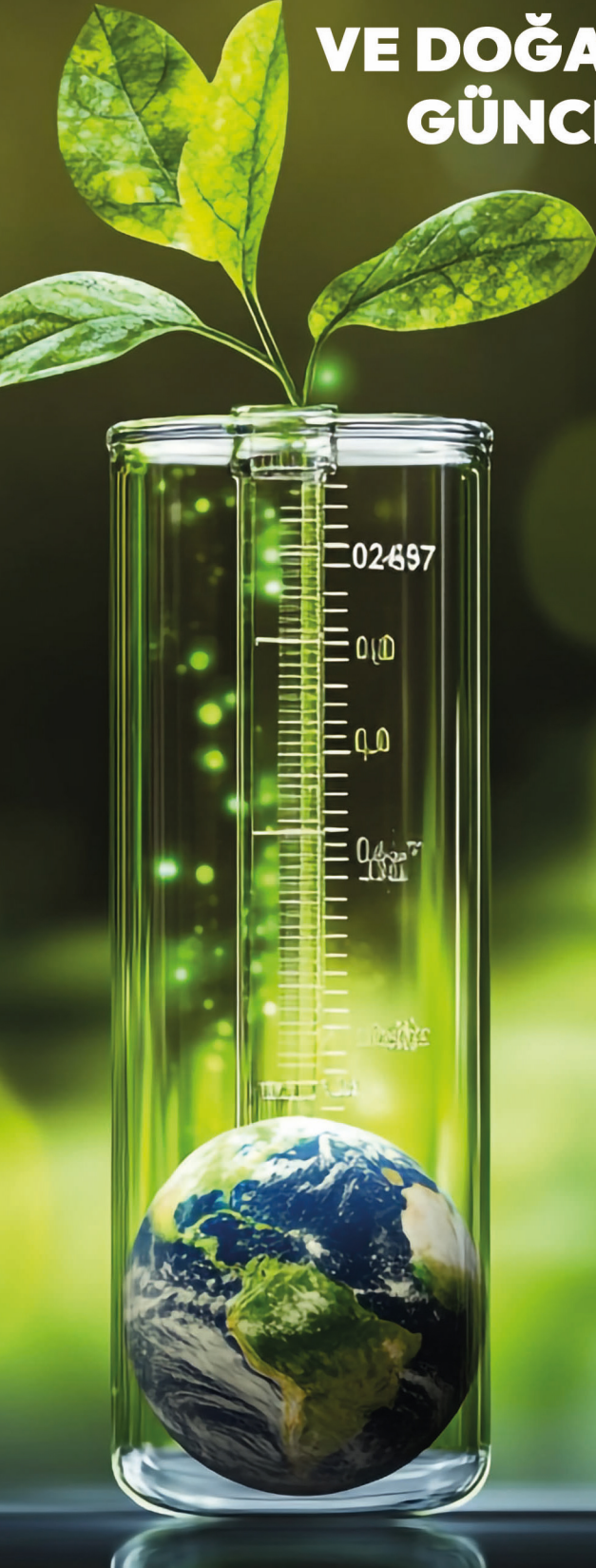


MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİNDE GÜNCEL KONULAR - 2

EDİTÖR
PROF. DR. HAKAN SEPET
PROF. DR. MURAT ÇANLI



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

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

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8671-02-5

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

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

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

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

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİNDE GÜNCEL KONULAR 2

EDİTÖR

**PROF. DR. HAKAN SEPET
PROF. DR. MURAT ÇANLI**

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

AĞIR METALLERİN BİTKİLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Demet ŞENER ÇANLI 1

BÖLÜM 2

DENİZ MEMELİLERİNDE AĞIR METAL KİRLİLİĞİ

Hakan SEPET 15

Murat ÇANLI 15

BÖLÜM 3

POLİMERLERİN REOLOJİK DAVRANIŞLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE SAYISAL ÇÖZÜMLEME

M. Sadrettin ZEYBEK 31

Kamil ŞİRİN 31

Ahmet ESER 31

BÖLÜM 4

AĞIR METALLERİN SUDA YAŞAYAN CANLILARA ETKİSİ

Murat ÇANLI 59

Hakan SEPET 59



AĞIR METALLERİN BİTKİLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

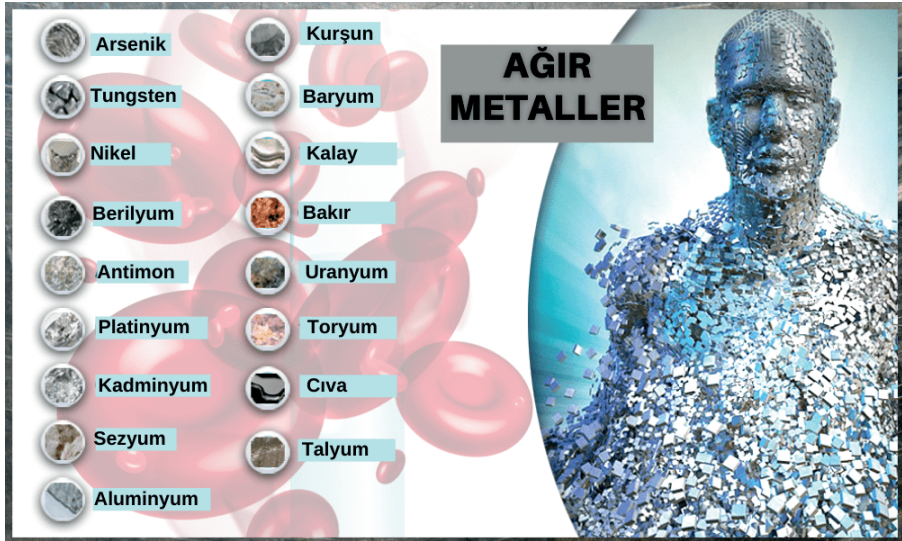
“ ”

Demet ŞENER ÇANLI¹

¹ Uzman Öğretmen, Kırşehir Yusuf Demir Bilim ve Sanat merkezi, Kırşehir, Türkiye, 0009-0003-4933-217X, demetsenercanli@gmail.com

Bu çalışmada 2010-2025 yılları arasında yapılmış makale ve tez çalışmaları incelenmiş ağır metallerin bitkiler üzerine etkileri ile ilgili çalışmalarda adı geçen metaller belirlenmiş olup ve kullanılan yöntem tekniklerin yanında elde ettikleri sonuçlar da belirtilmiştir (Şekil 1).

Yavaş ve ark. (2022) çalışmalarında bitkilerin toksik ağır metallerin neden olduğu stresi hafifletmek için kullandığı tolerans mekanizmalarını ve yönetim stratejilerini incelemiştir. Makale, Türk Tarım-Gıda Bilimi ve Teknolojisi Dergisi'nde yayınlanan bir derleme makedir. Stres azaltma stratejisi olarak ağır metal stresini azaltmak için nitrik oksit, hidrojen peroksit, nanopartiküller ve mikrobiyal uygulamalar gibi çeşitli stratejileri kullanmışlardır.



Şekil 1. Ağır Metallerin Listesi (bilgiustam, 2025)

48 titanyumun (^{48}Ti) lens culinaris med.'in kök uçlarının meristematik hücreleri üzerindeki sitogenetik etkileri adlı çalışmada, Sepet ve ark. (2014) ^{48}Ti titanyumun bitkinin kök uçlarının meristem hücreleri üzerindeki sitogenetik etkileri araştırılmıştır. Bitkinin tohumları, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 saatlik farklı zaman periyotlarında ^{48}Ti ve kontrol grubu olarak işleme tabi tutulmuştur. ^{48}Ti ile işlem görmüş tohumlar filizlendirilmiş ve elde edilen kök uçları mikroskopik inceleme için hazırlanmıştır. Mikroskopik incelemelerin sonunda, kromozom kırılması, kromozom dağılımı, köprü kromozom, kromozom yapışması, halka kromozom gibi bazı anormallikler gözlemlenmiştir. Anormallikler, zaman periyotlarına bağlı olarak her işlemde görülmüştür. Anormalliklerin çeşitliliği ve sayısı genellikle artmaktadır. Uygulama süresinin uzamasına bağlı olarak elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmişlerdir.

Ağır metaller, fitotoksik etkileri ve fenolik antioksidanların bitki stres tepkilerindeki rolü adlı çalışmada Goncharuk ve arkadaşları (2023) Ağır metal çevresel kirliliğinin mevcut durumunu ve bitki canlılığı üzerindeki çeşitli etkilerini incelemiştir. Toprakta kadmiyum da dahil olmak üzere ağır metallerin birikimi ve ardından bitkiye girişi ile ilgili verileri analiz etmişlerdir. Ağır metallerin fotosentez, solunum ve terleme gibi fizyolojik ve biyokimyasal süreçler üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Bitkilerin ağır metal stresine karşı adaptif tepkilerine karşı moleküler mekanizmalarının ele alındığı makalede Kosakivska ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada bitkilerin ağır metal stresi ve toksisitesine karşı adaptasyon ve savunma için kullandığı karmaşık moleküler mekanizmaları açıklamışlardır. Ağır metallerin girişini, taşınmasını, birikimini ve bunların bitki fizyolojik süreçleri üzerindeki spesifik etkilerini analiz etmişlerdir. Organik anyonlar ve polimerleri içeren hücre dışı ve hücre içi tutulumu, önemli bir tolerans mekanizması olarak tanımlamışlardır.

Pirinçte ağır metal kirliliğinin, emiliminin, taşınmasının ve birikiminin insan sağlığına olan risklerinin araştırılması adlı çalışmada Zakaria, ve ark. (2021) pirinç toprağı ve bitkilerindeki ağır metal kirliliğinin mevcut durumunu özetlemiş ve emilim ile biyobirikimini vurgulamışlardır. Emilim ve birikim mekanizmaları açısından pirinç bitkilerinde ve dokularında ağır metal emiliminin, taşınmasının ve birikiminin spesifik mekanizmalarını tartışmışlardır. Yaygın toksik metaller arasında pirinç yetiştirme ortamlarında en yaygın ve endişe verici metaller olarak Kadmiyum (Cd), Arsenik (As) ve Kurşun (Pb)'un olduğunu tanımlamışlardır.

İnsan gıdası olarak kullanılan pirinç ve su bitkilerinde ağır metal birikimine genel bir inceleme ile bakış adlı çalışmada Uddin ve ark., (2021) pirinç ve su bitkilerinde ağır metal birikim mekanizmalarını, ekolojik zorlukları ve sağlık sonuçlarını incelemiştir. Sağlık sonuçlarını değerlendirince gıda ürünlerinde ağır metal birikiminin insan ve hayvanlar üzerindeki çeşitli sağlık etkileri olduğunu belirtmişlerdir. Pirinç ve su bitkilerinde biyolojik birikim için ağır metallerin kaynaklarını vurgulanmakta ve ilgili azaltma stratejilerini özetlemiştir.

Baryum ve vanadyum iyonlarının lens culinaris medik'te oluşturduğu anormalliklere yeni bir bakış açısı adlı çalışmada Çanlı (2018) metal iyonlarının, özellikle baryum ve vanadyumun, "Lens culinaris" medik'in meristem hücrelerinde oluşturduğu anormallikleri incelemiştir. Gözlemlenen anormallikler özellikle bitkinin kök uçlarında meydana gelen kromozom kırılmaları, dağılımı ve yapışması gibi çeşitli anormallikleri belirlemiştir. Anormallik için mekanizma olarak maruz kalan metallerin muhtemelen proteinlerle ligand oluşumuna neden olarak, DNA-protein çapraz bağlarında iyon kalıcılığını önlediği gösterilmiştir.

Stronsiyumun (Sr) *Lens culinaris* medik üzerindeki konsantrasyon ve zamana bağlı etkileri adlı çalışmasında ise Sepet ve Çanlı (2020), stronsiyum iyonlarının değişen parametrelerle (zaman ve konsantrasyon) mercimek (*Lens culinaris*) meristematik kök ucu hücreleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Bitki tohumları, hem farklı sürelerde (1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20 ve 24 saat) sabit 1,0 molL⁻¹ (M) konsantrasyonda standart bir Sr çözeltisine hem de belirli bir süre (12 saat) boyunca çeşitli konsantrasyonlarda (0,05, 0,1, 0,25, 0,5 ve 1,0 M) Sr iyonlarına maruz bırakılmıştır. Sr ile işlem görmüş tohumlar çimlendirilmiş ve mikroskopik inceleme kök uçlarına odaklanmıştır. Mikroskopik incelemenin sonucunda, hücre bölünmesinin kromozomal anormalliklerini açıklığa kavuşturmuşlardır.

99Teknesyumun *Vicia faba* L. kök uçlarının meristem hücreleri üzerindeki sitogenetik etkileri ve istatistiksel karşılaştırması adlı çalışmada Özdemir ve ark. (2015) *Vicia faba* L. kök uçlarında gözlemlenen anormallikler arasında kromozom kırılması, kromozom dağılımı ve köprü kromozomları yer aldığını açıklamışlardır. Diğer sitogenetik etkiler açısından değerlendirildiğinde belirlenen sitogenetik etkiler ayrıca meristem hücrelerinde kromozom yapışması ve halka kromozomlarını da kapsamaktadır. Zamana bağlı anormallik artışı açısından incelendiğinde gözlemlenen anormalliklerin çeşitliliğinin ve sayısının, tedavi süresinin uzamasıyla genel olarak arttığı belirlenmiştir.

Bitkilerde ağır metal toleransının moleküler mekanizmaları adlı çalışmada Delangiz ve ark. (2020) bitkilerin ağır metallerin neden olduğu stresle başa çıkmak için kullandığı temel moleküler mekanizmaları açıklamışlardır. Ağır metallerin neden olduğu yaygın hasara, özellikle metilglioksal ve reaktif oksijen türlerinin birikimine odaklanılmışlardır. Bitkilerin ağır metal stresine karşı moleküler tepkileri ve potansiyel biyoremediasyon ile ilgili son çalışmaları incelemişlerdir.

Bitkilerde ağır metal toksisitesine karşı tolerans stratejilerinin çok yönlü bir çalışmasında Ejaz ve ark. (2023) ağır metal stresinin bitki yapısı ve fonksiyonel biyolojisi üzerindeki etkisini, morfolojik değişiklikleri detaylandırarak açıklamışlardır. Bitki savunma stratejilerini ağır metal kirliliğine karşı bitki savunma stratejilerini, metal tutma, metalleri kısıtlama ve fito-şelatör sentezleme dahil olmak üzere incelemişlerdir. Bitkilerin ağır metal toksisitesine karşı tepkisini ve toleransını koordine eden genetik, moleküler ve hücresel sinyalizasyon yollarına odaklanılmışlardır.

Kadmiyum zehirlenmesiyle bitki büyümesinin etkilenmesi ve bunun akabinde bitki iyileştirme stratejilerinin belirlenmesi adlı çalışmada Aslam ve ark. (2023) kadmiyum zehirlenmesinin bitki büyümesini ve kloroz gibi çeşitli morfolojik ve fizyolojik özelliklerini nasıl olumsuz etkilediğini incelemiştir. Daha iyi biyoremediasyon çözümleri geliştirmek için kadmiyum toleransında potansiyel olarak rol oynayan moleküler mekanizmaları ve genleri

detaylandırmıştır. İyileştirme stratejilerinin geliştirilmesi açısından kadmiyuma dayanıklı mahsuller ve çeşitler geliştirmek için çevre dostu yönetim uygulamalarının kapsamlı bir incelemesi sunulmuştur.

Topraktan ağır metallerin fitoremediasyonu ve bitki fizyolojisi üzerindeki etkileri adlı derleme çalışmada Rehman,ve ark. (2024) toprakta ağır metal birikiminin, toksisite yoluyla bitki ve ürün verimliliğini olumsuz etkilediğini açıklamaktadır. Kadmiyum, kurşun ve arsenik gibi toksik ağır metallerin bitki fizyolojisi ve morfolojisi üzerindeki özel etkilerini detaylandırmaktadır. Derlemede değerlendirilen çeşitli bitki türleri kullanılarak toksik ağır metallerin uzaklaştırılması için farklı fitoremediasyon yöntemlerini tartışılmıştır.

Toksik ağır metaller (THM) ile kirlenmiş alanların biyolojik iyileştirilmesi adlı çalışmada Rahman ve ark. (2020) bitkiler ve mikroorganizmalar kullanarak ağır metal kirliliğini yönetmeyi amaçlayan mikrop destekli fitoremediasyon yöntemini ele almışlardır. Fitoremediasyonun, bitkiler kullanılarak güneş enerjisiyle çalışan biyolojik bir teknik olduğunu ve fitoekstraksiyon ve fitostabilizasyon gibi alt dallara sahip olduğunu açıklamaktadır. Belirli bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmaların, bitkilerdeki yüksek ağır metal seviyelerinin olumsuz etkilerini nasıl hafifletebileceğini detaylandırmaktadır.

Buğdayda ağır metallerin neden olduğu strese bağlı fitotoksisite ve mikrobiyolojik yönetim adlı çalışmada ise Rizvi ve ark. (2020), buğdayda ağır metal toksisitesinin mekanistik temelini ve fitotoksisitenin mikrobiyolojik iyileştirme stratejileri kullanılarak nasıl azaltılabileceğini açıklamışlardır. Ağır metal birikimini, tarım ekosistemlerinde gıda güvenliğini ve ürün üretimini ciddi şekilde tehdit eden önemli bir tarımsal sorun olarak incelemişlerdir. Metal toleranslı bitki büyümesini teşvik eden rizobakterilerin, kirlenmiş topraklarda buğday üretimini nasıl olumlu etkilediğini tartışmaktadır.

Ağır metallerin kimyasal stres ve tıbbi bitkilerin esansiyel yağ üretimi arasındaki etkileşim üzerine çalışmada Hubai ve Kováts (2024) ağır metal kaynaklı stresin tıbbi bitkiler tarafından üretilen esansiyel yağların miktarı ve kalitesi üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Ağır metallerin esansiyel yağ üretimi üzerindeki etkilerinin, bitki taksonuna bağlı olarak belirsiz olduğunu gözlemlemektedir. Genetik çalışmalar yoluyla, ağır metal maruziyetinin esansiyel yağ sentezinden sorumlu genlerin ifadesini etkilediğini kanıtlamaktadır.

Kirlenmiş topraklarda tahıl bitkilerinin büyüme ve gelişimine ağır metallerin etkilerinin analizinin yapıldığı çalışmada Vasilachi ve ark. (2023) kirlenmiş topraklarda ağır metaller ve tahıllar arasındaki karmaşık etkileşimleri anlamak için kapsamlı bir araştırma gerektiren temel yönleri incelemişlerdir. Bitki savunma mekanizmaları olarak kök bariyeri oluşumu, mikorizal simbiyoz ve metal bağlayıcı proteinleri ağır metal stresine karşı kritik savunma

mekanizmaları tanımlanmaktadır. Sürdürülebilir tarım için metal toleranslı tahıl çeşitleri geliştirmede umut vadeden genetik ve ıslah yaklaşımlarını tartışmışlardır.

Bitkilerde ağır metal toksisitesi üzerine fizyolojik ve moleküler yönleri dair son bulgular çalışmasında Gill ve ark. (2022) ağır metal maruziyetinin besin dengesini değiştirerek ve hücresel ultrastrüktürü bozarak bitki büyümesi üzerindeki etkisini açıklamışlardır. Besin dengesizliği, büyüme değişikliği ve enzim işlev bozukluğu dahil olmak üzere bitkilerde ağır metal kaynaklı anormalliklere odaklanılır. Kadmiyum, kurşun, çinko ve nikel gibi çeşitli ağır metalleri ele alarak, bitkiler üzerindeki spesifik toksik etkilerini ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Ağır metallerin bitki büyümesi üzerindeki etkisi üzerine adlı çalışmada Goyal ve ark. (2020) yüksek ağır metal derişiminin bitkiler üzerindeki etkisini, serbest radikallerin ve reaktif oksijen türlerinin üretimine neden olarak açıklamışlardır. Ağır metal maruziyetinin oksidatif strese, hücresel hasara, değişmiş metabolizmaya ve azalmış biyokütle üretimine nasıl yol açtığını açıklamaktadır. Ağır metal stresine karşı bitki savunma mekanizmaları özetlenmekte ve bunlar arasında tutma, biriktirme ve toksik olmayan formlara detoksifikasyon yer almaktadır.

Bitkilerde ağır metal (ve metaloid)'lerin fitotoksik etkisi ve tohum ön işleme teknolojisi ile azaltılması adlı çalışmada Singhal ve ark. (2023) ağır metal (ve metaloid)lerin kaynaklarını, alımını, taşınmasını ve bitkiler üzerindeki fitotoksik etkilerini, azaltma stratejilerine odaklanarak açıklamışlardır. Anti-oksidan savunma sistemini güçlendirerek ağır metal toksisitesini hafifletmek için bir mekanizma olarak tohum ön işleme teknolojisini tartışılmaktadır. Ağır metallerin, nihayetinde bitkinin genel büyüme ve gelişimini etkileyen önemli bitki süreçleri üzerindeki sonuçlarını ortaya konmuştur.

Çin'deki tarım topraklarında ağır metaller hakkında bir derleme ve meta analiz adlı çalışmada Wen ve ark. (2022) Çin'in başlıca tahıl üretim bölgelerindeki ağır metal kirliliğine odaklanan, 2010-2021 yılları arasında yayınlanan 276 makaleden elde edilen verileri incelemiştir. İncelenen beş bölgenin tamamında beş temel ağır metalin (Kadmiyum, Bakır, Cıva, Kurşun ve Çinko) artan eğilimlerini tartışılmıştır. Hem mekansal dağılım hem de zamansal birikim özellikleri açısından incelenen bölgelerde en yaygın kirleticisi olarak Kadmiyumu tanımlamıştır.

Ağır metal kadmiyumun neden olduğu strese bitkilerin verdiği tepkiler hakkındaki anlayışımızdaki ilerlemeler adlı çalışmada Zhu ve ark. (2021) çeşitli bitkilerde ağır metal kadmiyumun emilimi, taşınması ve birikimi ile ilgili son gelişmeleri incelemiştir. Tohum çimlenmesi ve fotosentez inhibisyonu da dahil olmak üzere, ağır metal kadmiyumun bitkiler üzerindeki toksik etkilerini inceler. Ağır metal kadmiyum tolerans mekanizmalarına ve

bitkilerin bu çevresel stresle nasıl başa çıktığına odaklanır.

Topraklarda ağır metallerin birikim yolları, kaynakları ve yönetimi üzerine bir inceleme adlı çalışmada Jayakumar ve ark. (2021) Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn, Hg ve Pb dahil olmak üzere muazzam toksik etkilere sahip ağır metalleri ve metaloidleri incelemişlerdir. Tarımsal toprak alanında ağır metal kirliliği ve yönetim stratejileri ile ilgili araştırma çalışmalarını belgelemektedir. Ağır metallerin bitkileri doğrudan nasıl etkileyebileceğini, biyokimyasal, metabolik ve fizyolojik süreçlerini önemli ölçüde nasıl değiştirebileceğini ayrıntılarıyla anlatmaktadır.

Bitkilerde mikroorganizma aracılığıyla ağır metal detoksifikasyonuna bir bakış adlı derlemede Devi ve ark. (2022) çevre dostu ve uygun maliyetli iyileştirme için bitkilerde mikroorganizma aracılığıyla ağır metal detoksifikasyonunun çeşitli mekanizmalarını açıklamışlardır. Ağır metal kirliliğine, bitki biyolojisi üzerindeki etkilerine ve stres azaltma için metal-mikrop ilişkilerine kısa bir bakış sunar. Metal detoksifiye edici özelliklere ve bitki için yararlı özelliklere sahip mikroorganizmaların nasıl kullanılabileceğini açıklar.

Ağır metallerin (kadmiyum, krom ve kurşun referansıyla) kültür bitkilerinin büyüme ve gelişimine etkisi adlı derleme bir çalışmada Madhu ve ark. (2020) çeşitli ağır metallerin oluşumunu ve toksisitesini incelenmekte, kaynaklarını, etkilerini ve tedavi yöntemlerini derlemişlerdir. Bitkilerin ağır metallere karşı tolerans ve bozunma yeteneklerini, alım mekanizmaları da dahil olmak üzere araştırır. Mevcut teknoloji kullanım durumunu ve kültür bitkilerinin kirliliği azaltma yeteneğini değerlendirir.

Topraktan ağır metallerin biyolojik olarak temizlenmesi üzerine bir çalışmada Dursun ve ark. (2020) Kirlenmiş toprak ortamlarından ağır metalleri uzaklaştırmak için biyolojik temizleme tekniklerinin uygulanmasına ilişkin ilke ve kıstasları incelemişlerdir. Biyolojik temizleme için kullanılan çeşitli yöntemleri özetlemektedir ve topraktan belirli ağır metalleri uzaklaştırmadaki uygunluklarını analiz etmektedir. Bitkisel temizleme için kullanılan bitkilerde ağır metal toksisite seviyelerinin belirlenmesini ve toprak temizliğindeki etkinliklerinin değerlendirilmesini analiz edilmektedir.

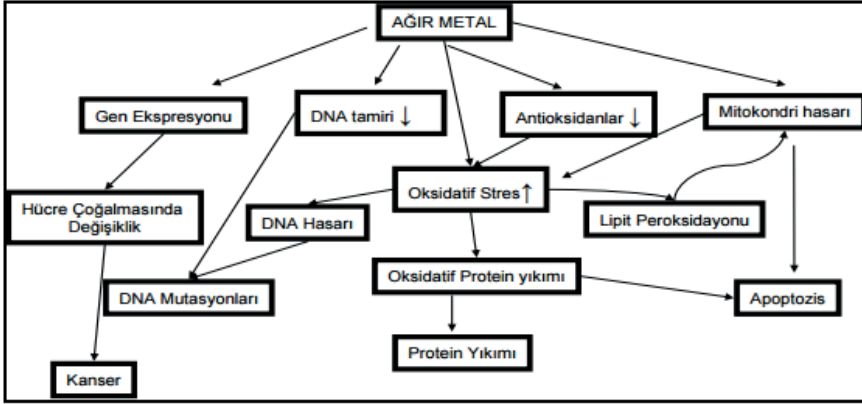
Zehirli metaller ve metaloidlerin daha güvenli gıda için alım, taşıma, detoksifikasyon, fitoremediasyon ve bitki geliştirme süreçlerindeki etkisi alanındaki çalışmada Zhao ve ark. (2022) daha güvenli gıda üretimi için hayati önem taşıyan bitkilerde zehirli metal ve metaloidlerin alım, taşıma ve detoksifikasyon mekanizmalarını açıklamışlardır. Topraktan zehirli metalleri uzaklaştırmak ve birikimi azaltmak için bitkileri iyileştirmek amacıyla fitoremediasyon gibi bitki tabanlı yöntemleri ele alır. Bitkilerde arsenik ve kadmiyum gibi zehirli metallerin alımı ve hareketinde rol oynayan çeşitli genleri ve taşıyıcıları tanımlanmaktadır.

Süs bitkileriyle kirlenmiş topraklardan ağır metallerin giderilmesi üzerine çalışmasında Aşur ve Karagöz (2024) belirli süs bitkilerinin ağır metal kirliliğine maruz kalmış ortamların fitoremediasyonunda potansiyel kullanımını ve peyzaj üzerindeki etkilerini açıklamaktadır. Daha az zarar verici bir alternatif olarak fitoremediasyon sistemleri gibi biyolojik teknikler kullanılarak ağır metal kirliliğine maruz kalmış toprakların iyileştirilmesini ele almaktadır. Süs bitkileri de dahil olmak üzere bazı bitkilerin peyzaj çalışmalarında çevresel kirliliğin arındırılmasında kullanılabilirliğini belirlemektedir.

Türkiye’de kentsel toprak kirliliği: büyük şehirlerdeki potansiyel olarak toksik elementler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve mikroplastiklerin incelenmesi adlı çalışmada Çayır ve ark. (2025) Türkiye’nin kentsel topraklarındaki ağır metaller, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve mikroplastikler de dahil olmak üzere potansiyel olarak toksik elementlerin durumunu inceleyer. Şehirlerde ulusal toprak kalitesi eşiklerini sıklıkla aşan kadmiyum ve kurşun gibi potansiyel olarak toksik elementlerle ilgili bulguları özetler. Çeşitli Türk şehirlerindeki sanayi merkezlerinde ve trafik koridorlarında kadmiyum ve kurşun gibi ağır metallerin artan seviyelerini detaylandırır.

Bitkilerde kurşun alımı, birikimi ve taşınımının bitkilerin fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler açıdan etkisi üzerine bir derleme çalışmasında Rahman ve ark. (2024) kurşunun bitkilerde alımı, birikimi ve taşınım mekanizmalarını açıklayan bu çalışma, metalin toksikolojik etkilerini detaylandırmıştır. Oksidatif stres ve detoksifikasyon da dahil olmak üzere, kurşun toksisitesine karşı bitki fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler tepkilerini incelemektedir. Kurşun toksisitesiyle mücadele için çeşitli yaklaşımları ele alıyor ve fitoremediasyon teknikleri ile biyokömür katkılarını vurguluyor.

Riyazuddin ve ark. (2021) ağır metal toksisitesinin, reaktif oksijen türlerinin oluşumu yoluyla bitki hücresel metabolizması üzerindeki olumsuz etkilerini açıklamaktadır. Azaltma Stratejileri: Bitkilerin ağır metal toksisitesinin olumsuz etkisini azaltmak için kullandığı çeşitli stratejileri sunar; bunlar arasında vakuollere tutulma da yer alır. Klorofil bozunmasını tetikleyerek ve merkezi Mg iyonunu değiştirerek ağır metal toksisitesi altında fotosentezin inhibisyonunu ayrıntılı olarak açıklar.



Şekil 2. Ağır metallerin hücre içi etkileri (Özbolat ve Tuuli, 2016)

Bitkilerde ağır metallerin hiper birikim ve hiper toleransının doğal moleküler mekanizmaları adlı çalışmada Skuza ve ark. (2022) ağır metal birikimini ve toleransını artıran doğal bitki mekanizmalarını inceler ve hiper birikimde yer alan spesifik süreçleri tartışır (Şekil 2). Bitki toleransının ana mekanizmasının metal alımından kaçınmak olduğunu, hiper birikimin ise alım ve nötralizasyonu içerdiğini açıklar. Hiperakümülatör bitki türleri kullanılarak ağır metal kirlenmiş toprakların arındırılması için bir strateji olarak fitoremediasyonu tartışır.

Kadmiyum ve kurşun kirliliğine dair kaynaklar, akıbet, mekanizma, sağlık etkileri ve iyileştirme yöntemleri adlı çalışmada Bouida ve ark. (2022) toprakta ve bitkilerde çevresel kirlleticiler olarak kadmiyum ve kurşunun insan sağlığına yönelik riskini açıklayan, kritik bir inceleme konusunu ele almışlardır. Kadmiyum ve kurşunun genel gıda zincirine girmeden önce topraktan temizlenmesinin kritik önemini vurgular. Topraktaki kadmiyum ve kurşunun kaynaklarını, akıbetini, birikimini ve yer değiştirme mekanizmalarını geniş bir bağlam sağlayarak tartışır.

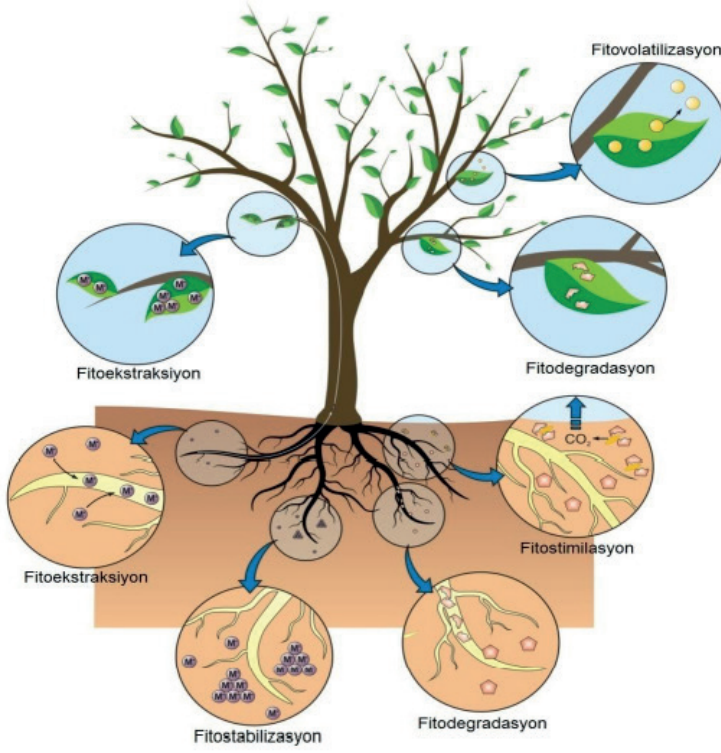
Bitkilerde stomalara ağır metallerin etkileri adı derleme bir çalışmada Guo ve ark. (2023) ağır metallerin bitkilerde stoma yapısı ve işlevini nasıl etkilediğine dair sistematik bir anlayış sunmuşlardır. Ağır metal kirliliğine maruz kaldığında stomaların fizyolojik ve ekolojik tepkilerini analiz eden bir derleme sunmaktadır. Stomalarda ağır metal toksisitesinin mevcut mekanizmalarını özetlemekte ve gelecekteki araştırma perspektiflerini belirlemektedir.

Uranyumun Fabaceae (Cicer arietinum L., Phaseolus vulgaris L., Vigna anguiculata L. ve Phaseolus coccineus L.) kök ucu hücreleri üzerindeki sitogenetik etkileri adlı çalışmada Özdemir ve arkadaşları (2012) uranyum maruziyetinin mitotik hücre bölünmesini etkilediğini ve fabaceae hücrelerinde

kromozomal anormalliklere neden olduğunu açıklar. Uranyum kalıntısının düşük konsantrasyonlarda nükleaz (RNAaz) aktivitesini uyardığını, ancak yüksek konsantrasyonlarda inhibe ettiğini bildirir. Uranyum kalıntısına maruz kalan Vicia faba tohumlarının çimlenme oranlarının inhibe edilmediğini belirtir.

Bitkiler-mikroorganizma temelli biyoremediasyon ile ağır metallerin temizlenmesi adlı çalışmada Raklami ve ark. (2022) bitkiler, ilişkili mikrobiyomlar ve çevre arasındaki etkileşimleri, metal(loid)lerin temizlenmesi stratejileri ve zorluklarına odaklanarak inceler. Yeşil Teknoloji Kullanımı: Ağır metallerden kaynaklanan çevresel kirliliği temizlemek ve önlemek için bitkileri ve ilişkili mikropları içeren yeşil teknolojinin kullanımını incelemişlerdir. Ağır metal(loid)lerin temizlenmesinde başarıyla kullanılan gelişmiş fitoremediasyon özelliklerini ve mikrobiyal biyoremediasyon yaklaşımlarını tartışır.

Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi adlı çalışmada Aybar ve ark. (2015) endüstriyel faaliyetler sonucunda çevreye yayılan kirleticilerin giderilmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır Bitkisel ıslah olarak da bilinen fitoremediasyon ortamda bulunan kirleticilerin giderilmesinde veya etkisiz hale getirilmesinde çeşitli bitkilerin kullanılması şeklinde tanımlanmaktadır (Şekil 3). Bu çalışmada, toprak kirliliğinin giderilmesinde kullanılabilecek fitoremediasyon teknolojisi, bitki türleri ve ülkemiz açısından uygulanabilirliği ortaya konulmaktadır.



Şekil 3. Fitoremediasyon Tiplerinin Şematik Gösterimi (Aybar ve ark., 2015)

KAYNAKÇA

- Aslam, M. M., Okal, E. J., & Waseem, M. (2023).** Cadmium toxicity impacts plant growth and plant remediation strategies. *Plant Growth Regulation*, 99(3), 397-412.
- Aşur, F., & Karagöz, S. (2024).** An Investigation on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soils with Ornamental Plants. *Journal of International Environmental Application and Science*, 19(1), 1-12.
- Aybar, M., Bilgin, A., & Sağlam, B. (2015).** Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 59-65.
- Bilgiustam (2025).** <https://www.bilgiustam.com/sagliginizi-tehdit-eden-5-agir-metal-civa-kursun-aluminyum-kadmiyum-arsenik/> (Alıntı tarihi 18.12.2025)
- Bouida, L., Rafatullah, M., Kerrouche, A., Qutob, M., Alosaimi, A. M., Alorfi, H. S., & Hussein, M. A. (2022).** A review on cadmium and lead contamination: Sources, fate, mechanism, health effects and remediation methods. *Water*, 14(21), 3432.
- Çanlı, M. (2018).** A new perspective to aberrations caused by barium and vanadium ions on *Lens culinaris* Medik. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 160, 19-23.
- Çayır, G., Rouhani, A., Al Souki, K. S., Błazalek, L., Newton, R. A., Şükür, F. Z., & Pidlisnyuk, V. (2025).** Urban soil pollution in Türkiye: a review of potentially toxic elements, polycyclic aromatic hydrocarbons, and microplastics in major cities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(12), 1366.
- Delangiz, N., Khoshru, B., Asgari Lajayer, B., Ghorbanpour, M., & Kazemalilou, S. (2020).** Molecular mechanisms of heavy metal tolerance in plants. *Cellular and Molecular Phytotoxicity of Heavy Metals*, 125-136.
- Devi, R., Behera, B., Raza, M. B., Mangal, V., Altaf, M. A., Kumar, R., ... & Singh, B. (2022).** An insight into microbes mediated heavy metal detoxification in plants: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 914-936.
- Dursun, Ş., Lyudmyla, S., & Hysen, M. (2020).** Bioremediation of heavy metals from soil: an overview of principles and criteria of using. *Agroecological journal*.
- Ejaz, U., Khan, S. M., Khalid, N., Ahmad, Z., Jehangir, S., Fatima Rizvi, Z., ... & Raposo, A. (2023).** Detoxifying the heavy metals: a multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. *Frontiers in plant science*, 14, 1154571.
- Gill, R. A., Kanwar, M. K., Rodrigues dos Reis, A., & Ali, B. (2022).** Heavy metal toxicity in plants: recent insights on physiological and molecular aspects. *Frontiers in Plant Science*, 12, 830682.
- Goncharuk, E. A., & Zagorskina, N. V. (2023).** Heavy metals, their phytotoxicity, and the role of phenolic antioxidants in plant stress responses with focus on cadmium. *Molecules*, 28(9), 3921.

- Goyal, D., Yadav, A., Prasad, M., Singh, T. B., Shrivastav, P., Ali, A., ... & Mishra, S. (2020). Effect of heavy metals on plant growth: an overview. *Contaminants in agriculture: sources, impacts and management*, 79-101.
- Guo, Z., Gao, Y., Yuan, X., Yuan, M., Huang, L., Wang, S., ... & Duan, C. (2023). Effects of heavy metals on stomata in plants: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9302.
- Hubai, K., & Kováts, N. (2024). Interaction between heavy metals posed chemical stress and essential oil production of medicinal plants. *Plants*, 13(20), 2938.
- Jayakumar, M., Surendran, U., Raja, P., Kumar, A., & Senapathi, V. (2021). A review of heavy metals accumulation pathways, sources and management in soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(20), 2156.
- Kosakivska, I. V., Babenko, L. M., Romanenko, K. O., Korotka, I. Y., & Potters, G. (2021). Molecular mechanisms of plant adaptive responses to heavy metals stress. *Cell biology international*, 45(2), 258-272.
- Madhu, P. M., & Sadagopan, R. S. (2020). Effect of heavy metals on growth and development of cultivated plants with reference to cadmium, chromium and lead—a review. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 16(3), 84-102.
- Özbolat, G., & Tuli, A. (2016). Ağır metal toksisitesinin insan sağlığına etkileri. *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, 25(4), 502-521.
- Özdemir, A., Bozdağ, B., Sepet, H., Parlak, Y., Kocabaş, O., Ereeş, F. S., & Özdemir, C. (2015). Cytogenetic effects of 99 technetium on meristematic cells of root tips of *Vicia faba* L. and statistical comparison. *Caryologia*, 68(3), 200-206.
- Özdemir, C., Ereeş, F. S., Sepet, H., Bozdağ, B., Yetişen, K., Şen, U., & Çam, S. (2012). Cytogenetic Effects of Uranium on Root Tip Cells of Fabaceae (*Cicer arietinum* L., *Phaseolus vulgaris* L., *Vigna anguiculata* L. and *Phaseolus coccineus* L.). *Middle-East J. Sci. Res*, 11(6), 791-795.
- Rahman, S. U., Qin, A., Zain, M., Mushtaq, Z., Mehmood, F., Riaz, L., ... & Shehzad, M. (2024). Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. *Heliyon*, 10(6).
- Rahman, Z., & Singh, V. P. (2020). Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), 27563-27581.
- Raklami, A., Meddich, A., Oufdou, K., & Baslam, M. (2022). Plants—Microorganisms-based bioremediation for heavy metal cleanup: Recent developments, phytoremediation techniques, regulation mechanisms, and molecular responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5031.
- Rehman, G., Muhammad, J., Ilyas, M., Subhanullah, M., Ullah, K., Massimzhan, M., ... & Zhakypbek, Y. (2024). Phytoremediation of heavy metals from soil and their effects on plant physiology-A review. *ES Materials & Manufacturing*, 26, 1298.
- Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W., &

- Gupta, R. (2021).** A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants. *Biomolecules*, 12(1), 43.
- Rizvi, A., Zaidi, A., Ameen, F., Ahmed, B., AlKahtani, M. D., & Khan, M. S. (2020).** Heavy metal induced stress on wheat: phytotoxicity and microbiological management. *RSC advances*, 10(63), 38379-38403.
- Sepet, H., & Çanlı, M. (2020).** Concentration-and time-dependent effects of strontium on *Lens culinaris* Medik. *Botanica Serbica*, 44(2), 175-182.
- Sepet, Hakan., Canli, M., Özdemir, A., Bozdağ, B., & Özdemir, C. (2014).** Cytogenetic Effects Of 48 Titanium (48 Ti) On Meristematic Cells Of Root Tips Of *Lens Culinaris* Med. *Pak. J. Bot*, 46(1), 101-110
- Singhal, R. K., Kumar, M., Bose, B., Mondal, S., Srivastava, S., Dhankher, O. P., & Tripathi, R. D. (2023).** Heavy metal (loid) s phytotoxicity in crops and its mitigation through seed priming technology. *International journal of phytoremediation*, 25(2), 187-206.
- Skuz, L., Szućko-Kociuba, I., Filip, E., & Bożek, I. (2022).** Natural molecular mechanisms of plant hyperaccumulation and hypertolerance towards heavy metals. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9335.
- Uddin, M. M., Zakeel, M. C. M., Zavahir, J. S., Marikar, F. M., & Jahan, I. (2021).** Heavy metal accumulation in rice and aquatic plants used as human food: A general review. *Toxics*, 9(12), 360.
- Vasilachi, I. C., Stoleru, V., & Gavrilesu, M. (2023).** Analysis of heavy metal impacts on cereal crop growth and development in contaminated soils. *Agriculture*, 13(10), 1983.
- Wen, M., Ma, Z., Gingerich, D. B., Zhao, X., & Zhao, D. (2022).** Heavy metals in agricultural soil in China: A systematic review and meta-analysis. *Eco-Environment & Health*, 1(4), 219-228.
- Yavaş, İ., Ali, S., Abbas, Z., & Hussain, S. (2022).** Heavy metal toxicity in plants: an overview on tolerance mechanisms and management strategies. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 10(8), 1468-1481.
- Zakaria, Z., Zulkafflee, N. S., Mohd Redzuan, N. A., Selamat, J., Ismail, M. R., Praeena, S. M., ... & Abdull Razis, A. F. (2021).** Understanding potential heavy metal contamination, absorption, translocation and accumulation in rice and human health risks. *Plants*, 10(6), 1070.
- Zhao, F. J., Tang, Z., Song, J. J., Huang, X. Y., & Wang, P. (2022).** Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food. *Molecular plant*, 15(1), 27-44.
- Zhu, T., Li, L., Duan, Q., Liu, X., & Chen, M. (2021).** Progress in our understanding of plant responses to the stress of heavy metal cadmium. *Plant Signaling & Behavior*, 16(1), 1836884.



DENİZ MEMELİLERİNDE AĞIR METAL KİRLİLİĞİ

“ ”

Hakan SEPET¹

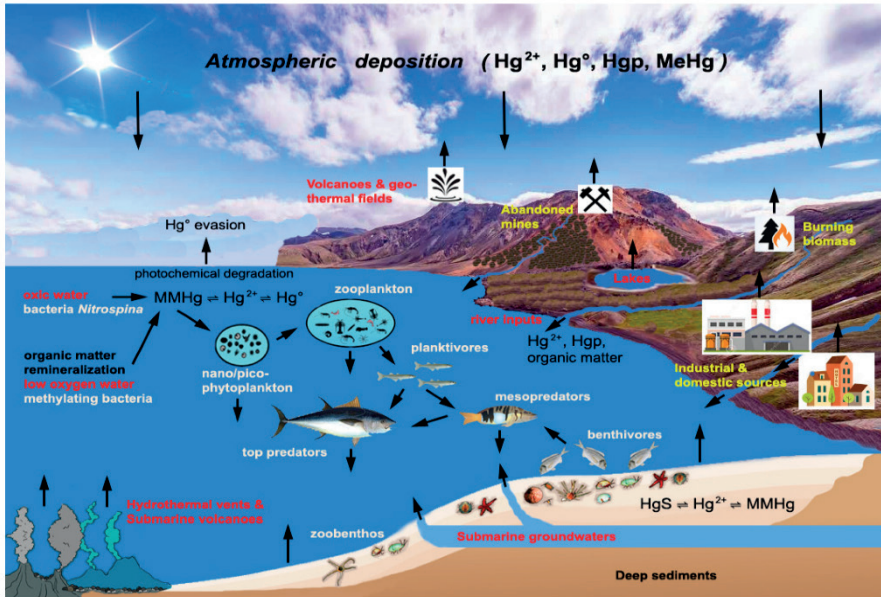
Murat ÇANLI²

1 Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye, 0000-0002-5841-9969, hakan.sepet@ahievran.edu.tr

2 Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mucur Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Kırşehir, Türkiye, 0000-0002-5275-861X, murat.canli@ahievran.edu.tr

Deniz memelileri, deniz ortamındaki metallerin varlığıyla ilgili önemli biyolojik izleme göstergeleridir (Evtimova vd., 2023). Birçoğu deniz besin zincirlerinin en üst seviyelerini işgal eder ve bu da birçok elementin biyolojik olarak büyümesine ve vücutta birikmesine neden olur. Tüm metaller toksik veya zararlı değildir, ancak bazı ağır metaller deniz memelilerinin hayati fonksiyonlarını azaltabilmekte ve çeşitli türlerde bağışıklık sisteminin baskılanmasına yol açabilmektedir. Bu metallerin genel toksisitesi, maruz kalan hayvanların tam kimyasal bileşimine ve fizyolojik durumuna, ayrıca yaşına, durumuna, boyutuna, cinsiyetine, üreme durumuna ve etkilenen organlara bağlı olarak değişim göstermektedir.

Deniz memelilerinde ağır metal kirliliği, son yıllarda çevresel bilimler, ekotoksikoloji, deniz biyolojisi ve halk sağlığı gibi çok sayıda disiplini ilgilendiren önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Endüstriyel faaliyetlerin, tarımsal uygulamaların ve kentleşmenin artmasıyla birlikte, deniz ortamlarına taşınan ağır metallerin miktarında ciddi bir artış gözlenmektedir. Bu metallerin deniz ekosistemlerinde birikimi, özellikle uzun ömürlü ve besin zincirinin üst basamaklarında yer alan deniz memelilerinde biyobirikim ve biyomagnifikasyon yoluyla önemli sağlık riskleri oluşturabilmektedir. Son beş yılda yapılan akademik çalışmalar, deniz memelilerinde ağır metal kirliliğinin boyutlarını, kaynaklarını, biyolojik etkilerini ve insan sağlığına olası yansımalarını çok yönlü olarak ele almaktadır.



Şekil 1. Kirlenici Kaynakları ile Deniz Canlıları İlişkisi (Bargagli ve Rota, 2024)

Ağır metallerin deniz ortamlarında birikimi, özellikle endüstriyel ve kentsel atıkların denizlere deşarjı ile yakından ilişkilidir (Şekil 1). Bu durum, deniz memelilerinin maruz kaldığı toksik maddelerin çeşitliliğini ve miktarını artırmaktadır. Ağır metallerin çevresel ortamlarda kalıcı olması ve biyolojik olarak parçalanamaması, bu kirleticilerin deniz memelilerinin dokularında uzun süre birikmesine neden olmaktadır. Özellikle cıva (Hg), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), arsenik (As), çinko (Zn), bakır (Cu), nikel (Ni) ve demir (Fe) gibi metaller, deniz memelilerinin fizyolojik süreçlerini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu metallerin toksik etkileri, genellikle sinir sistemi, bağışıklık sistemi, üreme sistemi ve metabolik fonksiyonlar üzerinde yoğunlaşmaktadır (Fu ve Xi, 2020). Ağır metal kirliliğinin deniz memelilerinde oluşturduğu risklerin anlaşılması, ekosistem sağlığı ve insan sağlığı açısından kritik öneme sahiptir.

Deniz memelilerinde ağır metal birikimi, genellikle besin zinciri yoluyla gerçekleşmektedir. Deniz memelileri, besin zincirinin üst basamaklarında yer aldıkları için, alt trofik düzeylerde biriken ağır metallerin biyomagnifikasyon yoluyla daha yüksek derişimlerde vücut dokularında birikmesine neden olmaktadır. Bu süreç, özellikle uzun ömürlü ve yüksek yağ dokusuna sahip türlerde daha belirgindir. Deniz memelilerinin dokularında biriken ağır metaller hem bireysel sağlık sorunlarına hem de popülasyon düzeyinde genetik ve fizyolojik değişimlere yol açabilmektedir (Fu ve Xi, 2020). Ayrıca, deniz memelilerinin insanlar tarafından doğrudan veya dolaylı olarak tüketilmesi, ağır metal maruziyetinin insan sağlığına taşınmasına neden olabilmektedir.

Ağır metal kirliliğinin deniz memelilerinde biyobirikimi ve toksik etkileri üzerine yapılan son beş yıllık akademik çalışmalar, bu alandaki bilgi birikimini önemli ölçüde artırmıştır. Örneğin, deniz kaplumbağalarında yapılan bir çalışmada, farklı dokularda (karaciğer, böbrek, kalp ve kas) ağır metal birikiminin türler arası ve dokuya özgü farklılıklar gösterdiği, bazı metallerin ise özellikle diyet ve beslenme alışkanlıklarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ortaya konmuştur (Çelik, 2022). Bu çalışma, deniz memelilerinde ağır metal birikiminin sadece çevresel maruziyetle değil, aynı zamanda türlerin ekolojik ve fizyolojik özellikleriyle de yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Çelik aynı çalışmasında, bazı dokularda biriken ağır metal derişimleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulmuş ve bu durumun, elementlerin metabolize edilişi, biyobirikimi veya atılımı ile ilgili fizyolojik süreçlerle açıklanabileceği belirtmiştir.

Ağır metal kirliliğinin deniz memelilerinde oluşturduğu risklerin değerlendirilmesinde, biyomonitor türlerin kullanımı da önemli bir yer tutmaktadır. Deniz memelileri, uzun ömürleri ve yüksek trofik düzeyleri nedeniyle, çevresel ağır metal kirliliğinin izlenmesinde etkili biyomonitorler olarak kabul edilmektedir (Torun & Meral, 2024). Bu türlerin dokularında

yapılan ağır metal analizleri, deniz ortamındaki kirleticilerin zamansal ve mekânsal dağılımı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, biyomonитор türlerin kullanımı, ağır metal kirliliğinin insan sağlığına olası etkilerinin öngörülmesinde de kritik bir rol oynamaktadır. Çünkü deniz memelilerinin tüketimi veya onlarla temas, ağır metal maruziyetinin insanlara taşınmasına neden olabilmektedir.

Deniz memelilerinde ağır metal kirliliği ile ilgili yapılan çalışmalarda, özellikle endüstriyel ve kentsel atıkların deniz ortamlarına taşınmasının etkileri vurgulanmaktadır (Türk & Cilli, 2024). Örneğin, İskenderun Körfezi'nde yapılan bir çalışmada, artan sanayileşme ve düzensiz kentleşmenin, hava, toprak ve su kirliliğinde artışa yol açtığı ve bu durumun deniz canlılarında ağır metal birikimini artırdığı belirtilmiştir. Ancak, aynı çalışmada, ahtapotların yenilebilir dokularındaki ağır metal seviyelerinin Türk Gıda Kodeksi ve Avrupa Gıda standartlarına uygun olduğu ve insan sağlığı açısından tehlikeli olmadığı tespit edilmiştir (Türk & Cilli, 2024). Bu bulgu, deniz memelilerinde ağır metal birikiminin her zaman insan sağlığı için doğrudan bir tehdit oluşturmadığını, ancak düzenli izleme ve değerlendirme yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Ağır metal kirliliğinin deniz memelilerinde oluşturduğu etkilerin anlaşılması için, farklı coğrafi bölgelerde ve farklı türlerde yapılan karşılaştırmalı çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Antalya, İzmir ve İzmit körfezlerinde yapılan bir çalışmada, sedimentlerdeki ağır metal derişimlerinin mevsimsel olarak değiştiği ve bazı metallerin (Ni, Cr, Cu) belirli dönemlerde kabul edilen kirlilik kriterlerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Turkmen & Pınar, 2024). Bu tür bulgular, deniz memelilerinin maruz kaldığı ağır metal yükünün, bölgesel endüstriyel faaliyetler, tarımsal uygulamalar ve mevsimsel değişiklikler gibi faktörlere bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.

Deniz memelilerinde ağır metal kirliliğinin izlenmesi ve değerlendirilmesinde kullanılan analitik yöntemler de son yıllarda önemli gelişmeler göstermiştir. Özellikle ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrophotometer) ve ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer) gibi ileri düzey analiz teknikleri, deniz memelilerinin dokularında çok düşük derişimlerdeki ağır metallerin hassas bir şekilde tespit edilmesini mümkün kılmaktadır (Koz, 2022; Türk & Cilli, 2024). Bu tekniklerin kullanımı, ağır metal birikiminin zamansal ve mekânsal dağılımının daha ayrıntılı bir şekilde ortaya konmasına olanak sağlamaktadır.

Ağır metal kirliliğinin deniz memelilerinde oluşturduğu biyolojik etkiler, genellikle genotoksisite, oksidatif stres, bağışıklık sistemi baskılanması, üreme bozuklukları ve davranışsal değişiklikler şeklinde ortaya çıkmaktadır (Raeeszadeh vd., 2023; Santhosh ve vd., 2024). Özellikle kadmiyum gibi

metallerin, DNA, RNA ve protein gibi fonksiyonel biyomoleküllere zarar verdiği ve genotoksisiteye yol açtığı bilinmektedir (Bölükbaşı, 2022). Deniz memelilerinde ağır metal birikiminin uzun vadeli etkileri, populasyon düzeyinde genetik çeşitliliğin azalması, üreme başarısının düşmesi ve bireysel sağlık sorunlarının artması şeklinde kendini gösterebilmektedir. Bu etkiler, deniz ekosistemlerinin sürdürülebilirliği ve biyolojik çeşitliliğin korunması açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır.

Deniz memelilerinde ağır metal kirliliğinin izlenmesi, sadece çevresel risklerin belirlenmesi açısından değil, aynı zamanda insan sağlığı açısından da büyük önem taşımaktadır. Özellikle deniz ürünlerinin insan beslenmesinde yaygın olarak tüketilmesi, ağır metal maruziyetinin gıda zinciri yoluyla insanlara taşınmasına neden olabilmektedir (Türk & Cilli, 2024). Bu nedenle, deniz memelilerinde ağır metal birikiminin düzenli olarak izlenmesi ve elde edilen verilerin halk sağlığı politikalarına bütünleşmiş edilmesi gerekmektedir.

Derin okyanus avlarından cıva birikimi ve yetişkin dişi kuzey fil foklarının (Mirounga angustirostris) aşırı yaşam tarihi stratejileri, kan biyobelirteçlerini cıva (iskelet kası ve kan cıvası) ve kortizol derişimleri ile ilişkilendirerek cıva ve stresin hayvan sağlığı üzerindeki etkileşimli etkilerini değerlendirmek için benzersiz bir sistem sunar. Deniz memelilerinde cıva birikiminin ve kortizol derişimlerinin endokrin ve bağışıklık biyobelirteçlerini nasıl etkilediğini inceleyen Peterson ve diğerlerinin (2023) çalışmasında Kuzey fil foklarında cıva ve kortizolün tiroksin ve immünoglobulin E üzerindeki etkileşimli etkileri ayrıntılarıyla anlatılmaktadır. Bu çalışmada, cıvanın fok balıklarının tiroid bezi, bağışıklık sistemi ve üreme hormonları üzerindeki belirli fizyolojik sonuçları birbiriyle ilişkilendirilerek gösterilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, cıvanın serbest dolaşan tepe deniz yırtıcıları üzerindeki önemli fizyolojik etkileri oluşturmaya ve cıva birikimi ile dışsal stres faktörleri arasındaki etkileşimleri varlığına işaret edilmektedir. Hayvanların homeostazı koruma (tiroid hormonları), patojenler ve hastalıklarla mücadele (doğuştan ve adaptif bağışıklık sistemi) ve başarılı bir şekilde üreme (endokrin sistem) yetenekleri üzerindeki zararlı etkiler, bireysel ve populasyon düzeyinde önemli sonuçlara yol açabileceği de bu araştırmanın vardığı sonuçlardan birisidir.

Ağır metal kirliliğinin deniz memelilerinde oluşturduğu etkilerin anlaşılması için, farklı coğrafi bölgelerde ve farklı türlerde yapılan karşılaştırmalı çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Akdeniz ve Karadeniz gibi farklı denizlerde yapılan araştırmalar, bölgesel farklılıkların ağır metal birikimi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir (Turkmen & Pınar, 2024). Bu bağlamda, Bargagli ve Rota 2024 yılında yaptıkları iki çalışmada (2024a ve 2024b) Akdeniz’de yaşayan deniz memelilerini mevcut ve gelecekteki iklimsel değişimlere göre ele almışlardır. Bargagli ve Rota (2024a) ilk çalışmalarında, Akdeniz’deki balinalarda cıvanın biyolojik

birikimini ele almakta, bu olağanüstü birikimi yönlendiren fizikokimyasal ve biyoeolojik süreçleri ayrıntılı olarak açıklayıp olası gelecekteki eğilimleri tartışmaktadırlar. Deniz memelilerinin cıvayı karaciğer ve diğer organlarda çözünmeyen kristaller halinde detoksifiye edip depoladığını, ancak bu sürecin selenyum kaybına yol açarak bulaşan hastalıklara neden olabileceği ve otoimmün bozukluklara yatkınlığı artırabileceğinden bahsedilmekte ve immünotoksositeye odaklanması gerektiği sonucuna varmaktadırlar. Yine Bargagli ve Rota (2024b) bir diğer çalışmalarında Akdeniz’de cıvanın biyojeokimyası ve biyobüyütme üzerindeki etkisini incelerken uzun ömürlü etçil deniz besin ağlarındaki metilcivanın (MMHg) biyolojik olarak büyütülmesi nedeniyle deniz memelileri gibi en üst düzey tüketiciler için olası sağlık riskleri taşıdığını ortaya koymuşlardır.

Akdeniz sahillerine sıkça uğrayan çizgili yunus balıklarıyla (*Stenella coeruleoalba*) ilgili bir çalışmada (Naccari vd., 2024) ise deniz kirliliğinin yunusların sağlık durumlarına etkisine odaklanılmıştır. *Stenella coeruleoalba*’nın organlarında/dokularında bulunan toksik metaller ve metaloidler, temel mikro ve makro elementlerin derişimleri değerlendirilmiştir. Bulunan düşük toksik metal ve metaloid (Cd, Pb, Hg, As) içeriği göz önüne alındığında, bazı özel parametrelerin analizi gerçekleştirilmiştir. Deniz kirliliği indeksi (MPI), yunusların deniz kirliliğini değerlendirmedeki kilit rolünü vurgularken, kondisyon katsayısı (K) ve tam mineral profili, yunusların iyi sağlık durumunun öngörücüsüdür. Çizgili yunusta temel mikro elementlerin (Zn, Se, Cu) toksik metallere (Hg ve Cr) karşı detoksifikasyon yeteneğini değerlendirilmiş ve temel metallerin mol oranlarına dayanarak bazı toksik metalleri yeterince detoksifiye edemediğini bulunmuştur. Ancak toksik ve esansiyel metaller arasındaki, molar oranlar olarak ifade edilen ilişkiler, toksik metallerin analiz edilen esansiyel metaller tarafından detoksifiye edilemediğini göstermiştir. Çizgili yunus gibi deniz memelilerinde toksik metallerin varlığının nörotoksosite, bağışıklık baskılanması ve endokrin bozulması gibi çeşitli olumsuz etkilere neden olabileceği vurgulanmaktadır.

Bir başka çalışmada Lozano-Bilbao ve arkadaşları (2021) Atlas Okyanusunda yer alan Kanarya Adaları üzerine odaklanmış ve Kanarya Adaları’nda karaya vuran pelajik ve derin dalış yapan balinalardaki metal içeriğini araştırmışlardır. Karaya vuran altı tür deniz memelisinin kas ve karaciğer dokusunda toksik ağır metallerin (Al, Cd, Pb) yanı sıra makroelementler, mikroelementler ve eser elementlerin derişimlerini belirlemişlerdir. Deniz memelisinin boyutu arttıkça, aralarında ağır metal kadmiyum’un (Cd) da bulunduğu çeşitli elementlerin derişimlerinin arttığını bulmuşlardır. Balina türlerinin dalış davranışına (derin dalış- sığ dalış) ve uzunluğuna bağlı olarak ağır metal derişimlerinde önemli farklılıklar olduğu ortaya konulmuştur.

İberya yarımadası diye adlandırılan İspanya ve Portekiz'in dahil olduğu bölge üzerinde yapılan çalışmada ise Baptista ve diğerleri (2022) ağır metaller ve metaloidlerin memeli hayvanlara etkilerinin gözlenmesine dair çalışmaları derlemişlerdir. Bu çalışmada, ağır metal kirliliğini ve ekolojik sonuçlarını değerlendirmede disiplinlerarası bir araç olarak biyoizlemenin önemine değinilmektedir. Sistematik incelemenin, deniz memelileriyle ilgili sucul yaşam alanlarından sekiz farklı memeli türünü içerdiği tespit edilmiştir. 62 İber biyoizleme çalışmasına toplam 30 farklı memeli türü (30/141) dahiledilmiş olup bunların 22'si karasal yaşam alanlarından olan tür ve 8'i sucul yaşam alanlarından olan türdür. Her iki habitat türünde de en çok temsil edilenler karasalda 22'de 7 ve suda yaşayan 8'de 8 olmak üzere etobur hayvanlardır. Çoğu çalışmada birden fazla doku ($2,8 \pm 1,3$) kullanılmış ve karaciğer ve böbrek öncelikli olmuştur. Analiz edilen biyoizleme çalışmalarının %45'inde ölçülen Cd, en çok belirlenen metal olmuştur ve bu da memeliler üzerindeki potansiyel sağlık etkisini vurgulamaktadır.

İspanya'nın Atlas okyanusuna bakan kıyılarına vuran deniz memelileri üzerine yoğunlaşan bu çalışma (Banos-Domenech vd., 2025) ile 2018-2020 yılları arasında karaya vuran 20 balinanın böbrek, karaciğer, beyin ve kaslarındaki kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), arsenik (As), selenyum (Se) ve cıva (Hg) derişimleri incelenmiştir. Çalışılan türler arasında oluklu balina (*Balaenoptera physalus*), çizgili yunus (*Stenella coerulealba*), bayağı yunus (*Delphinus delphis*), şişe burunlu yunus (*Tursiops truncatus*), liman yunusu (*Phocoena phocoena*) ve cüce ispermeçet balinası (*Kogia breviceps*) bulunmaktadır. Çalışma, Delphinidae familyasında en yüksek toksik metal derişimleri tespit edildiğini ve bunun odontocetlerin beslenme ve davranış alışkanlıklarından kaynaklandığını ileri sürmektedir. Çoğu analiz edilen numunede, Hg:Se mol oranının 1'den düşük olmasıyla gösterildiği gibi, Selenyumun (Se) Cıvaya (Hg) karşı detoksifiye edici etkisini doğrulamaktadır.

Atlas okyanusunun diğer kıyılarında Florida ve Georgia eyaletleri arasında bir bölgede yapılan bir çalışmada ise 2007-2021 yılları arasında karaya vuran dokuz odontocet (dişli balinalar ve yunuslar) türünde ağır metal toksinleri de dahil olmak üzere temel ve temel olmayan eser elementlerin yaygınlığı, derişimi ve doku dağılımı değerlendirilmiştir (Page vd., 2024). Yetişkin ve genç deniz memelilerinin karaciğer örneklerinde ağır metallerin (cıva, kadmiyum, arsenik, kurşun) selenyuma göre molar oranlarını inceleyerek toksik sağlık etkileri potansiyelini karşılaştırmışlardır. Örnekler, indüktif olarak eşleştirilmiş plazma kütle spektrometrisi (ICP) kullanılarak yedi temel (kobalt, bakır, demir, manganez, molibden, selenyum, çinko) ve beş temel olmayan (arsenik, kadmiyum, kurşun, cıva, talyum) element analitinin derişimleri açısından analiz edilmiştir. Risso yunusları (*Grampus griseus*) ve kısa yüzgeçli pilot balinaları (*Globicephala macrorhynchus*) en yüksek ortalama cıva, kadmiyum ve kurşun derişimlerine sahipken, cüce ispermeçet

balinaları (Kogia sima) tüm metallerde en düşük derişimlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, zamanla maruz kalma riskinin arttığını belirten raporda, 2019-2021 yılları arasında karaya vuran bazı cüce ve cüce ispermeçet balinalarında, daha önceki karaya vuranlara kıyasla ağır metaller de dahil olmak üzere birden fazla element açısından daha yüksek derişimlerde bulunduğu belirtilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri'nin güneydoğu kıyılarındaki deniz canlıları üzerine yapılan bu çalışmada (Page-Karjian vd., 2020), karaya vuran 83 odontosetin doku toksik madde derişimleri ve patoloji verileri beş organik toksik madde (atrazin, bisfenol-A, dietil ftalatlar, nonilfenol monoetoksilat [NPE], triklosan) açısından analiz edilmek amacıyla kütle spektrometrisi kullanılmış ve karaciğer örnekleri beş temel olmayan element (arsenik, kadmiyum, kurşun, cıva, talyum), altı temel element (kobalt, bakır, manganez, demir, selenyum, çinko) ve bir toksik madde karışımı sınıfı (Aroclor1268) açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, karaya vuran odontosetlerdeki toksik madde derişimleri ile ilgili mevcut bilgi tabanını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Toksik madde ve element derişimleri tür, cinsiyet, yaş ve konum gibi hayvan demografik faktörlerine bağlı olarak değişim göstermiştir. Şişe burunlu yunuslardan alınan örneklerde, pigme ispermeçet balinalarından alınan örneklere kıyasla kurşun, manganez, cıva, selenyum, talyum ve çinkonun ortalama derişimleri önemli ölçüde daha yüksek ve NPE, arsenik, kadmiyum, kobalt ve demirin ortalama derişimlerinin daha düşük olduğu bulunmuştur. Yetişkin dişi şişe burunlu yunuslarda, ortalama arsenik derişimleri yetişkin erkeklere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek ve demir derişimleri ise önemli ölçüde daha düşük olarak tayin edilmiştir. Yetişkin şişe burunlu yunuslarda, gençlere kıyasla kurşun, cıva ve selenyumun ortalama derişimleri önemli ölçüde daha yüksek ve manganezin ortalama derişimleri önemli ölçüde daha düşük çıkmıştır. Florida'da karaya vuran yunuslarda, Kuzey Carolina'da karaya vuran yunuslara kıyasla kurşun, cıva ve selenyumun ortalama derişimleri önemli ölçüde daha yüksek ve demirin daha düşük derişimlerinin varlığı belirlenmiştir. *Campula spp.* ve *Sarcocystis spp.*'nin mikroskopik kanıtları da dahil olmak üzere 72 hayvana ait histopatolojik veriler sunulmaktadır.

Benzer bir şekilde, Landrau-Giovannetti ve diğerleri (2025) Kuzey Amerika'da Mississippi nehrine bağlı olarak New Orleans'ta su baskınlarını önleyen Bonnet Carré Savak Yolu'nun uzun süreli çift açılışının ardından Mississippi Sound'daki (MSS) şişe burunlu yunuslarının (*Tursiops truncatus*) alışılmadık bir ölüm olayı ile etkilediğini tespit etmişlerdir. Nehir suyu ile okyanus suyundaki bu değişimin, yunuslarda düşük tuzluluk, deri lezyonları ve elektrolit dengesizliklerine neden olduğu belirlenmiştir. Ek olarak, okyanusa doğru akışın muhtemelen MSS'nin çevresel kimyasal bileşimini, ağır metaller ve metaloid seviyeleri de dahil olmak üzere değiştirmiştir;

bu nedenle, suyun salınmasından önce ve sonra MSS’de karaya oturan yunusların dokularındaki ağır metalleri, metaloidleri ve temel elementleri ölçülmüş ve ağır metaller ve metaloidlerin (cıva (Hg), arsenik (As), kurşun (Pb) ve kadmiyum (Cd) gibi) seviyelerine bakılmıştır. Sodyum (Na) ve magnezyum (Mg) seviyeleri, 2019’dan sonra çeşitli dokularda daha düşük seyrettiği ve bu durumun, MSS’den ölçülen ortalama yıllık tuzluluk oranıyla ilişki gösterdiği tespit edilmiştir. Toksik metaller ve metaloidler zaman içinde bazı değişikliklerle tespit edilebilmiştir; ancak selenyum (Se):Hg molar oranı 2019’dan sonra bazı dokularda arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, Hg’nin biyolojik olarak birikebileceği doğrulanmış ve Hg seviyeleri ile yunusun boyu arasında, düz uzunlukla değerlendirildiğinde pozitif ilişkiler bulunmuştur. Sonuçlar, MSS’ye yapılan tatlı su baskınlarının yunusların temel ve toksik elementlere maruziyetini değiştirebileceğini göstermektedir.

Atlas okyanusu ile bağlantısı olan Kanada’nın St.Lawrence körfezinde yaşayan gri deniz foklarındaki sağlık sorunlarını ve beslenme yararlarını değerlendirmek için gri foklardaki temel ve temel olmayan eser elementleri ölçen çalışmada (MacMillan vd., 2022) 2015’ten 2019’a kadar, avcılar ve araştırmacılar tarafından körfezde yer alan 4 noktada 120 gri fok örneklendi. Kas, karaciğer, kalp ve böbrek örnekleri 10 temel olmayan element (Sb, As, Be, B, Cd, Pb, Hg, Ni, Tl, Sn) ve 9 temel element (Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Se, Zn) açısından analiz edildi. Örneklerin bir alt kümesi için hem toplam cıva (THg) hem de metilcıva (MeHg) analiz edildi. Sonuçlar, kışın avlanan yılın gençlerinin (<6 haftalık) kaslarında (Fe, Mg, Se) ve karaciğerlerinde (Cd, Cr, Hg, Mn, Mo, Se) denizde beslenen yaşlı hayvanlara kıyasla daha düşük element derişimleri ile iki aşamalı bir biyoakümülyasyon örüntüsü gösterdi.

Kanada’nın kuzeydoğu kısımlarında yer alan Nunavut bölgesi üzerine yapılan bir çalışmada (Daoust vd., 2025) ise bu bölgede bulunan halkalı fok balıklarında mevcut temel olmayan eser elementlerin ve organik kirleticilerin seviyeleri belirlenmiştir. Halkalı foklar (Pusa hispida), Kanada’nın Nunavut kentindeki İnuit toplulukları için önemli bir besin kaynağıdır ve bu nedenle bu hayvanlardaki çevresel kirleticilerin düzenli olarak izlenilmesi gereklidir. Bu çalışmanın birincil amacı, doğu Nunavut’taki halkalı foklardaki kadmiyum (Cd), toplam cıva (THg) ve metilcıva (MeHg) dahil olmak üzere bazı temel olmayan eser elementlerin ve poliklorlu bifeniller (PCB’ler) ve polibromlu difenil eterlerin (PBDE’ler) mevcut seviyelerini belirlemek olmuştur. Temel bir eser element olan selenyum (Se) da Hg ile güçlü etkileşimi nedeniyle analize dahil edilmiştir. 2016’dan 2018’e kadar, geçimlik avlar sırasında 117 fok avlanmış ve örneklenmiştir. Bu çalışmada en çok avlanan ve tüketilen yaş sınıfı olan Yılın Gençleri (YY), gençlere ve yetişkinlere göre daha düşük kas ve karaciğer Cd, THg ve MeHg seviyelerine sahiptir. Se ve THg, karaciğerde inert Se:Hg granüllerinin varlığıyla tutarlı olarak yüksek oranda ilişkilidir. Yağ dokusundaki PCB ve PBDE seviyeleri, Kanada Arktik bölgesindeki

diğer bölgelerle aynı aralıkta tespit edilmiştir. İnsanların gıda ürünleri tüketimi için son Avrupa referans değerleri kullanıldığında, her yaştan çoğu fok karaciğer Cd değerini aştığı, ancak çok daha azı kas Cd değerini aştığı belirlenmiştir. İnsanların balık ürünleri tüketimi için THg için daha düşük Kanada referans değeri kullanıldığında ise, ancak Hg'nin daha toksik formu olan MeHg derişimlerine dayanarak, hiçbir kas örneğinin bu değeri aşmadığı ve çok az karaciğer örneğinin bu değerin üzerinde olduğu görülmüştür.

Alaska kıyılarındaki Steller deniz aslanı yavruları (*Eumetopias jubatus*) üzerine bir çalışmada Lian ve diğerleri (2020) kan dolaşımlarındaki cıva ve selenyum derişimleri ile oksidatif stres arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Alaska'nın batı Aleut Adaları'nda örneklenen Steller deniz aslanı (*Eumetopias jubatus*, SSL) yavrularının yaklaşık %20'sinin kıl ve tam kanda ölçülen toplam Hg derişimleri ([THg]), deniz memelilerinde olumsuz fizyolojik etkiler açısından endişe eşiğinin üzerindeydi. Daha da önemlisi, bazı durumlarda çeşitli dokularda (kıl, karaciğer, post, kas, dalak, bağırsak, kalp, akciğerler, beyin) <1 olan düşük TSe:THg mol oranları, [THg] endişe eşiğinin üzerinde olan bir SSL yavrusu için tespit edilmiştir ve bu durumun antioksidan eksikliğine yol açabileceği bildirilmiştir. Bu çalışmadaki amaç, serbest dolaşan SSL'lerde genel anestezi sırasında ölçülen oksidatif stres ve antioksidanlara göre dolaşımdaki [THg], [MeHg+], [TSe] ve TSe:THg molar oranı durumu arasındaki ilişkiyi değerlendirmektir. Aleut Adaları veya Alaska Körfezi'ndeki üreme alanlarındaki yenidoğan SSL yavrularını yakalanmış, anestezi uygulanmış ve örnekler toplanmıştır. Oksidatif stres için analiz edilen biyobelirteçler, 4-hidroksinenonal ve tiyobarbitürik asit reaktif maddeleri (sırasıyla 4-HNE ve TBARS, lipid peroksidasyonu), protein karbonil içeriğini (PCC, protein oksidasyonu) ve Se'ye bağlı antioksidan savunma seviyelerinin önemli bir göstergesi olarak GPx aktivitesini içeriyordu. TBARS ve [TSe] arasında negatif bir ilişki ve düşük [TSe] içeren SSL'lerin orta düzeyde [TSe] içerenlere göre daha yüksek 4-HNE derişimlerine sahip olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, düşük [TSe] içeren SSL'lerin potansiyel olarak [THg] durumuyla ilişkili olan artmış lipid peroksidasyonu deneyimlediğini göstermektedir.

Kuzey Amerika'nın Kaliforniya sahillerine bakan kısmında yapılan araştırmada (Lian vd., 2021) liman foku yavrularında toplam cıva derişimleri ile dokusal uyarılara verilen tepkiler arasındaki negatif ilişki incelenmiştir. Kabul sırasındaki Hg derişimleri ile ilgili olarak, 2015 ile 2019 yılları arasında Deniz Memelileri Merkezi'nde karaya oturma ve annelerinden ayrılma sonrası rehabilitasyon sırasında 267 Pasifik liman foku (*Phoca vitulina richardii*) yavrusu için farklı davranış tipleri değerlendirilmiştir. Kabul edilen HS yavrularına cinsiyet ve ağırlık tayini de dahil olmak üzere klinik muayene yapılmış ve toplam Hg derişiminin ([THg]) belirlenmesi için tüy (kısmen rahimde büyüyen lanugo) ve kan örnekleri toplanmıştır. Tüm yavrular haftalık olarak davranış değerlendirmeleri dokusal uyarıya

yanıt, hareket, yüzme, diğer foklarla etkileşimler, elle besleme ve bağımsız beslenmeyi içerecek şekilde izlenmiş ve rehabilitasyondaki günler ve hayatta kalma süreleri kaydedilmiştir. [THg] ile hem tüyde hem de tam kanda ölçülen dokusal uyarıya ve hareketlere verilen yanıtlar arasında önemli bir negatif ilişki kaydedilmiştir. Bu ilişkiye hem yoğun bakım ünitesi (YBÜ) aşamasında hem de rehabilitasyonun havuz aşamasında rastlanmıştır. Ek olarak, [THg] ile rehabilitasyonda geçirilen gün sayısı arasında anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Dişi yavrularda [THg]'nin daha yüksek olmasıyla, anlamlı bir cinsiyet farkı bulunmuştur. Toplam cıva derişimlerinin yüksekliği ile rehabilitasyonda geçirilen gün sayısının artması arasında anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Doğan liman foku yavrularında rahim içi cıva maruziyeti nedeniyle hareket kabiliyetinde ve dokusal duyuşal tepkilerde azalma gibi olumsuz etkiler belgelenmiştir.

Yine bir diğer çalışmada (Toro-Valdivieso vd., 2023), Pasifik okyanusuna kıyısı olan Güney Amerika'da yer alan Şili açıklarındaki izole ve nispeten bakir bir takımadaya özgü bir deniz memelisi olan Juan Fernandez kürkklü foklarında (JFFS) ağır metal maruziyeti belirlenmiştir. JFFS dışkılarında olağanüstü yüksek Cd ve Hg derişimleri bulunmuştur. Bu değerler herhangi bir memeli türü için bildirilen en yüksek derişimler arasındadır. Avlarının analizi sonrasında, JFFS'de Cd kontaminasyonunun en olası kaynağının diyet olduğu sonucuna varmışlardır. Dahası, Cd'nin JFFS kemikleri tarafından emildiği ve dahil olduğu görülmüştür. Ancak, diğer türlerde gözlenen mineral değişiklikleriyle ilişkili olmaması, JFFS kemiklerinde Cd toleransı/ adaptasyonları olduğunu düşündürmektedir. JFFS kemiklerinde bulunan yüksek silikon seviyeleri, Cd'nin etkilerini ortadan kaldırabilir. Bu bulgular biyomedikal araştırmalar, gıda güvenliği ve ağır metal kontaminasyonunun tedavisi ile ilgilidir. Ayrıca, JFFS'nin ekolojik rolünün anlaşılmasına katkıda bulunmakta ve görünüşte bakir ortamların gözetimi ihtiyacını vurgulamaktadır.

Güney Amerika'nın Atlas okyanusunda yer alan diğer tarafındaki Brezilya kıyılarına ait bir çalışmada iki yunus türünün (*Sotalia guianensis* ve *Pontoporia blainvillei*) karaciğer dokusunda As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb ve Zn gibi ağır metalleri analiz edilmiştir (dos Santos Lima vd., 2024). Yoğun kentleşmenin yaşandığı bölgelerde kaydedilen yunusların dokularında daha yüksek derişimlerde belirtilen kirleticilerin bulunup bulunmadığı araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, en yoğun kentsel alanlarda kaydedilen yunus popülasyonlarının dokularında daha yüksek derişimlerde kirletici madde bulunup bulunmadığı da araştırılmıştır. São Paulo eyaletinde karaya vurmuş bireylerden günlük izlemelerle yunus örnekleri *S. Guianensis*'den 40 ve *P. Blainvillei*'den 97 olarak toplanmıştır. Spearman rank ilişkisi, her iki türde de eser element birikiminde belirgin ilişkiler olduğu incelenen elementlere farklı maruz kalma kaynakları veya türler arasında farklı biyokimyasal

süreçler olduğunu göstermiştir. Türler arası ve tür içi varyasyonlar muhtemelen bireysel dağılım ve beslenme alışkanlıklarıyla ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Yaş ile eser element derişimleri arasında Cd, Hg ve Mo için pozitif ilişkiler gözlemlenmiş ve fetüslerde yüksek Cu, Zn seviyeleri ve As, V ve Hg derişimleri olduğu görülmüştür. Özellikle, mahsur kalmış bir bireyin içinde bulunan bir fetüs üzerinde yapılan bir analiz, bazı elementlere maruz kalmanın ilk yolunun plasenta transferi olduğunu kanıtlamıştır.

Reindl ve diğerleri (2025) çalışmalarında, Atlas okyanusunun kuzey bölgesinde yer alan Baltık denizinde yaşayan bir deniz memelisi türü olan Baltık gri foklarının, farklı yaşam evrelerinde nadir toprak elementlerine (REE) ve eser elementlere (TE) maruz kalmalarını inceleyerek bu çevresel kirleticilerin etkisini anlamayı amaçlamışlardır. Baltık gri foklarının kanında ve plasentasında eser element ve REE derişimlerini ölçerek bu elementlerin deniz yırtıcıları üzerindeki toksikolojik önemini değerlendirmişlerdir. Gebelik ve emzirme döneminde yavruların anneden besin ve nadir toprak elementleri (NTE) ile beslenmesi yoluyla anneden yavrulara geçme potansiyeli araştırılmış olup, bu durumun ekolojik kalıtım etkilerine yol açabileceğine değinilmiştir. Lantanitler analiz edilerek hafif nadir toprak elementleri (LREE, Lasingle bondEu), ağır nadir toprak elementleri (HREE, Gdsingle bondLu ve Y) ve Skandiyum (Sc) arasında ayırım yapılmıştır. Ek olarak, Krom (Cr), Nikel (Ni), Bakır (Cu), Çinko (Zn), Arsenik (As), Selenyum (Se), Kadmiyum (Cd), Kurşun (Pb) ve Berilyum (Be), Sodyum (Na), Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al), Potasyum (K), Kalsiyum (Ca), Vanadyum (V), Manganez (Mn), Demir (Fe), Kobalt (Co), Stronsiyum (Sr), Molibden (Mo), Gümüş (Ag), Antimon (Sb) ve Baryum (Ba) gibi eser elementler, endüktif olarak eşleştirilmiş plazma-kütle spektrometrisi (ICP-MS) kullanılarak kantifize edilmiştir. Kan örneklerinde (toplam n = 19), belirtilen tüm metallerin derişimleri ölçülmüş, plasentalarda (toplam n = 26) sadece REE ve Zn, Se, Cu, Cr, As, Cd, Pb, Ni analizleri yapılmıştır. Ayrıca, balık bazlı beslenmeyle beslenen yavrularda kan morfolojisinde gözlemlenen değişiklikler (örneğin, daha yüksek kırmızı kan hücresi sayısı), çevresel kirleticilere maruz kalmanın fizyolojik etkisini vurgulamaktadır. Bu bulgulara göre, Baltık gri foklarının yunus balıklarında olduğu gibi ekosistem sağlığı için değerli biyoindikatörler olarak rolünü desteklemektedir.

Diğer okyanus olan Pasifik üzerindeki Tayvan ile ilgili bir çalışmada ise araştırmacılar (Chen vd., 2020) dört adet dişli balının dokularındaki Fe, Zn, Cu ve Mn derişimlerini belirlemişlerdir. Tayvan dişli balınalarının (cüce ispermeçet balinaları, Fraser yunusları, Risso yunusları ve pantropik benekli yunuslar) dört türündeki dört temel elementin (Fe, Zn, Cu ve Mn) doku derişimlerini inceleyerek metal birikimini gelişim, boyut ve fizyolojik ihtiyaçlarla ilişkilendirmişlerdir. Hg, As, Ag ve Cd gibi temel olmayan toksik elementler de dahil olmak üzere eser elementlerin, balınaların yaşıyla birlikte

nasıl arttığını, bunun da sağlıklarını ve hayatta kalmalarını tehdit edebilecek kirli deniz ortamlarına sürekli maruz kalmalarından kaynaklandığını göstermişlerdir.

Pasifik okyanusu ile ilgili bir diğer çalışmada (Taylor vd., 2022) Avustralya deniz aslanları (*Neophoca cinerea*) yavrularında oluşan kancalı kurt hastalığı esansiyel olmayan ağır metaller ve selenyumun cıva toksisitesine karşı koruyucu etkileri araştırılmıştır. Avustralya deniz aslanı (*Neophoca cinerea*) yavrularından toplanan kandaki arsenik (As), toplam cıva (Hg), kadmiyum (Cd), krom (Cr), kurşun (Pb) ve selenyum (Se) derişimleri belirlenmiştir. Yavru deniz aslanlarında kancalı kurt hastalığının neden olduğu anemiye kurşun (Pb) ve kadmiyumun (Cd) kötüleştirebileceğini ve kırmızı kan hücreleri parametreleriyle negatif bir ilişki gösterdiği öne sürülmüştür. Bu bulgular, endemik kancalı kurt hastalığı nedeniyle yavrularda önemli oranda morbidite ve mortalite görülmesinin, bu yüksek ağır metal derişimlerinin yavruların kancalı kurtların klinik etkilerine karşı en savunmasız olduğu döneme denk gelmesi nedeniyle bağlantılı olduğunu ortaya koymuştur.

Kaynaklar

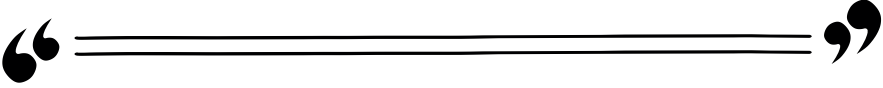
- Baños-Doménech, L., García-García, N., Peñalver, J., Armenteros, J. A., & Martínez-López, E. (2025). First record of trace elements in cetaceans stranded along the Asturias Coastline, Northwest Spain: one great diversity area of marine mammals. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 89, 127669.
- Baptista, C.J., Seixas, F., Gonzalo-Orden, J. M., & Oliveira, P. A. (2022). Biomonitoring of heavy metals and metalloids with wild mammals in the Iberian Peninsula: a systematic review. *Environmental Reviews*, 31(1), 66-75.
- Bargagli, R., & Rota, E. (2024). Mediterranean Marine Mammals: Possible Future Trends and Threats Due to Mercury Contamination and Interaction with Other Environmental Stressors. *Animals*, 14(16), 2386.
- Bargagli, R., & Rota, E. (2024). Mercury biogeochemistry and biomagnification in the Mediterranean Sea: Current knowledge and future prospects in the context of climate change. *Coasts*, 4(1), 89-107.
- Bölükbaşı, E. (2022). Methylation modelling and epigenetic analysis of sunflower (*helianthus annuus* l.) seedlings exposed to cadmium heavy metal stress. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi* 25(3). <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.883985>
- Chen, M. H., Lin, Y. T., Lai, C. C., Chou, L. S., & Chen, C. Y. (2020). Tissue concentrations of Fe, Zn, Cu and Mn of four Taiwanese toothed cetaceans. *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111094.
- Çelik, S. (2022). Deniz kaplumbağalarının farklı dokularında ağır metal derişimin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. <https://doi.org/gcris.pau.edu.tr/handle/11499/45824>
- Daoust, P. Y., MacMillan, G. A., Sudlovenick, E., Simonee, J., Amyot, M., Houde, M., ... & L'Hérault, V. (2025). Non-essential trace elements, methylmercury, and organic contaminants in hunted ringed seals (*Pusa hispida*) from Baffin Island, Nunavut, Canada. *Chemosphere*, 377, 144324.
- Dos Santos Lima, G., Pedrobom, J. H., Suarez, C. A., Torres-Florez, J. P., Vidal, L. G., Domit, C., & Menegario, A. A. (2024). Bioaccumulation of trace elements in marine mammals: New data and transplacental transfer on threatened species. *Science of The Total Environment*, 948, 174854.
- Evtimova, V., Grozdanov, A., & Parvanov, D. (2023). Cadmium, mercury and lead in the bones of marine mammals. *Lead, mercury and cadmium in the aquatic environment: worldwide occurrence. Fate and Toxicity*, 126.
- Fu, Z., & Xi, S. (2020). The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology mechanisms and methods*, 30(3), 167-176.
- Koz, B. (2022). Sarp-Giresun otayol çevresindeki yapraklı karayosunlarında ağır metal analizleri. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* 12(2). <https://doi.org/10.31466/kfbd.1180758>

- Landrau-Giovannetti, N., Murray, R., Reichley, S., Moore, D., Madrigal, T., Brown, A., ... & Kaplan, B. L. (2025). Tissue Element Levels and Heavy Metal Burdens in Bottlenose Dolphins That Stranded in the Mississippi Sound Surrounding the 2019 Unusual Mortality Event. *Toxics*, 13(6), 511.
- Lian, M., Castellini, J. M., Kuhn, T., Rea, L., Bishop, L., Keogh, M., ... & O'Hara, T. (2020). Assessing oxidative stress in Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*): Associations with mercury and selenium concentrations. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 235, 108786.
- Lian, M., Field, C. L., van Wijngaarden, E., Rios, C., Castellini, J. M., Greig, D. J., ... & O'Hara, T. M. (2021). Assessment of clinical outcomes associated with mercury concentrations in harbor seal pups (*Phoca vitulina richardii*) in central California. *Science of the Total Environment*, 758, 143686.
- Lozano-Bilbao, E., Alcázar-Treviño, J., Alduán, M., Lozano, G., Hardisson, A., Rubio, C., ... & Gutiérrez, Á. J. (2021). Metal content in stranded pelagic vs deep-diving cetaceans in the Canary Islands. *Chemosphere*, 285, 131441.
- MacMillan, G. A., Amyot, M., Daoust, P. Y., & Lemire, M. (2022). Age-specific trace element bioaccumulation in grey seals from the Gulf of St. Lawrence. *Chemosphere*, 294, 133640.
- Naccari, C., Ferrantelli, V., Cammilleri, G., Ruga, S., Castagna, F., Bava, R., & Palma, E. (2024). Trace elements in *Stenella coeruleoalba*: Assessment of marine environmental pollution and dolphin health status. *Animals*, 14(11), 1514.
- Page, A., Hay, C., Marks, W., Bennett, B., Gribble, M. O., Durden, W. N., ... & Burton, S. (2024). Trace element bioaccumulation, tissue distribution, and elimination in odontocetes stranded in Florida and Georgia, USA over a 15-year period (2007–2021). *Heliyon*, 10(3).
- Page-Karjian, A., Lo, C. F., Ritchie, B., Harms, C. A., Rotstein, D. S., Han, S., ... & Perreault, J. R. (2020). Anthropogenic contaminants and histopathological findings in stranded cetaceans in the southeastern United States, 2012–2018. *Frontiers in Marine Science*, 7, 630.
- Peterson, S. H., Ackerman, J. T., Holser, R. R., McDonald, B. I., Costa, D. P., & Crocker, D. E. (2023). Mercury bioaccumulation and cortisol interact to influence endocrine and immune biomarkers in a free-ranging marine mammal. *Environmental Science & Technology*, 57(14), 5678-5692.
- Raezadeh, M., Khoei, A. J., Parhizkar, S., Rad, F. T., & Salimi, B. (2023). Assessment of some heavy metals and their relationship with oxidative stress and immunological parameters in aquatic animal species. *Biological Trace Element Research*, 201(9), 4547-4557.
- Reindl, A. R., Wolska, L., Grajewska, A., Kucharska, K., Kalicki, M., & Pawliczka, I. (2025). One health perspective on environmental contaminants-rare earth and trace element exposure in baltic grey seal across life stages. *Science of the Total Environment*, 980, 179540.
- Santhosh, K., Kamala, K., Ramasamy, P., Musthafa, M. S., Almuji, S. S., Asdaq, S. M.

- B., & Sivaperumal, P. (2024). Unveiling the silent threat: Heavy metal toxicity devastating impact on aquatic organisms and DNA damage. *Marine pollution bulletin*, 200, 116139.
- Taylor, S., Terkildsen, M., McQuilty, R., Lee, D., Wing-Simpson, A., & Gray, R. (2022). Non-essential heavy metals and protective effects of selenium against mercury toxicity in endangered Australian sea lion (*Neophoca cinerea*) pups with hookworm disease. *Environment International*, 169, 107521.
- Toro-Valdivieso, C., Jugdaohsingh, R., Powell, J. J., Hoffman, J. I., Forcada, J., Moore, C., & Blacklaws, B. (2023). Heavy metal contamination in pristine environments: lessons from the Juan Fernandez fur seal (*Arctocephalus philippii philippii*). *Royal Society Open Science*, 10(3), 221237.
- Torun, H. & Meral, A. (2024). Ağır metal kirliliğinin belirlenmesinde biyomonitör bitkilerin rolü. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi* 20(Özel Sayı). <https://doi.org/10.58816/duzceod.1565550>
- Turkmen, M. & Pınar, E. O. (2024). Antalya, İzmir ve İzmit körfezlerinin sedimentlerinde ağır metal birikiminin mevsimsel olarak incelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* 14(2). <https://doi.org/10.31466/kfbd.1427457>
- Türk, E. & Cilli, A. (2024). İskenderun körfezi'nden yakalanan ahtapotlarda ağır metal düzeyleri. *Kocatepe Veterinary Journal* . <https://doi.org/10.30607/kvj.1474131>



POLİMERLERİN REOLOJİK DAVRANIŞLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE SAYISAL ÇÖZÜMLEME



M. Sadrettin ZEYBEK¹

Kamil ŞİRİN²

Ahmet ESER³

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi Turgutlu Meslek Yüksekokulu, Malzeme ve Malz.

İşl. Tek. Böl., Turgutlu Manisa

² Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Kimya

Bölümü, Manisa

³ e-posta: sadrettin.zeybek@cbu.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüz modern endüstrisinde polimerler, sahip oldukları geniş moleküler mimari çeşitliliği, düşük yoğunlukları, işlenebilirlikleri ve maliyet etkinlikleri nedeniyle en önemli mühendislik malzemeler grubundadır. Bu malzemelerin üretim hacminin büyük bir bölümünü oluşturan polipropilen (PP), polietilen (PE), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS) ve polietilen tereftalat (PET) gibi termoplastik polimerler; ambalaj, otomotiv, elektronik, medikal cihazlar, boru sistemleri ve tekstil sektörlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin endüstriyel işlenebilirliği, büyük ölçüde eriyik reolojisi yardımıyla belirlenir. Viskoelastik davranışın doğru modellenmesi, proste enerji verimliliğinin artırılması, ürün geometrisinin korunması, yüzey kalitesinin iyileştirilmesi, iç gerilme-morfoloji ilişkilerinin kontrolü ve üretim hatalarının önlenmesi açısından temel bir gerekliliktir [1-4].

Polimerlerin reolojik davranışı, polimer işleme teknolojilerinde en önemli üretim parametrelerinden birini oluşturmaktadır. Bir polimer eriyiğinin akışa ve deformasyona verdiği tepki; polimer zincirlerinin kimyasal yapısı, moleküler ağırlığı ve ağırlık dağılımı, kısa ve uzun zincir dallanması, zincirler arası dolaşıklık yoğunluğu yardımıyla belirlenmektedir. Polimer zincirlerinin birbirleriyle etkileşimini, hareketlerini ve uygulanan gerilme altında gevşeme mekanizmaları gibi mikro yapısal parametreler yardımıyla makro ölçekte gözlemlenen viskozite, viskoelastik modül, kesme incilmesi davranışı, elastik gerilme birikimi ve uzama altında sertleşme davranışı (strain hardening) gibi parametrelerle prosesin akış özellikleri açıklanır[1-5]. Polimer eriyikleri çoğunlukla yüksek molekül ağırlıkları ve geniş moleküler ağırlık dağılımları(MWD) nedeniyle belirgin bir şekilde Newtonyen olmayan (non-Newtonian) özellik gösterir. Bu özelliğin gereği olarak kesme hızı arttıkça viskozitenin azalması dolayısıyla kesme incilmesi, zamana bağlı viskozite değişimleri, geniş zaman ölçeklerine yayılan gerilme gevşemesi gibi elastik ve viskoz bileşenleri içeren kompleks viskoelastik davranışlar

ortaya çıkarır [1-6]. Bunun sonucunda malzemenin akış davranışı; basınç profilleri, sıcaklık dağılımları, kalıp dolum karakteristikleri, zincir yönlenmesi, kristalizasyon kinetiği ve son ürünün mekanik performansı üzerinde belirleyici etkiler oluşturur [7-9].

Polimerlerin ekstrüzyon süreçlerinde eriyik viskozitesinin kayma hızıyla gösterdiği değişim, özellikle kalıp içi basınç düşüşü, sıcaklık dağılımı, malzeme karışımının homojenliği ve son ürünün yüzey düzgünlüğü başta olmak üzere prosesin kritik parametrelerine doğrudan etki eder [10-12]. Polimerlerin enjeksiyon kalıplama işlemlerinde polimer eriyiğinin viskoelastik özellikleri; kalıp dolumunun tamamlanma dinamiklerini, parça içindeki büzülme davranışını, soğuma sırasında iç gerilme dağılımlarını ve soğuma sonrası geometrik şekil kararlılığı açısından belirleyici rol oynar [13-15]. Film şişirme ve fiber çekme gibi yönlendirilmiş akış olan süreçlerde polimer zincirlerinin gerilme altında yönlenmesi, kristal yapının belirgin şekilde değişmesiyle malzemenin Young modülü, optik berraklığı ve boyutsal stabilitesi gibi temel mekanik ve fiziksel özelliklerinin önemli ölçüde etkilenmesine neden olur[16]. Bu nedenle polimer reolojisinin doğru modellenmesi proses optimizasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Reolojik modeller, polimer eriyiklerinin kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisini ve viskozite profilini matematiksel olarak tanımlayarak proses tasarımında kullanılabilir hale getirir. Newtonyen olmayan polimer eriyiklerini açıklamak üzere geliştirilen Power-Law, Cross, Carreau-Yasuda ve Herschel-Bulkley modelleri, düşük ve yüksek kayma hızı rejimlerinin karakterizasyonunda literatürde en sık başvurulan modellerdir [17-20]. Özellikle Carreau-Yasuda modeli, viskozitenin düşük kayma hızırejimi, plato bölgesi, geçiş bölgesi ve yüksek kayma hızı rejimi gibi yapısal bölgeleri başarıyla temsil edebilmesi sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir [21].

Literatürde geniş kullanım alanı bulan reolojik modellerin laboratuvar koşullarında ya da pilot üretim süreçlerinden elde edilen deneysel verilere uyumlu olup olmadığını klasik lineer regresyon

yöntemleriyle tespit etmek mümkün olmadığı için gelişmiş sayısal optimizasyon tekniklerine ihtiyaç duyulur. Son yıllarda açık kaynak kodlu yazılımların yaygınlaşması ile birlikte Python, reolojik verilerin işlenmesi, modellenmesi ve grafiksel analizinde güçlü bir platform haline gelmiştir. Bunun yanında Python ticari yazılımların aksine daha esnek bir kullanım sunduğu için model geliştirme veri entegrasyonu oldukça kolaylaşmaktadır.

Bu çalışmada polimerlerin akış davranışları temel reolojik modeller göz önünde bulundurularak Python yardımıyla deneysel veriler işlenmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmanın amacı polimer reolojisinin modellenmesinde sayısal yöntemleri ele alarak proses ve laboratuvar koşullarında sistematik bir analiz yöntemi ortaya koymaktır. Bu çalışma ile, model tabanlı optimum koşulların belirlenmesine yönelik çalışmalara rehberlik etmesi hedeflenmiştir.

2. TEORİK ARKAPLAN

Polimerlerin reolojik davranışı, zincirlerin moleküler mimarisine bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. Moleküler ağırlık (M_w), zincir uzunluğu ve entanglement (dolanma) yoğunluğu viskoelastik davranışı belirleyen en önemli faktörlerdir. Yüksek moleküler ağırlıklı polimerler daha yoğun dolanım ağına sahip olduğu bu yüzden literatürde, sıfır kesme viskozitesinin (η_0) yaklaşık $\eta_0 \sim M_w^{3.4}$ olduğu belirtilmiştir. [5]. Bu durum, işleme sırasında daha fazla enerji gerektirse de son ürünlerde daha yüksek darbe dayanımı, eriyik mukavemeti (melt strength) ve şekil stabilitesi sağlar. Moleküler ağırlık dağılımı (MWD), zincirlerin gevşeme süreleri dağılımını belirlediği için, geniş MWD'ye sahip polimerlerde düşük hızlarda yüksek viskozite, yüksek hızlarda daha belirgin kayma incelmeleri davranışı gözlenir. Bu özellik, özellikle PP ve PE gibi poliolefinlerde proses stabilitesi açısından kritik bir avantaj sağlar [6,7].

Zincir dallanması (branching) polimer reolojisinin en belirleyici yapısal parametrelerinden biridir. Uzun zincir dallanması (LCB), özellikle

LDPE ve bazı özel PE sınıflarında erime gerilimini artırarak film şişirme, köpük üretimi ve gerilme altında uzama akışı gerektiren süreçlerde üstün performans sağlar. LCB'nin varlığı gerilme altında uzama akışı reolojik olarak malzeme uzadıkça daha fazla direnç gösterir ve sertleşir. Bu davranış, örneğin şişirme kalıplama (stretch-blow molding) veya fiber çekimi sırasında eriyik stabilitesinin sağlanmasında kritik öneme sahiptir [8–10]. Buna karşılık kısa zincir dallanması (SCB) kristal yapı, yoğunluk ve morfolojiyi etkilerken, viskoelastik davranış üzerinde daha sınırlı bir etkiye sahiptir. Polietilen türleri arasındaki davranış farklarının (HDPE, LDPE, LLDPE) önemli bir bölümü doğrudan dallanma yapılarından kaynaklanmaktadır.

Polimer eriyiklerinin makroskopik viskoelastik özelliklerini açıklamak için geliştirilen reptasyon teorisi, zincirlerin bir tüp benzeri idealize edilmiş kısıtlı ortamda hareket ettiğini varsayarak gevşeme davranışını tanımlar. Doi–Edwards modeli olarak bilinen bu kuram, hem lineer hem de lineer olmayan viskoelastisiteyi açıklamada önemli bir kilometre taşıdır ve günümüzde geliştirilen Pom–Pom, Giesekus, DEMG gibi konstitütif modellerin temelini oluşturmuştur [11–13]. Bu modeller, polimer zincirlerinin uzama, oryantasyon, kayma hızına bağlı incelleme, stres büyümesi gibi fenomenleri matematiksel olarak açıklamayı amaçlar.

2.1. Polimer Zincir Yapıları ve Reoloji

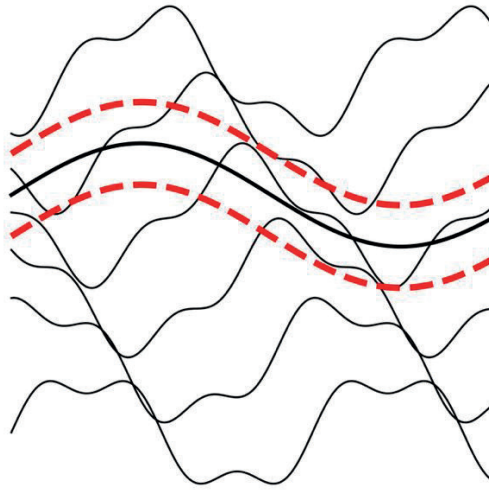
Polimer zincirlerinin mimarisi (molecular architecture), eriyik hâlindeki viskoelastik davranışın temel belirleyicisidir. Zincirlerin uzunluğu, dallanma derecesi, moleküler ağırlık dağılımı ve dolanım yoğunluğu; hem lineer hem de non-lineer reolojiyi doğrudan etkiler.

Lineer polimerlerde zincirler uç uca bağlı monomerlerden oluşur ve dallanma içermez. Polietilen (HDPE), polistiren (PS) ve birçok mühendislik plastiği bu gruba girer. Lineer polimerlerde zincirler, dolanım ağı içinde reptasyon (yılanvari hareket) ile gevşer.

Lineer polimerlerin reolojik özelliklerini 3 ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar:

- Yüksek moleküler ağırlıkta $\eta_0 \sim M_v^{3.4}$ bağıntısına uyan sıfır kesme viskozitesi artışı gösterirler
- Geniş bir frekans aralığında belirgin viskoelastik geçişe sahiptirler.
- Dolanım yoğunluğunun artmasına paralel olarak gevşeme süreleri uzar.

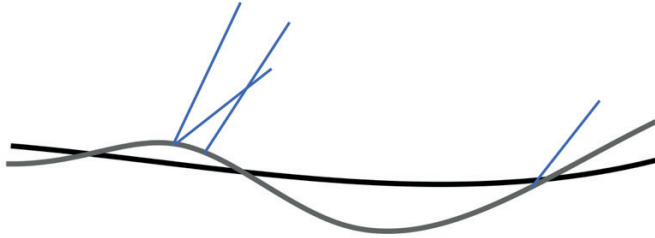
Lineer zincirlere sahip polimerlerin temel davranışı Doi-Edwards tüp modeli ile başarılı biçimde açıklanmıştır [1-3]. Bu modele ait görsel Şekil 1.'de verilmiştir.



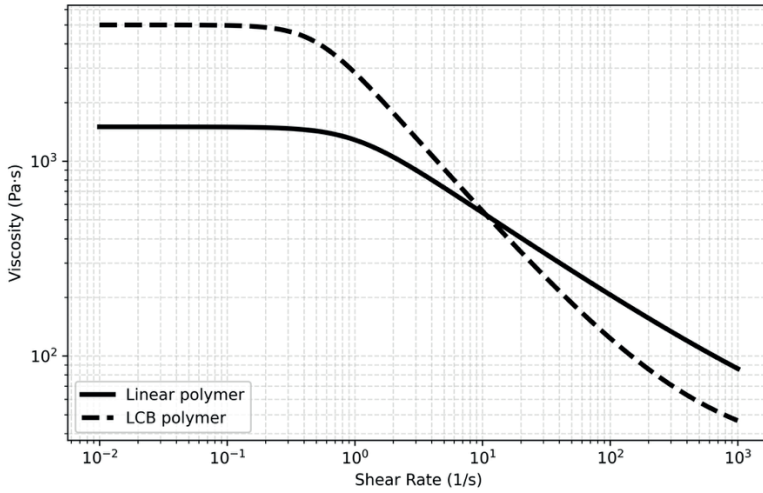
Şekil 1. Doi-Edwards Tüp Modeliyle Lineer Polimer Zinciri içinde Dolanım Ağının Temsili Gösterimi

Polimer zincir mimarisinde dallanma(branching), reolojik özellikleri çok ciddi şekilde değiştirir. Polimerlerde dallanma kısa zincir dallanması(SCB) ve uzun zincir dallanması(LCB) iki ana grupta

sınıflandırılabilir. Kısa zincir dallanmasına LLDPE gibi polimerler örnek olarak verilebilir. Bu tip polimerlerde kristalinitesi, yoğunluğu ve erime davranışları bu dallanmaya bağlı olarak etkilenir. Özellikle LDPE gibi uzun zincir dallanmaya sahip polimerlerin uzama deformasyonu altındayken gerilme beklenenden daha hızlı artar. Yüksek erime gerilimine sahip olması nedeniyle film şişirme prosesleri için avantaj sağlar. Başlangıç kesme testlerinde uzun zincir dallanma nedeniyle belirgin bir stres büyümesi görülür. Aynı zamanda uzun zincir dallanmaya sahip polimerler uzun gevşeme zamanlarına ve geniş dağılımlı relaksasyon spektrumuna sahiptirler. Uzun zincir dallanma polietilenler arasında performans farklılığının en temel sebeplerinden biridir. Uzun zincir dallanmanın etkisi tüp modeline ek olarak Pom-Pom modeli gibi moleküler reoloji modelleriyle tanımlanmaktadır[4-6]. Şekil 2.'de temsili olarak dallanmış zincir polimer ve lineer polimerlerin reolojik özellikleri karşılaştırıldığında Şekil 3.'de gösterimine benzer bir davranış gösterir.



Şekil 2. Lineer ve Uzun Zincir Dallanmış (LCB) Polimerlerin Temsili Gösterimi



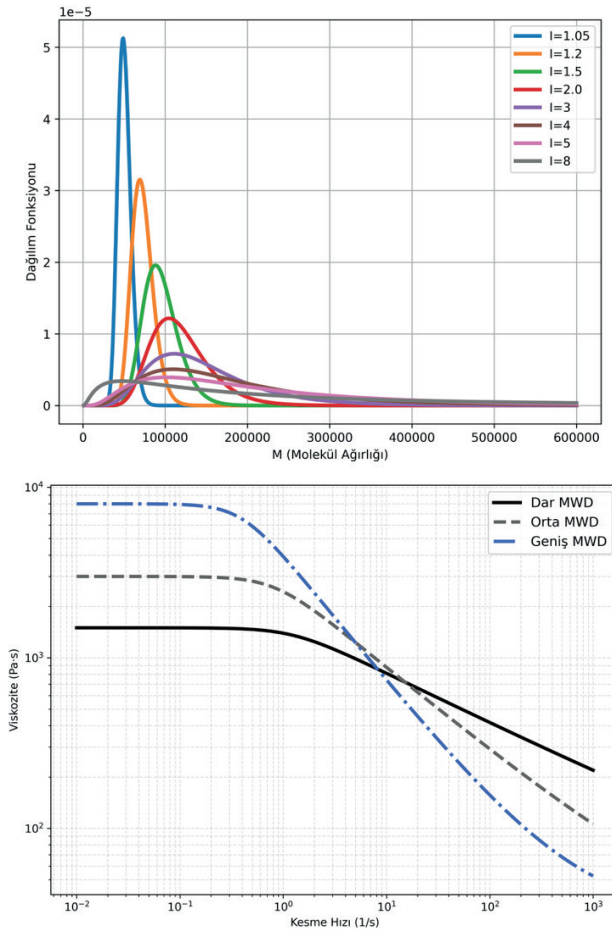
Şekil 3. LCB ve Lineer Polimerlerin Temsili Olarak Reolojik Davranışı

2.2. Moleküler Ağırlık Dağılımı (MWD) ve Dolanım Yoğunluğu

Moleküler ağırlık dağılımı, zincirlerin uzunluk dağılımını gösterir ve polimerlerin viskoelastik davranışını belirgin biçimde etkiler. Bu durum Şekil 4'te temsili olarak gösterilmiştir. Geniş bir moleküler ağırlık dağılımına sahip polimerlerde yani hem çok uzun hem de kısa zincirler içeriyorsa, bu durum sıfır-kesme viskozitesinin (η_0) yükselmesine ve farklı uzunluktaki zincirlerin değişik hızlarda gevşemesi nedeniyle daha belirgin kesme incelmeleri davranışının ortaya çıkmasına yol açar. Buna karşılık dar moleküler ağırlık dağılımı gösteren polimer sistemlerinde zincir boyları birbirine daha yakın olması yani daha homojen olması viskozite kesme hızı eğrileri daha keskin geçişli olarak gözlemlenir. PP ve PE gibi endüstriyel polimerlerde Ziegler-Natta ve metallocene katalizörleri ile yapılan üretimlerde MWD'nin şekillenmesi, malzemenin işlenebilirliği ve ürün performansını belirleyen ana faktörlerden biridir [1, 4, 5, 22].

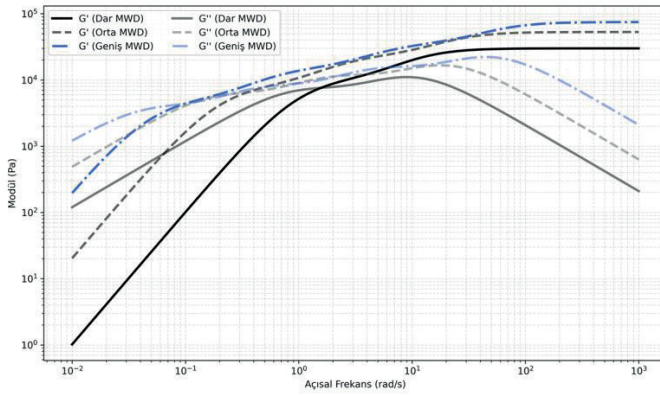
Öte yandan dolanıklık yoğunluğu polimer zincirleri arasında fiziksel düğüm noktalarının sayısını temsil eder ve eriyiklerin elastik modülü, gevşeme dağılımı ve uzun zamanlı viskoelastik davranışlarını belirleyen

önemli bir unsurdur. Daha yüksek dolanım yoğunluğu, polimer zincir hareketliliğinin kısıtlayıcı etki gösterir bunun sonucunda elastik bileşenler artar, daha uzun gevşeme sürelerine ve makroskopik olarak eriyik malzeme katı forma yakın bir davranış karakteri gösterir. Genel olarak MWD ve dolanım yoğunluğu, polimerlerin reolojik özelliklerini, polimerlerin işleme kolaylıklarının değerlendirilmesi konusunda birbirini tamamlayan son derece önemli iki kritik göstergedir[22].



Şekil 4. Moleküler Ağırlık Dağılımının (MWD) polimer eriyik reolojisine etkisinin karşılaştırması (Sanal olarak Macosko (1994) te yer alan grafikler göz önüne alınarak oluşturulmuştur)

Şekil 4'te, dar, orta ve geniş MWD'ye sahip örnek sistemler için Carreau–Yasuda modeli kullanılarak elde edilen viskozite–kesme hızı eğrileri gösterilmektedir. Geniş MWD, yüksek moleküler ağırlıklı fraksiyonların varlığı nedeniyle daha yüksek sıfır–kesme viskozitesi (η_0) ve belirgin kesme incelmesi davranışı sergilerken, dar MWD düşük η_0 ve sınırlı Newtonyen olmayan karakter göstermektedir. Orta MWD sistemler ise her iki davranış arasında ara bir profil sunmaktadır. Eğriler, polimer zincir uzunluğu dağılımının eriyik akış özellikleri üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamaktadır.



Şekil 5. MWD'nin Polimer Eriyiklerinin Dinamik Modül Davranışı Üzerine Etkisinin Temsili Gösterimi.

Dar, orta ve geniş MWD'ye sahip modeller için hesaplanan depolama modülü (G') ve kayıp modülü (G'') eğrileri bir genelleştirilmiş Maxwell yaklaşımı kullanılarak gösterilmiştir. Dar MWD'de sınırlı bir relaksasyon zamanı spektrumu nedeniyle G' ve G'' keskin geçiş bölgeleri sergilerken, geniş MWD sistemlerinde çoklu relaksasyon modları hem G' plato bölgesini genişletmekte hem de G'' eğrisinin terminal rejime dönüşünü geciktirmektedir. Bu sonuçlar, polimer zincir uzunluğu dağılımının viskoelastik yanıtı ve dolanım dinamiklerini belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir.

3. POLİMERLERİM REOLJİK DAVRANIŞI VE MATEMATİK MODELLER

3.1 Newtonyen Model (Referans Model)

Newtonyen akış denklemi, düşük kesme hızlarında veya çok düşük molekül ağırlıklı polimerlerde geçerli olan en basit akış modelidir:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

Burada η sabit viskozite olup kesme hızına bağlı değildir. Polimerler için yalnızca Newtonyen plato bölgesinde geçerlidir ($\omega\tau \ll 1$ veya $\dot{\gamma} \rightarrow 0$) [19].

3.2. Ostwald–de Waele (Power-Law) Model

Power-law modeli Newtonyen olmayan davranışları açıklamak için kullanılır:

$$\eta(\dot{\gamma}) = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

$n < 1$: kesme incilmesi (polimer eriyikleri için tipik)

$n > 1$: kesme kalınlaşması

Bu model orta kesme hızlarında uygundur, düşük ve yüksek kesme hızlarında uyumlu değildir[23].

3.3. Cross Model

Cross modeli, viskozitenin düşük ve yüksek kesme hızları arasında geçiş yaptığı bölgeyi tanımlar[8]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1 + (k\dot{\gamma})^m} \quad (3)$$

Burada:

η_0 : sıfır-kesme viskozitesi

k: karakteristik zaman katsayısı

m: shear-thinning eğim parametresi

3.4. Carreau Modeli

Carreau modeli, polimer eriyiklerinde düşük ve yüksek kesme hızlarını başarıyla tanımlar[17]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (4)$$

Burada:

n: shear-thinning indeksi

λ : relaksasyon zamanı ile ilişkili geçiş parametresi

3.5. Carreau–Yasuda Modeli (En çok kullanılan Non-Newtonian model)

Polimer eriyikleri için en başarılı ampirik modellerden biridir[18]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (5)$$

Burada a geçiş bölgesinin keskinliğini belirler. PE, PP, PS ve elastomerlerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılır[18].

3.6. Arrhenius Sıcaklık Bağımlılığı

Polimer eriyikleri sıcaklığa oldukça duyarlıdır. Sıcaklık değişiminin viskoziteye etkisi, Arrhenius tipi bağıntı ile açıklanabilir:

$$\eta(T) = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

Burada:

E_a : aktivasyon enerjisi

R : gaz sabiti

Yarı-kristalin polimerlerde (PP, PE) yüksek sıcaklık aralığında iyi çalışır[2].

3.7. Williams–Landel–Ferry (WLF) Denklemi — Time–Temperature Superposition

Amorf polimerlerin cam geçişine yakın sıcaklıklarda en doğru sıcaklık bağımlılığı modelidir:

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_{\text{ref}})}{C_2+(T-T_{\text{ref}})} \quad (7)$$

Burada a_T frekans veya zaman ekseninde yatay kayma faktörüdür[24].

3.8. Pom–Pom Modeli (Dallanmış Polimerler İçin)

Pom–Pom modeli, uzun zincir dallanması (LCB) içeren polimerlerin doğrusal olmayan viskoelastisitesini açıklamak için geliştirilmiştir:

$$\lambda \frac{d\mathbf{A}}{dt} = -\frac{1}{\tau_b} (\mathbf{A} - \mathbf{I}) - \frac{1}{\tau_s} (f(\mathbf{A}) - \mathbf{A}) \quad (8)$$

Burada:

τ_s : zincir gerilmesinin relaksasyon zamanı

τ_b : backbone relaksasyon zamanı

$\mathbf{A}$: çarpılma tensörü

Bu model özellikle metallocene PE ve H-tipi dallanmış PP için gerçekçi sonuçlar verir[3].

3.9. Giesekus Modeli (Elastoviskoz polimer çözeltileri ve eriyikleri)

Fiziksel anlam taşıyan diferansiyel bir konstitütif modeldir:

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \dot{\boldsymbol{\tau}} + \alpha \frac{\lambda}{\eta_0} \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\tau} = \eta_0 \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (9)$$

Burada:

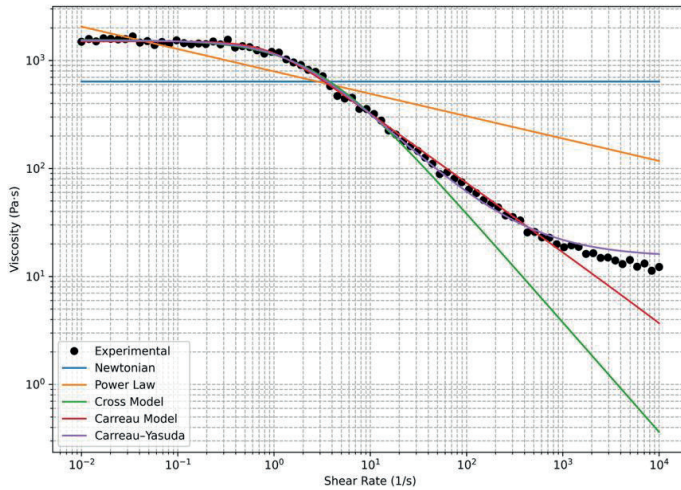
α : anisotropik sürüklenme parametresi (0–1)

λ : relaksasyon zamanı

η_0 : sıfır-kesme viskozitesi

Kesme incelmesi ve normal gerilme farklarını aynı anda açıklayabilir[25].

Polimer eriyiklerinin simülasyon verileri kullanılarak belli başlı model denklemlerinin sanal deney verileri ile uyumu ve karşılaştırması Şekil 6’ da verilmiştir.



Şekil 6. Simülasyon Verileri Kullanılarak Reolojik Modellerin Karşılaştırılması

4. POLİMERLERİN REOLOJİK DAVRANIŞI VE DENEYSEL TEKNİKLER

Polimerlerin reolojik karakterizasyonu için genel olarak dönel (rotasyonel) reometre ve kapiler reometre analizleri ile yapılır. Özellikle rotasyonel reometri, polimerik sistemlerin davranışını değerlendirmede kritik öneme sahiptir ve genellikle iki tamamlayıcı ölçüm türü sürekli kesme (steady-shear) deneyleri ve küçük genlikli osilasyonel kesme deneyleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu yöntemler, malzemelerin kayma viskozitesi, akma davranışı, depolama ve kayıp modülleri, relaksasyon spektrumu ve zaman-sıcaklık üstüste bindirme özellikleri gibi temel reolojik parametrelerin belirlenmesini sağlar.

Rotasyonel reometri, polimer eriyikleri, çözeltileri ve kompleks akışkanların viskozite ve viskoelastik özelliklerini belirlemek için kullanılan en yaygın reolojik karakterizasyon yöntemlerinden biridir. Bu teknikte numune, kontrollü bir kayma deformasyonuna veya kayma gerilmesine maruz bırakılır ve malzemenin verdiği tepki ölçülerek akış davranışı nicel olarak analiz edilir. Dönel reometreler, kesme hızının, kesme geriliminin veya uygulanan torkun hassas şekilde kontrol edilmesine olanak tanır; böylece Newtonyen, kayma incelmesi, akma gerilmesi ve viskoelastik özellikler yüksek doğrulukla belirlenebilir [1–3]. Tipik bir rotasyonel reometride kullanılan Lamy marka konik plaka reometre cihazı Şekil 6.'da gösterilmiştir.



Şekil 7. Lamy Konik Plaka RM200 CP4000 Plus Reometre Cihazı

Rotasyonel reometrelerde reolojik ölçümler, örnek üzerine tanımlı bir kesme deformasyonu uygulamak amacıyla bir plaka, konik-plaka veya eşmerkezli silindir gibi belirli bir geometri elemanının kontrollü bir açısal hız (ω) ile döndürülmesi esasına dayanır. Cihaz, uygulanan torku (M) yüksek hassasiyetle ölçerek bunu kesme gerilimine (τ) dönüştürür. Benzer şekilde geometrinin açısal hızı, numune içerisindeki kesme hızına ($\dot{\gamma}$) dönüştürülür; bu dönüşüm geometrinin yapısına bağlı kapalı form ifadelerle tanımlanır. Elde edilen verilerden, akışkanın anlık viskozitesi temel ilişki kullanılarak hesaplanır:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (10)$$

Modern rotasyonel reometreler hem stress-controlled (gerilme kontrollü) hem de strain-controlled (deformasyon kontrollü) modlarda çalışabilme kapasitesine sahiptir. Gerilme kontrollü mod, özellikle düşük viskoziteli sıvıların ve akma gerilmesi içeren materyallerin incelenmesinde avantaj sağlarken; deformasyon kontrollü mod, viskoelastik davranışın ve lineer/non-lineer rejimlerin ayrıntılı olarak karakterize edilmesini mümkün kılar. Bu çift yönlü kontrol kabiliyeti sayesinde, sistemler düşük viskoziteli Newtonyen akışkanlardan, yoğun dolanıklık içeren polimer eriyiklerine ve jel benzeri kompleks akışkanlara kadar geniş bir malzeme grubu incelenebilir.

Rotasyonel reometri bu nedenle polimer biliminde; viskozite-kesme hızı ilişkisi, kayma incelenmesi (shear-thinning), viskoelastik modüller, relaksasyon davranışı, yapı-reoloji ilişkileri ve zaman-sıcaklık üstüste bindirme (TTS) analizleri gibi çok sayıda kritik parametrenin belirlenmesinde temel bir araç olarak kullanılmaktadır.

Rotasyonel reometreler, numunenin reolojik özelliklerini doğru ve tekrarlanabilir biçimde belirlemek amacıyla farklı geometri tasarımlarıyla donatılmıştır. Geometri seçimi; numunenin viskozitesi, yapısal bütünlüğü, uçucu bileşen içeriği, zaman-bağımlı davranışları ve sıcaklık kontrol gereksinimlerine bağlı olarak kritik öneme sahiptir. En yaygın kullanılan

dört geometri paralel plaka, konik-plaka, eşmerkezli silindir (Couette) ve double-gap geometri sistemleridir [1–4].

Paralel plaka geometrisi, özellikle orta-yüksek viskoziteli polimer eriyikleri, reçineler, jeller ve kompozit pastalar için yaygın olarak tercih edilir. Numune, iki paralel plaka arasına yerleştirilir; üst plakanın döndürülmesi ile kesme deformasyonu uygulanır. Bu geometri; kolay numune yükleme, yüksek sıcaklık kontrolü, dolgu içeren sistemlerde homojen kesme dağılımı gibi avantajlara sahiptir.

Matematiksel olarak kesme hızı:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega R}{h} \quad (11)$$

burada R plaka yarıçapı, h numune kalınlığıdır.

Konik-plaka geometrisi, sabit kesme hızı dağılımı sağlaması nedeniyle literatürde en çok tercih edilen geometri tasarımlarından biridir. Koninin yarım açısı tipik olarak 1° – 4° arasındadır. Kesme hızı tüm numune boyunca sabittir:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{\alpha} \quad (12)$$

burada α koni açısıdır.

Eşmerkezli silindir geometrisi, özellikle düşük viskoziteli akışkanlar, süspansiyonlar ve zaman-bağımlı reolojik davranışlar (thixotropy, reopexy) için en uygun geometridir. İç silindirin döndürülmesiyle kesme uygulanır ve kesme hızı:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (13)$$

ile ifade edilir.

Sürekli kesme deneyleri, bir polimer eriyiğinin farklı kesme hızları ($\dot{\gamma}$) altında verdiği viskoz yanıtı belirlemek amacıyla yapılır. Bu teknikle elde edilen viskozite-kesme hızı eğrisi, malzemenin Newtonyen veya Newtonyen olmayan karakterini ortaya koyar. Düşük kesme hızlarında polimerler çoğunlukla sabit bir viskozite sergileyerek Newtonyen plato (η_0) davranışı gösterirken; kesme hızı arttıkça zincir yönlenmesi ve dolanım çözülmesi nedeniyle viskozite azalır ve kesme incilmesi bölgesi gözlenir.

Kesme incilmesi davranışı tipik olarak Carreau-Yasuda veya Cross modeli gibi ampirik modellerle karakterize edilir:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (14)$$

Terim	Açıklama	Fiziksel Anlamı
(η_0)	Sıfır-kesme viskozitesi	Newtonyen plato, zincir serbestliği yüksek
(η_{∞})	Sonsuz hız viskozitesi	Zincir hizalanması sonucu minimum viskozite
(λ)	Zaman sabiti	Kesme incilmesi başlangıç noktası
(n)	Güç yasası indeksi	Kesme incilmesi şiddeti
(a)	Geçiş parametresi	Newtonyen $\rightarrow$ Newtonyen olmayana geçiş eğimi

Bu deneyler ayrıca akma gerilmesi, akma davranışı, sıcaklık-viskozite ilişkisi ve zincir mimarisine bağlı reolojik değişimleri belirlemede önemli rol oynar. Sürekli kesme ölçümleri polimer proseslerinin (ekstrüzyon, kalıplama, film üfleme) tasarımı için gerekli olan temel akış parametrelerini sağlar [2,5].

Küçük genlikli osilasyonel kesme deneyleri ölçümleri (Small-Amplitude Oscillatory Shear (SAOS)), polimerlerin lineer viskoelastik davranışını karakterize etmek için kullanılan en temel reolojik

yöntemlerden biridir. Bu teknikte numuneye düşük genlikli, sinüzoidal bir kesme deformasyonu uygulanır:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (15)$$

Burada γ_0 deformasyon genliği, ω ise açısal frekanstır. Uygulanan bu küçük genlikli deformasyon altında, malzemenin verdiği yanıt lineer rejimde kalır ve iki temel modül parametresi ile tanımlanır. Bunlardan ilki Depolama modülü (G') malzemenin elastik enerji depolama kapasitesini temsil eder. Zincirlerin geri çağırıcı (recoverable) deformasyona katkısını açıklar. Diğerisi ise Kayıp modülü (G'') enerjinin viskoz bileşen tarafından kaybedilen kısmını ifade eder ve zincir hareketliliği ile moleküler sürtünmeyi temsil eder.

Bu iki modülün oranı $\tan \delta$ olarak tanımlanır:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (16)$$

Tan δ değeri, viskoz ve elastik bileşenlerin göreceli baskınlığını belirlemede kullanılır. Ayrıca SAOS verilerinden kompleks viskozite η^* hesaplanabilir:

$$\eta^* = \frac{\sqrt{G'^2 + G''^2}}{\omega} \quad (17)$$

SAOS ölçümleri, polimer zincirlerinin relaksasyon davranışına ilişkin değerli bilgiler sağlar. Elde edilen verilerden relaksasyon spektrumu, yani malzemenin moleküler hareketlilik zaman ölçekleri çıkarılabilir. Relaksasyon spektrumu, özellikle: dolaşıklık yoğunluğu, zincir uzunluğu, dallanma türü ve yoğunluğu, moleküler mimarisi gibi mikroyapısal özellikleri yansıtır.

Bu nedenle SAOS, polimerlerin moleküler yapıları ile makroskopik reolojik yanıtları arasındaki ilişkiyi ortaya koymada en güçlü deneysel araçlardan biri olarak kabul edilir. SAOS eğrileri ($G'-G''-\tan \delta$),

polimerlerin Rouse rejimi, dolaşıklık platosu, terminal akış rejimi gibi karakteristik dinamik bölgelerini açık biçimde gösterir [1–6].

4.1 Çok-Modlu Maxwell Modeli

Polimer eriyiklerinin lineer viskoelastik davranışını tanımlamak için yaygın olarak uygulanan modellerden birisi de çok-modlu Maxwell modelidir. Bu modelde polimer, farklı zaman ölçeklerinde gevşeyen (relaxing) viskoelastik birimlerin süperpozisyonu olarak ele alınır. Her bir Maxwell elemanı, bir elastik yay (modül G_i) ile bir viskoz elemanın (relaksasyon zamanı τ_i) seri bağlanmış karşılığıdır. Polimerin toplam gerilme gevşeme fonksiyonu:

$$G(t) = \sum_{i=1}^N G_i e^{-t/\tau_i} \quad (18)$$

şeklinde ifade edilir. Bu gösterimde:

G_i : i 'inci Maxwell modunun elastik modülü

τ_i : ilgili modun karakteristik relaksasyon zamanı

N : kullanılan toplam Maxwell mod sayısıdır

Bu model, polimerlerin makroskopik viskoelastik davranışını moleküler düzeyde etkileyen başlıca fiziksel süreçleri, molekül ağırlık dağılımını (MWD), zincir dolaşıklığı yoğunluğunu, zincir mobilitesini ve segmental hareketleri, kısa ve uzun zincir dallanması etkilerini yalın fakat güçlü bir matematiksel yapı ile temsil eder. Tek-modlu modeller yalnızca tek bir gevşeme sürecini açıklarken, polimer zincirleri çok farklı zaman ölçeklerinde gevşediği için çok-modlu Maxwell modeli polimerler için daha gerçekçi bir tanımlama sunar.

Gerilme gevşeme fonksiyonu $G(t)$ bilindiğinde, bunun Fourier dönüşümü alınarak SAOS deneylerinde ölçülen depolama modülü (G') ve kayıp modülü (G'') matematiksel olarak elde edilir. Çok-modlu Maxwell

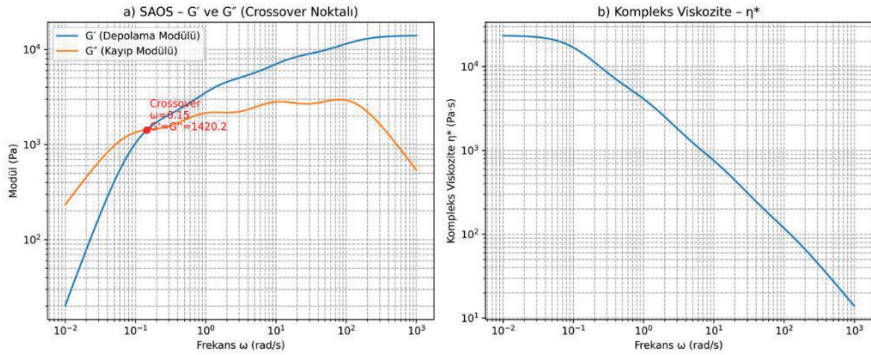
modelinin frekans uzayındaki analitik karşılıklarına baktığımızda Depolama Modülü (Elastik enerji depolama) için:

$$G'(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{G_i (\omega \tau_i)^2}{1 + (\omega \tau_i)^2} \quad (19)$$

Bu ifade, polimerin uygulanan sinüzoidal deformasyona verdiği geri çağırıcı (elastik) yanıtı temsil eder. Düşük frekanslarda zincirler gevşeyebildiği için G' küçüktür. Frekans arttıkça zincir hareketliliği kısıtlanır ve G' elastik platoya yükselir. Kayıp Modülü (Viskoz enerji kaybı) için:

$$G''(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{G_i (\omega \tau_i)}{1 + (\omega \tau_i)^2} \quad (20)$$

Bu ifade, deformasyon sırasında viskoz enerji kaybı ile ilişkili terimi tanımlar. Düşük frekansta viskoz davranış baskındır yani G'' yüksektir. Orta frekansta G'' maksimum yapar ve yüksek frekansta polimer zincir hareketi kısıtlandığı için G'' azalır. Şekil 7'de Simülasyon verileri kullanılarak Maxwell modelinden elde edilen tipik SAOS Grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 8. Simülasyon Verileri Kullanılarak Maxwell Modelinden Elde Edilen Tipik SAOS Grafikleri

Polimer eriyiklerinin lineer viskoelastik davranışlarını tanımlamada yaygın olarak kullanılan modeller, moleküler hareketliliğin sıcaklıkla değişimini hesaba katan termo-reolojik ilkelerle birlikte ele alındığında daha kapsamlı bir fiziksel çerçeve sunar. Bu bağlamda Maxwell modeli, Time-Temperature Superposition (TTS) prensibi ve Williams-Landel-Ferry (WLF) denklemi birbiriyle doğrudan ilişkilidir ve polimer zincir dinamiklerinin çok ölçekli karakterini anlamak için birlikte değerlendirilmelidir.

TTS'nin temel varsayımı, sıcaklığın viskoelastik modülleri yalnızca zaman ölçekleyen bir faktör üzerinden etkilediğidir. Farklı sıcaklıklarda ölçülen SAOS verileri yatay kaydırma faktörü (a_T) ile üst üste getirilir:

$$\omega_{\text{shift}} = \omega a_T \quad (21)$$

Sıcaklık arttıkça frekans eksenini sağa doğru kayar (daha hızlı dinamikler). Bu kaydırma faktörü amorf polimerlerde T_g üzerinde WLF bağıntısıyla modellenir:

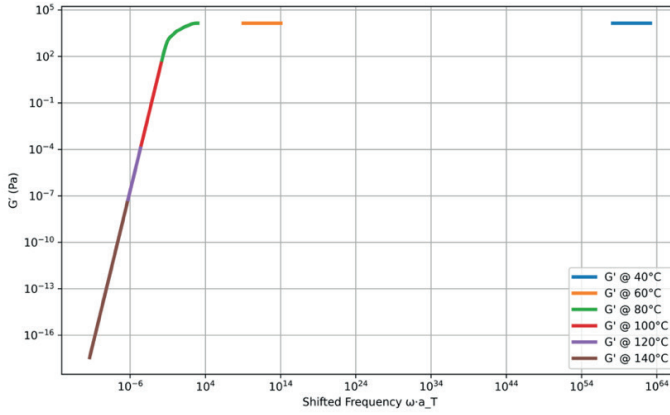
$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_{\text{ref}})}{C_2+(T-T_{\text{ref}})} \quad (22)$$

Burada:

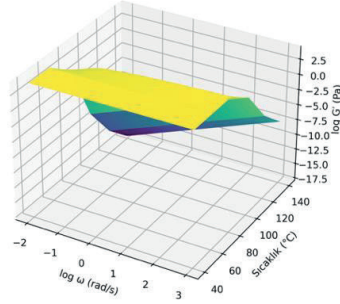
$C_1, C_2 \rightarrow$ polimere özgü WLF sabitleri

$T_{\text{ref}} \rightarrow$ master curve için seçilen referans sıcaklık

WLF modeli, viskoelastik davranışın sıcaklıkla nasıl hızlandığını moleküler seviyede tanımlar. Segmental hareketliliğin aktivasyon enerjisi sıcaklıkla değiştiği için relaksasyon zamanları logaritmik olarak ölçeklenir. Şekil 8'de Simülasyon verileri yardımıyla Time Temperature Superposition (TTS) WLF Master eğri grafiği oluşturulmuştur. Şekil 9'da ise simülasyon verileri yardımıyla 3D Viskoelastik yüzey grafiği elde edilmiştir.



Şekil 9. Simülasyon Verileri Kullanılarak Time Temperature Superposition (TTS) WLF Master Grafiği



Şekil 10. Simülasyon Verileri Kullanılarak 3D Viskoelastik Yüzey Grafiği

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada polimer eriyiklerinin lineer ve nonlinear viskoelastik davranışı, hem matematiksel modelleme hem de sayısal analiz yöntemleri kullanılarak kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Reolojik karakterizasyon; kesme akışı modelleri, çok-modlu Maxwell temelli lineer

viskoelastisite, sıcaklık bağımlı viskoelastik davranış (TTS–WLF), ve frekans–relaksasyon zamanı ilişkisini temsil eden 3D viskoelastik yüzey analizleri ile bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır.

Öncelikle, Newtonyen, Power–Law, Cross, Carreau ve Carreau–Yasuda modelleri gibi Newtonyen olmayan viskozite modelleri sentetik veri üzerinde değerlendirilmiş ve kesme incelmesi davranışının doğru temsil edilmesi açısından Carreau–Yasuda modelinin en yüksek uyumu sağladığı görülmüştür. Bu model, geçiş bölgesinin eğimini kontrol eden a parametresi sayesinde geniş kesme hızı aralıklarında fiziksel ve matematiksel doğruluk sunarak polimer işleme uygulamaları açısından en kararlı performansı göstermiştir.

Doğrusal viskoelastisite bölgesinde ise polimer zincir dinamikleri çok-modlu Maxwell modeli ile temsil edilmiştir. Çoklu relaksasyon zamanlarından oluşan Maxwell spektrumu, polimerlerin moleküler ağırlık dağılımı, dolaşıklık yoğunluğu ve zincir hareketliliği hakkında temel mikroyapısal bilgiler sağlamıştır. Bu spektrum, SAOS deneylerini temsil eden $G'(\omega)$ ve $G''(\omega)$ fonksiyonlarının frekans bağımlı davranışlarını başarıyla yeniden üretmiştir.

Sıcaklık bağımlı viskoelastik davranış Time–Temperature Superposition (TTS) ilkesi ile değerlendirilmiş, Williams–Landel–Ferry (WLF) denklemi kullanılarak farklı sıcaklıklarda elde edilen SAOS verileri için yatay kaydırma faktörleri hesaplanmış ve geniş frekans aralığını kapsayan bir master eğri elde edilmiştir. TTS uygulaması sonucunda düşük frekans bölgesinde terminal akış, orta frekansta dolaşıklık platosu ve yüksek frekans bölgesinde cam geçişine yakın elastik yükseliş net bir şekilde gözlenmiştir. Bu davranışlar polimer zincirlerinin sıcaklığa bağlı hareketliliği, segmental dinamikler ve dolaşıklık ağının sıcaklıkla ölçeklenmesi açısından literatürdeki teorik beklentiyle tam uyum göstermektedir.

Çalışmanın bir diğer önemli katkısı, çok-modlu Maxwell modelinden elde edilen verilerin üç boyutlu yüzey grafiklerine dönüştürülmesidir. $\text{Log}(\tau)$ – $\text{log}(\omega)$ – $\text{log}(G')$ eksenleri üzerinden üretilen 3D viskoelastik yüzeyler, polimer mimarisinin relaksasyon modları üzerindeki etkisini görsel olarak ortaya koymakta ve zincir dinamiklerinin relaksasyon zamanına bağlı nasıl değiştiğini kapsamlı bir biçimde göstermektedir. Bu tür grafikler özellikle geniş molekül ağırlığı dağılımına sahip polimerlerde, dolaşıklık spektrumunun şekli, relaksasyon modlarının genişliği ve viskoelastik geçiş bölgelerinin mekanizmasını ortaya koymak açısından önemli bir analiz aracıdır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, hem kesme akışı hem de osilasyonel reoloji modelleri, polimer eriyiklerinin reolojik davranışının farklı yönlerini temsil etmektedir. Newtonyen olmayan viskozite modelleri, yüksek kesme akışı altında polimer işleme davranışını açıklamada etkili olurken; Maxwell tabanlı viskoelastik modeller ve TTS analizi, polimer zincir dinamiklerinin moleküler seviyedeki davranışını çözümlemeye olanak sağlamaktadır. Bu iki yaklaşım birlikte değerlendirildiğinde, polimer reolojisini hem proses kontrolü hem de moleküler mühendislik açısından bütüncül olarak anlamak mümkün olmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma, polimer eriyiklerinin akış ve viskoelastik davranışlarını anlamak için kullanılan temel modelleri, sıcaklık bağımlı viskoelastisiteyi temsil eden sayısal yöntemleri bütünleştiren kapsamlı bir analiz sunmuştur. Elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Carreau–Yasuda modeli, shear-thinning davranışının doğru temsil edilmesi açısından diğer tüm viskozite modellerini geride bırakmış ve polimer işleme simülasyonlarında kullanılmak üzere en dengeli ve güvenilir model olarak öne çıkmıştır.

Çok-modlu Maxwell modeli, polimerin relaksasyon spektrumunu yüksek doğrulukla temsil ederek zincir dinamikleri, dolaşıklık yapısı ve moleküler mimari hakkında temel bilgiler sağlamıştır.

TTS (Time–Temperature Superposition) ve WLF sıcaklık kaydırma denklemi kullanılarak farklı sıcaklıklardaki veriler tek bir master curve altında birleştirilmiş, böylece geniş bir frekans aralığında polimerin viskoelastik davranışı ortaya konmuştur.

Üretilen 3D viskoelastik yüzey grafiği, malzeme tasarımı ve polimer mimarisinin reolojik etkilerinin anlaşılması açısından önemli bir araçtır.

Genel olarak bu çalışma, polimer reolojisinin hem mikroskobik (moleküler dinamikler, dolaşıklık) hem de makroskobik (viskozite, modüller, proses davranışı) yönlerini bir araya getiren bütünlük bir yaklaşım sunmuş ve polimer mühendisliği, proses optimizasyonu ve malzeme tasarımı açısından yüksek düzeyde uygulanabilir bir analiz çerçevesi ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Larson, R. G. *The Structure and Rheology of Complex Fluids*. Oxford University Press, 1999.
- [2] Ferry, J. D. *Viscoelastic Properties of Polymers*. Wiley, 1980.
- [3] McLeish, T. C. B. “Tube theory of entangled polymers.” *Advances in Physics*, 51, 1379–1527 (2002). doi:10.1080/00018730210153229
- [4] Dealy, J. M., & Wang, J. *Structure and Rheology of Molten Polymers*. Hanser Publishers, 2013.
- [5] Rubinstein, M., & Colby, R. H. *Polymer Physics*. Oxford University Press, 2003.
- [6] Macosko, C. W. *Rheology: Principles, Measurements, and Applications*. Wiley-VCH, 1994.
- [7] Dealy, J. M., & Wissbrun, K. F., *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing*. Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [8] Cross, M. M., “Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems.” *J. Colloid Sci.*, 20, 417–437, 1965. doi:10.1016/0095-8522(65)90022-X
- [9] Wagner, M. H., “Rheology of Branched Polymers.” *J. Rheology*, 45, 138–148, 2001.
- [10] Denn, M. M., “Extrusion instabilities and wall slip.” *Annual Review of Fluid Mechanics*, 33, 265–287, 2001. doi: 10.1146/annurev.fluid.33.1.265
- [11] Tadmor, Z., & Gogos, C. G. *Principles of Polymer Processing*. Wiley, 2013.
- [12] Osswald, T. A., & Hernández-Ortiz, J. P. *Polymer Processing: Modeling and Simulation*. Hanser, 2006.
- [13] Doi, M., & Edwards, S. F. (1986). *The Theory of Polymer Dynamics*. Oxford University Press, 1986.
- [14] Osswald, T. A., & Turng, L.-S. *Injection Molding Handbook*. Hanser, 2010.
- [15] Michaeli, W. *Plastics Processing: An Introduction*. Hanser, 1995.

- [16] Nitta, K.-h., *On the Orientation-Induced Crystallization of Polymers*. Polymers, 8(6), 229, 2016. doi: 10.3390/polym8060229.
- [17] Carreau, P. J., “Rheological equations from molecular network theories.” *Trans. Soc. Rheol.*, 16, 99–127, 1972. doi:10.1122/1.549276.
- [18] Yasuda, K., Armstrong, R. C., & Cohen, R. E. , “Shear flow properties of concentrated polymer solutions.” *Rheologica Acta*, 20, 163–178, 1981.
- [19] Bird, R. B., Armstrong, R. C., & Hassager, O., “*Dynamics of Polymeric Liquids. Vol 1: Fluid Mechanics*”, Wiley, 1987.
- [20] Saadat, M. et al., “A rheologist's guideline to data-driven recovery of complex fluids' parameters from constitutive models” *Digital Discovery*, 2023, doi:10.1039/d3dd00036b.
- [21] Banerjee, S., et al., “Role of rheology in morphology development in polymer processing.” *ACS Omega*, 8, 12342–12355, 2023, doi:10.1021/acsomega.3c03310.
- [22] Fetters, L. J., Lohse, D. J., & Graessley, W. W., “Chain dimensions and entanglement spacing in linear polymers.” *Journal of Polymer Science Part B*, 37, 1023–1033, 1999. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0488(19990701)37:13<1023::AID-POLB1>3.0.CO;2-P
- [23] C. W. Macosko, *Rheology: Principles, Measurements, and Applications*. New York: VCH Publishers, 1994.
- [24] Williams, M.L., Landel, R.F. and Ferry, J.D. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 77, 3701-3707, 1955, Doi:10.1021/ja01619a008.
- [25] Giesekus, H., A Simple Constitutive Equation for Polymer Fluids Based on the Concept of Deformation-Dependent Tensorial Mobility. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 11, 69-109, 1982, doi:10.1016/0377-0257(82)85016-7



AĞIR METALLERİN SUDA YAŞAYAN CANLILARA ETKİSİ

“=====”

Murat ÇANLI¹

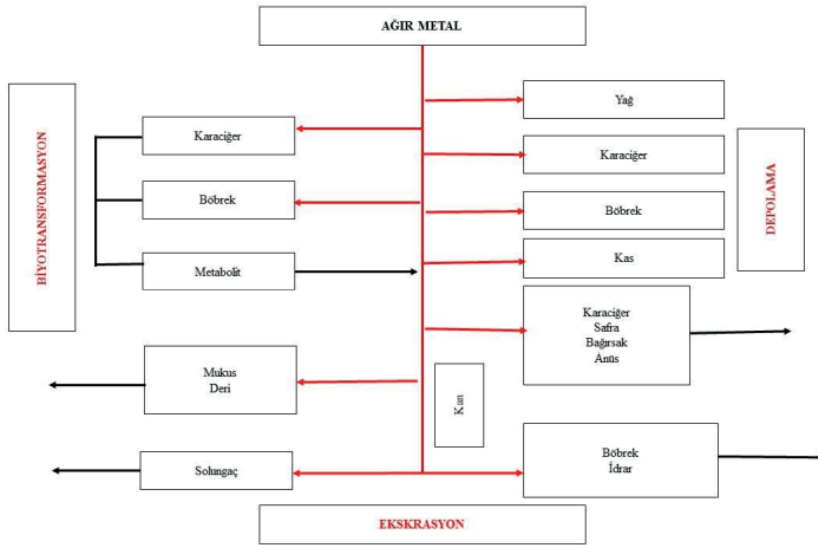
Hakan SEPET²

¹ Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mucur Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Kırşehir, Türkiye, 0000-0002-5275-861X, murat.canli@ahievran.edu.tr

² Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye, 0000-0002-5841-9969, hakan.sepet@ahievran.edu.tr

Bu çalışmada 2020-2025 yılları arasında yapılmış makale ve tez çalışmaları incelenmiş ve kullanılan yöntem tekniklerin yanında elde ettikleri sonuçlar da belirtilmiştir.

Aktop ve Çağatay (2020) çalışmalarında su kirliliğini oluşturan nedenlerden birisi olan ağır metal kirliliği ile ilgili olarak yapılan çalışmaları değerlendirmişlerdir. Ağır metallerin balıklar tarafından alınması, birikimi ve toksik etkilerini bir literatür taraması çerçevesinde incelerken atom numarası 20'den büyük geçiş elementlerini dikkate almışlardır. Bu çalışmada, ağır metallerin solungaçlar ve ağız yoluyla canlı organizmalar tarafından alınma mekanizması, daha sonrasında vücutta hangi organlarda biriktiğini ve bu birikimin hangi durumda zehirlilik etkisine yol açtığından bahsedilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Balık dolaşım sistemine alınan ağır metallerin izleyebileceği olası yollar (Aktop ve Çağatay, 2020)

Toksik metallerin su ortamında etkisini incelemek için tasarlanan bu çalışmada (David ve Cosio, 2020) tatlısu kaynakları ve deniz sularında yaşayan hayvanların hücresel ve moleküler düzeyde kirliliğe verdiği tepki ile ilgili yapılmış çalışmaların taraması gerçekleştirilmiştir. Stres proteinleri, redoks homeostazı ve metabolizma dahil olmak üzere çeşitli stres tepkisi biyobelirteçleri üzerinde metal kirliliğinin etkilerini özetleyen bu çalışma, kokteyl etkilerinin önemi ve metalik kirleticilerin, mikroorganizmalardan balıklara kadar sucul canlılar üzerinde ortaya çıkan toksisiteyi tartışmaktadır.

Güney Marmara Denizi'nde aylık olarak örneklenen dört çift kabuklu türün (*Mytilus galloprovincialis*, *Ruditapes philippinarum*, *Chamelea gallina* ve *Donax trunculus*) toplam mineral konsantrasyonlarını, serbest radikal

temizleme aktivitesini ve antioksidan içeriğini (α -Tokoferol ve Toplam karotenoidler) inceledikleri bu çalışmada Çardak ve ark. (2020) çift kabuklu yumuşakçaların filtre besleyiciler olarak nasıl ağır metaller biriktirdiğini tartışmaktadırlar. Sonuçta, çift kabuklu yumuşakçalar tarafından ağır metallerin emiliminin oksidatif strese yol açabileceğine işaret etmektedirler.

Le Saux ve ark. (2020) sucul hayvanlarda metallerin hücresel etkilerine dair yeni bakış açıları adlı çalışmalarında ise suda yaşayan canlılara metallerin hücresel boyutta etkileri üzerine yapılan çalışmaları özetlemişlerdir. Bu çalışmaların içerisinde David ve Cosio (2020) nun da ifade ettikleri kokteyl etkisi gibi deniz akıntıları sonucu farklı metallerin bir araya gelerek oluşturdukları toksisite dikkati çekmektedir. Ayrıca, Le Saux ve ark. metal kirliliğine maruz kalan su hayvanlarında stres proteinleri, redoks homeostazı, sitoskeleton yeniden düzenlenmesi, metabolizma yeniden düzenlenmesi, serbest hücresel enerji, mitokondriyal metabolizma ve bağışıklık gibi belirli biyolojik son noktalara odaklanmaktadırlar. Bunlara ek olarak, hücresel toksisite yollarını kesin olarak belirlemek ve çevresel metal kirliliğinin su ekosistemleri üzerindeki etkisini öngörmek için çoklu biyobelirteç yaklaşımlarının kullanımı da bu çalışmada değerlendirilmektedir.

Da Silva ve ark. (2020) kentsel bir akarsuda Lütken olarak da adlandırılan *Astyanax lacustris* diye bilinen akvaryumda da yaşayabilen küçük bir balık üzerinde ağır metallerin genotoksik etkisi üzerine yaptıkları çalışmada balığın DNA'sında oluşan hasarları incelemişlerdir. Araştırmacılar, genotoksisiteyi ölçmek için biyobelirteç olarak kuyruklu yıldız deneyini kullanır ve kirli bölgelerdeki aşağı akışta bulunan balıklarda daha yüksek frekanslarda DNA hasarı bulmuşlardır. Yapılan değerlendirmede, test edilen su ortamında genotoksik hasarla en çok ilişkili elementlerin Ba, Mn, Mg, Zn, Cr ve Ni'nin yüksek konsantrasyonları olduğu belirlenmiştir.

Benzer ağır metaller (Zn, Pb, Cu ve Cd) üzerine Nil Nehrinde yapılan bir diğer kirlilik belirleme çalışmasında (Younis ve ark., 2020) *Oreochromis niloticus* denilen Nil Tilapyası balığının dokularındaki ağır metal miktarının izin verilen sınırların üzerinde olduğu görülmüştür. Ağır metal toksisitesi ile parazitik enfeksiyon ve balıkların immünolojik durumu arasındaki ilişkiyi incelenerek, parazitik enfeksiyonun immünolojik sitokinleri artıracak yönde olduğu görülmüştür. Balık dokularının histopatolojik incelemelerinde, parazitler ve toksisiteyle bağlantılı karaciğerde dejeneratif değişiklikler ve solungaçlarda hiperplazi gibi ciddi patolojik değişiklikler görüldüğü araştırmacılar tarafından bildirilmiştir.

Yatkın (2021) çalışmasında arsenik kirlenmesinin suda yaşayan canlılar üzerindeki etkisi ve birikme mekanizmasına yoğunlaşmıştır. Örneklerdeki arsenik değeri HPLC, ICP-MS cihazları ile belirlenmiştir. Çalışma sonunda görülmüştür ki, çözünmüş arsenit ve arsenatın deniz fitoplanktonlarına tok-

sik etkisi, balık ve deniz omurgasızlarına olan etkisinden çok daha fazladır. Bunun sebebi; deniz hayvanlarının deniz suyundaki inorganik arseniği biyokonsantre etme yeteneğinin sınırlı olması ama besinlerinden organoarseniği biyoakümüle edebilmeleri olarak açıklanmaktadır.

Rehman ve ark. (2021) yaptıkları araştırmada ağır metallere maruz kalma, tatlı su balıklarında (*Oreochromis niloticus*) histopatolojik değişikliklere neden olduğunu ve antioksidan enzimleri değiştirdiğini tespit etmişlerdir. Ağır metallerin, düşük konsantrasyonlarda bile, tatlı su balıkları üzerindeki zararlı etkilerini inceleyen bu çalışma, balıkların hayatta kalma ve büyüme için ciddi bir endişe kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı yaş ve vücut kütlelerine sahip toplam 120 balık rastgele dağıtılarak sekiz gruba (A-H) ayrılmıştır. Araştırmacılar, çeşitli ağır metallere ve karışımlarına maruz kalan balıkların solungaç, karaciğer ve beyin dokularında histopatolojik değişiklikleri inceleyerek, lamellerin bozulması, nekroz ve hücresel hasar gibi değişiklikleri gözlemlediler. Araştırmacılar ayrıca, ağır metal maruziyetinin antioksidan enzim aktiviteleri üzerindeki etkisini analiz ederek peroksidaz, glutatyon-s-transferaz, katalaz ve süperoksit dismutazda konsantrasyona ve enzime bağlı artış veya azalma olduğunu tespit ettiler.

Marziali ve ark. (2021), Kuzey İtalya'daki Toce Nehri'ndeki cıva gradyanı boyunca toplanan tortularda ve bentik omurgasızlarda toplam cıva (THg) ve metilcıva (MeHg) konsantrasyonlarını incelediler. Araştırmacılar, cıva konsantrasyonlarının omurgasızların farklı Fonksiyonel Beslenme Grupları (FFG) arasında nasıl değiştiğini inceleyerek, konsantrasyonların otlayanlardan avcılara doğru arttığını kaydettiler. Araştırmacılar, suda yaşayan omurgasızlardaki THg düzeylerinin, biyota için belirlenen Avrupa Çevre Kalite Standardını aştığını, bunun da en üst düzey yırtıcılar için potansiyel riskler oluşturduğunu ve cıvanın yetişkin böcekler aracılığıyla karasal besin zincirlerine aktif olarak aktarıldığını kanıtladığını ortaya koydu.

Benzer bir cıva çalışmasında, Salazar-Camacho ve ark. (2021) altın madenciliği faaliyetleri sonucunda Kolombiya'da yer alan Atrato Nehri havzasında balık türlerinin kalitesindeki bozulma ve cıva (Hg) kirliliğinin dağılımı incelenmektedir. Madencilik faaliyetleriyle beraber balık türlerindeki toplam cıva (THg) konsantrasyonlarının önemli ölçüde değiştiği, birçok örneğin risk altındaki popülasyonların korunması ve insan tüketimi için DSÖ sınırlarını aştığı bildirilmektedir. Bulgular, THg ile toplam balık boyu ve trofik seviye arasında anlamlı pozitif korelasyon olduğunu, bunun sucul hayvanlarda cıvanın biyolojik birikimini ve biyolojik büyümesini gösterdiğini ortaya koymuştur.

Yatkın'a (2021) benzer bir şekilde Ghosh ve ark. (2022) yeraltı sularından deniz ortamına kadar çeşitli sucul ortamlarda ağır bir metal olan arseniğin oluşumunu (kaynaklarını ve formlarını) incelemişlerdir. Bu çalışmada; bak-

teri, alg, fitoplankton, zooplankton, yüzgeçli balıklar ve kabuklu deniz hayvanları dahil olmak üzere su ekosistemlerindeki farklı organizma grupları üzerindeki arseniğin doğrudan veya dolaylı etkilerini ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Ayrıca, çeşitli trofik düzeylerde arsenik biyoakümülyasyonu ve biyomagnifikasyonunun karmaşık sürecini ele alarak bunun insan sağlığı üzerindeki sonuçlarına vurgu yapmaktadırlar.

El-Hak ve ark. 2022 yılında yaptıkları çalışmada bir su canlısı olan *Clarias gariepinus* (yayın balığı) üzerindeki ağır metal birikiminin zararlı etkilerini, oksidatif stres ve karaciğer ile gonadlardaki histolojik değişiklikler üzerindeki etkisini inceleyerek değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında sonuç olarak; iki farklı kirli bölgedeki su ve balık dokuları (karaciğer ve gonadlar) arasında ağır metal seviyeleri açısından oldukça önemli bir fark ortaya koymuşlardır. Balıklarda parazitik enfeksiyonların ve ciddi histopatolojik hasarların toplam yaygınlığı, ağır metal alımı, azalmış antioksidan aktivite ve lipid peroksidasyonu ile bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir.

Şavran ve Küçük (2022) suda yaşayan canlılardaki ağır metal birikimi ve sonuçlarına baktıkları çalışmalarında ise ağır metallerin su ekosistemlerine doğal veya yapay kaynaklardan giriş sürecine işaret etmişler ve besin zinciri yoluyla en alt seviyeden (fitoplankton) en üst seviyeye (insanlar da dahil olmak üzere tüketiciler) doğru taşındığını doğrulayan sonuçlara ulaşmışlardır. Balık, kabuklu deniz ürünleri (midye, istiridye) ve su bitkileri gibi su organizmalarında ağır metallerin nasıl biriktiğini ve besin zincirinde yukarı doğru hareket ettikçe konsantrasyonlarının nasıl artarak olumsuz etkilere yol açtığını ele alarak trofik düzeyler arası transferinin daha fazla açıklamaya ihtiyaç duyduğuna vurgu yapmışlardır.

Doğan ve ark. (2022) ise Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında bulunan bir karides türü olan Derin Su Pembe Karidesinde (*Parapenaeus longirostris*) üzerinde metal birikimini incelerken en yüksek metal derişiminin Demir (Fe), en düşük birikimin ise Kadmiyum (Cd) olduğu tespit etmişlerdir. Araştırılan karides türünde ağır metal birikiminin lipid peroksidasyonuna yol açtığı ve bunun oksidatif stres parametreleri (MDA ve KAT) ile ölçüldüğü sonucuna varmışlardır.

Liu ve ark. (2022) bazı balık türleri (*Japanese medaka*, *Oreochromis aureus*, *Oplegnathus fasciatus*, *Danio rerio*) üzerine farklı derişimlerde kadmiyum uygulayarak balık doku ve sistemlerinde dağılımını incelemişlerdir. Çalışmada, kadmiyum maruziyetinin balıklarda doku yapısı ve işlevinin bütünlüğüne, antioksidan savunma sistemine, üreme düzenleme sistemine ve bağışıklık sistemine nasıl zarar verdiğini ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bu çalışmada ayrıca, balıklarda kadmiyumun farklı konsantrasyon ve sürelerine maruz kalmanın ardından oluşan fizyolojik, biyokimyasal, enzimsel, moleküler ve gen ekspresyon düzeyindeki derişimler incelenmiştir.

Elia ve ark. (2022) metal bazlı deniz araçlarına deniz canlılarının tutunmasını önleyen (antifouling) boyalarda kullanılan bakır ve çinko biyositlerinin deniz canlılarına etkisini belirlemek için Köpek Balığı Yüzgeci Midyesini (*Hyriopsis bialatus*) kullanarak midyelerdeki sonuçları incelemişlerdir. Sindirim bezi ve solungaçlarda zamanla oluşan metal birikimini ve oksidatif stresi incelemek için Asya tatlı su midyelerini öldürücü olmayan konsantrasyonlarda bakır klorür ve çinko sülfata maruz bırakmışlardır. Metal derişimlerini alevli atomik absorpsiyon cihazı (FAAS) ve indüktif eşleşmiş plazma atomik emisyon spektroskopisi (ICP-OES) cihazı ile ölçmüşlerdir. Araştırmada, bakır için zamana bağlı metal birikimi gözlemlenirken, maruz kalan midyelerde çinko alımının ihmal edilebilir düzeyde olduğu bulunmuştur. Biyobelirteç düzeylerini ve bütünleşmiş biyobelirteç yanıtını (IBRv2) analiz ederek, özellikle sindirim bezinde hem bakır hem de çinkonun daha yüksek konsantrasyonlarına karşı daha büyük bir biyokimyasal yanıt olduğunu, çinkonun bakırdan daha az şiddetli biyolojik etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Ünvanlı (2023) tez çalışmasında *Chlorella vulgaris* yeşil alg'ı ve *Microcystis aeruginosa*, *Arthrospira platensis* mavi-yeşil alglerinin bakır, kurşun ve kadmiyum ağır metallerine maruz kalmaları sonucu oluşan etkileri incelemiştir. Ağır metallere ve mikroplastiklere maruz kalmanın, mikroalg hücrelerinde büyüme ve gelişmeyi yavaşlattığını ve ölüme yol açtığını, en yüksek metal konsantrasyonunun klorofil-a ve OD 560 değerlerinde önemli düşüşlere neden olduğunu bulmuştur. Ağır metal ve mikroplastik kirliliğinin çevresel ekosistemlere verdiği zarar, canlı yaşamını tehdit etmekte ve özellikle su ekosistemlerinde yaşayan canlılar, ağır metallerin suda çözünmesi nedeniyle daha fazla risk altındadır. Su ekosistemlerini tehdit etmesi ve fotosentez kapasitesini azaltması nedeniyle, özellikle mikroalgler üzerinde stres koşulları yaratmasının yüksek olasılıkla olduğu sonucuna varılmıştır.

Suda yaşayan hayvan türlerinde bazı ağır metallerin değerlendirilmesi ve oksidatif stres ve immünolojik parametrelerle bağlantısı incelenmesi üzerine çalışmasında Raeeszadeh ve ark. (2023) Batı İran'da yer alan alabalık, sazan ve karideste ağır metallerle (Pb, As, Hg, Cd, Zn, Se) arasındaki ilişkiyi değerlendirmişlerdir. Ağır metal birikiminin sudaki canlılarda bağışıklık sistemini değiştirdiği ve oksidatif hasara yol açtığı tespit edilmiş, özellikle alabalıklarda IL-6 ve TNF- α düzeylerindeki artışın daha yüksek Pb ve Cd konsantrasyonlarıyla ilişkili olduğu bulunmuştur. Toksik metallerin balıkların birincil büyümesini ve üremesini etkilediğini, gonadosomatik indeksin azalması, doğurganlık ve üreme organlarının anormal şekilleri gibi sorunlara yol açtığı da diğer elde edilen sonuçlar arasında yer almaktadır.

Elia ve ark. (2022) benzer şekilde Cima ve Varello (2023) yılında deniz araçlarının gövdesine tutunmayı önlemek amacıyla kullanılan antifouling bakır (I) biyositin maruziyetinin iki çift kabuklu tür olan Akdeniz midyesi (*Mytilus galloprovincialis*) ve Manila istiridyesi (*Ruditapes philippinarum*)

üzerindeki immünotoksik etkilerini karşılaştırmışlardır. Bakır klorür maruziyetinin bağışıklık tepkilerini nasıl etkilediğini araştıran bu çalışma, özellikle çift kabuklu deniz canlılarının hemositlerindeki apoptozis, mikrofilament bozulması, fagositoz ve oksidatif stres gibi biyobelirteçleri incelemektedir. Bu çalışmanın en önemli sonuçlarında birisi, midye türlerinden istiridyenin, bakırın lizozomal membranda oluşturduğu değişikliklere ve reaktif oksijen türlerinin üretimine karşı daha hassas olduğu bildirilmekte olup, bu durum ağır metalin farklı etkilerini ortaya koymasındır.

Altın madenciliğinden etkilenen tropikal bir nehirdeki su ortamındaki toksik metal (loid) seviyeleri ve balıklarda nükleer değişimlerin incelendiği bu çalışmada kaçak altın madenciliğinden etkilenen Atrato Nehri'nden yakalanan 205 balık üzerinde, tortularda ve suda cıva (Hg), metilciva (MeHg) ve arsenik (As) konsantrasyonlarını ölçülmüştür (Cordoba-Tovar ve ark., 2023). Bu çalışmanın önemi, Kolombiya'da yer alan Atrato Nehri'ndeki balıklarda nükleer dejenerasyonlar ilk kez araştırılması ve bir balık türü olan *Prochilodus magdalenae*'nin genotoksisitenin potansiyel bir öngörücüsü olduğu belirlenmesidir. Suda T-Hg konsantrasyonları, 95 °C'de 2 saat boyunca seyreltik $\text{KMnO}_4\text{-K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ çözeltileriyle sindirildikten sonra soğuk buhar atomik absorpsiyon spektrometrisi (CVAAS) ile ölçüldü. Elde edilen verilere göre, yüksek tüketimli etçil balıklarda toplam cıva ve metilciva birikiminin, %38 gibi yüksek bir değerdeki balık yüzdesinde DSÖ limitlerini aşması nedeniyle insan sağlığı açısından risk oluşturduğunu göstermektedir.

Diyet kadmiyum ve askorbik asit'e maruz kalan Yıldız Pisi balığında (*Platichthys stellatus*) biyoakümülyasyon, büyüme performansı, hematolojik parametreler, plazma bileşenleri ve antioksidan tepkiler üzerindeki etkileri konu alan çalışmalarında Won ve ark. (2023) Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS) cihazını kullanarak kadmiyum miktarını ölçmüşlerdir. Kadmiyum maruziyetinin, Yıldızlı pisi balığında büyüme performansını olumsuz etkilediğini, hematolojik parametreleri (kırmızı kan hücresi sayısı, hematokrit ve hemogloblin), plazma bileşenlerini ve antioksidan tepkilerini değiştirdiğini göstermektedir. Bu çalışma, askorbik asit (AsA) takviyesinin tüm dokularda Cd birikimini etkili bir şekilde azalttığını ve Cd maruziyetinin neden olduğu azalan büyüme performansını ve değişen fizyolojik ve antioksidan parametreleri düzelttiğini göstermektedir.

Yalçın ve Çakmak (2023) çalışmalarında doldurulmuş karideslerdeki kadmiyum (Cd), toplam cıva (THg) ve kurşun (Pb) kalıntı düzeylerini belirleyerek, karides tüketimi ile ilişkili potansiyel halk sağlığı risklerini değerlendirmişlerdir. İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) cihazı ile ölçümleri aldıktan sonra ağır metal kontaminasyon düzeylerinin, su kalitesi parametreleri (sıcaklık, alkalinite, sertlik, pH, tuzluluk) ve türle ilişkili ekolojik ve fizyolojik faktörler (habitat, beslenme alışkanlıkları, büyüklük, cinsiyet, yaşam süresi) dahil olmak üzere çeşitli çevresel ve bi-

yolojik faktörlerden etkilenme derecelerini belirlemişlerdir. Karides örneklerindeki ağır metal miktarlarının ağır metal yoğunluğunun ortalama değerler üzerinden $Cd > THg > Pb$ şeklinde olduğu saptanmıştır.

Akdenizde yer alan deniz canlıları ile ilgili yapılan bir diğer araştırmada (Impellitteri ve ark., 2023) ise Akdeniz’de balık ve omurgasızların fizyolojisi üzerinde ortaya çıkan kirleticilerin etkisine yoğunlaşmıştır. Impellitteri ve ark., Akdeniz’in, özellikle suda yaşayan omurgasızlar ve balıklar olmak üzere çevre ve insan sağlığı için ciddi risk oluşturan ağır metaller de dahil olmak üzere ortaya çıkan kirleticilerden kaynaklanan giderek artan bir tehditle karşı karşıya olduğunu ortaya koymuşlardır. Çift kabuklu yumuşakçalar ve elasmobranchlar (kedi balığı ve Akdeniz midyesi gibi) dahil olmak üzere çeşitli türlerin bunların tespiti için biyo-gösterge olarak kullanılmasının faydalarına işaret edilmektedir. Kirlilik kaynağı olarak insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan kirleticileri (atık su ve endüstriyel üretim gibi) çevre ve su organizmalarının üzerindeki etkisi nedeniyle büyük bir endişe kaynağı olduğunu, potansiyel olarak fizyolojik değişikliklere neden olduğunu ve homeostaziyi bozduğunu tartışmaktadırlar.

Yu ve ark. (2024) ağır metal kadmiyumun balıklarda hematolojik ve plazma biyokimyasal parametreleri üzerine toksik etkilerini inceleyerek, bu etkilere ilişkin literatür bulgularını sentezlemişlerdir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre, literatürdeki araştırmalar çoğunlukla kadmiyuma maruz kalan balıklarda fizyolojik stres ve organ hasarını gösteren kırmızı kan hücresi sayısı, hemoglobin, hematokrit ve karaciğer enzimleri gibi belirli biyobelirteçlere odaklanmıştır. Balıklarda kadmiyum maruziyetinin zararlı etkilerini önlemek için antioksidanlar ve eser elementlerle diyet takviyesi gibi potansiyel azaltma stratejilerini tartışıldığı görülmüştür.

Gümüş ve ark. (2024) çalışmasında Karaman ilinde tüketimi daha fazla olan balıklarda bulunan arsenik, bakır, demir, mangan, nikel, krom, çinko ve kadmiyum miktarları ICP-OES cihazı kullanılarak araştırılmıştır. Araştırılan sekiz balık türünden (gökkuşağı alabalığı, barbun, çipura, hamsi, istavrit, kupes, levrek ve mercan) toplam 40 tane seçilerek kaslarında metal biyobirikimleri ve tüketiminin insan sağlığı üzerindeki olası etkilerini incelenmiştir. Bazı ağır metallerin (arsenik ve kadmiyum) konsantrasyonlarının, incelenen bazı balık türlerinde (mercan, istavrit, kupes) ulusal ve uluslararası yönetmeliklerin maksimum izin verilebilir limitlerini aştığını tespit edilmiştir. Limit değerleri aşan bu balıkların (istavrit, kupes ve mercan balıkları) yabani deniz türleri olduğu görülmüştür. Bu balıklardan istavrit Karadeniz’in sığ yerlerinde yaşarken, bir Akdeniz balığı olan mercan balığı 250m derinlikte bulunmakta ve Akdeniz bölgesine ait olan kupes ise yine bir dip balığı olarak anılmaktadır.

Won ve arkadaşlarına benzer bir çalışmada Jung ve ark. (2024) diyet kad-

miyumunun yıldız pisi balığında (*Platichthys Stellatus*) biyoakümülyasyon, büyüme, hematolojik parametreler, plazma bileşenleri ve antioksidan tepkiler üzerindeki toksik etkisini araştırmışlardır. Yıldızlı pisi balıklarını değişen diyet kadmiyum konsantrasyonlarına maruz bırakarak bağırsak, böbrek, karaciğer ve solungaçlardaki biyolojik birikim modellerini analiz edilmiştir. Diyetle alınan 60 mg/kg'ın üzerindeki kadmiyum, vücut ağırlığı artışı ve özgül büyüme hızı da dahil olmak üzere büyüme performansını ve ayrıca birçok hematolojik ve plazma parametresini olumsuz yönde etkilemektedir.

2025 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise bir göldeki metal kirliliğinin genotoksik etkilerini bulmak için kafeslerde yetiştirilen balıklar kullanılmıştır (Rivero-Wendt ve ark., 2025). Bu çalışmada, Brezilya'da yapay bir kentsel rezervuarda aktif biyoizleme kullanılarak yerli balık türü **Astyanax lacustris** üzerindeki eser metal maruziyetinin genotoksik ve sitotoksik etkileri değerlendirilmiştir. Balık kaslarında yüksek demir (Fe), manganez (Mn) seviyeleri ve arsenik (As) birikimi de dahil olmak üzere metal konsantrasyonları açısından tortu ve balık kasi örneklerini analiz edilmiştir. Balıklarda DNA hasarının kontrol grubuyla karşılaştırıldığında 6 ve 12 günlük maruziyetten sonra önemli ölçüde arttığını, eşik altı metal konsantrasyonlarında bile ölçülebilir genotoksik etkilere işaret ettiğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Aktop, Y., & Çağatay, İ. T. (2020). Ağır metallerin balıklarda birikimi ve etkileri. *Menba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, 6(1), 37-44.
- Cima, F., & Varello, R. (2023). Immunotoxic effects of exposure to the antifouling copper (I) biocide on target and nontarget bivalve species: a comparative in vitro study between *Mytilus galloprovincialis* and *Ruditapes philippinarum*. *Frontiers in Physiology*, 14, 1230943.
- Córdoba-Tovar, L., Marrugo-Negrete, J., Barón, P. A. R., Calao-Ramos, C. R., & Díez, S. (2023). Toxic metal (loids) levels in the aquatic environment and nuclear alterations in fish in a tropical river impacted by gold mining. *Environmental research*, 224, 115517.
- Cruz-Esquivel, Á., Díez, S., & Marrugo-Negrete, J. L. (2023). Genotoxicity effects in freshwater fish species associated with gold mining activities in tropical aquatic ecosystems. *Ecotoxicology and environmental safety*, 253, 114670.
- Çardak, M., Çolakoğlu, S., Türker, G., & Ormancı, Ö. Ü. H. B. (2020). *Bazı ekonomik çift kabuklu yumuşakçaların mineral içeriği ve antioksidan kapasitesi*. Rating Academy Ar-Ge Yazılım Yayıncılık Eğitim Danışmanlık ve Organizasyon Ticaret Limited Şirketi.
- Da Silva, E. P., Benvindo-Souza, M., Cotrim, C. F. C., Motta, A. G. C., Lucena, M. M., Antoniosi Filho, N. R., ... & e Silva, D. M. (2020). Genotoxic effect of heavy metals on *Astyanax lacustris* in an urban stream. *Heliyon*, 6(9).
- David, E., & Cosio, C. (2020). New Insights into Impacts of toxic metals in aquatic environments. *Environments*, 8(1), 1.
- Doğan, S., Duysak, Ö., Duysak, T., & Uğurlu, E. (2022). Türkiye Akdeniz Kıyılarında Derin Su Pembe Karidesinde (*Parapenaeus longirostris*, H. Lucas 1846) Oksidatif Stres Parametreleri, Metal Birikimi ve Sağlık Risk Değerlendirmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 25(4), 838-846.
- El-Hak, H. N. G., Ghobashy, M. A., Mansour, F. A., El-Shenawy, N. S., & El-Din, M. I. S. (2022). Heavy metals and parasitological infection associated with oxidative stress and histopathological alteration in the *Clarias gariepinus*. *Ecotoxicology*, 31(7), 1096-1110.
- Elia, A. C., Magara, G., Pastorino, P., Zaccaroni, A., Caldaroni, B., Andreini, R., ... & Prearo, M. (2022). Ecotoxicity in *Hyriopsis bialatus* of copper and zinc biocides used in metal-based antifouling paints. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 18245-18258.
- Ghosh, D., Ghosh, A., & Bhadury, P. (2022). Arsenic through aquatic trophic levels: effects, transformations and biomagnification—a concise review. *Geoscience Letters*, 9(1), 20.
- Gümüş, N. E., Gökbel, F., & Aydın, Z. (2024). Karaman İlinde Tüketilen Balıklarda Ağır Metal Birikimi ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri. *Çanakkale Onsekiz*

Mart University Journal of Marine Sciences and Fisheries, 7(2), 127-137.

- Impellitteri, F., Multisanti, C. R., Rusanova, P., Piccione, G., Falco, F., & Faggio, C. (2023). Exploring the impact of contaminants of emerging concern on fish and invertebrates physiology in the Mediterranean Sea. *Biology*, 12(6), 767.
- Jung, H. C., Kim, J. H., & Kang, J. C. (2024). Toxic impact of dietary cadmium on bioaccumulation, growth, hematological parameters, plasma components, and antioxidant responses in starry flounder (*Platichthys stellatus*). *Fishes*, 9(2), 59.
- Le Saux, A., David, E., Betoulle, S., Bultelle, F., Rocher, B., Barjhoux, I., & Cosio, C. (2020). New insights into cellular impacts of metals in aquatic animals. *Environments*, 7(6), 46.
- Liu, Y., Chen, Q., Li, Y., Bi, L., Jin, L., & Peng, R. (2022). Toxic effects of cadmium on fish. *Toxics*, 10(10), 622.
- Marziali, L., Roscioli, C., & Valsecchi, L. (2021). Mercury bioaccumulation in benthic invertebrates: from riverine sediments to higher trophic levels. *Toxics*, 9(9), 197.
- Raezadeh, M., Khoei, A. J., Parhizkar, S., Rad, F. T., & Salimi, B. (2023). Assessment of some heavy metals and their relationship with oxidative stress and immunological parameters in aquatic animal species. *Biological Trace Element Research*, 201(9), 4547-4557.
- Rehman, T., Naz, S., Hussain, R., Chatha, A. M. M., Ahmad, F., Yamin, A., Akram, R., Naz, H., & Shaheen, A. (2021). Exposure to heavy metals causes histopathological changes and alters antioxidant enzymes in fresh water fish (*Oreochromis niloticus*). *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 9(1), 1-11.
- Rivero-Wendt, C. L. G., Miranda-Vilela, A. L., Fernandes, L. G., de Pádua Melo, E. S., Nascimento, V. A., Loureiro, S. A. V., ... & Fernandes, C. E. (2025). Caged native fish reveal genotoxic effects of metal contamination in an urban lake. *Chemosphere*, 392, 144745.
- Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Paternina-Urbe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2021). Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region. *Chemosphere*, 264, 128478.
- Şavran, G., & Küçük, F. (2022). Sucul Canlılarda Ağır Metal Birikimi ve Etkileri. *Akademik Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi*, 8(1), 65-78.
- Ünvanlı, A. (2023). *Algere ağır metal ve mikroplastik etkisinin araştırılması= Investigation of heavy metal and microplastic effects on algae* (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- Won, T. J., Yu, Y. B., Kang, J. H., Kim, J. H., & Kang, J. C. (2023). Effects on bioaccumulation, growth performance, hematological parameters, plasma components, and antioxidant responses in starry flounder (*Platichthys stellatus*) exposed to dietary cadmium and ascorbic acid. *Antioxidants*, 12(1), 128.

- Yalçın, H., & akmak, T. (2023). Dondurulmuř Karides rneklerinde Ağır Metal Miktarı ve Sağlık Risk Değerlendirmeleri. *Kocatepe Veterinary Journal*, 16(3), 277-286.
- Yatkın, K. (2021). Sucul Ekosistemlerde Arsenik Kirlenmesi. *Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research*, 4(2), 52-57.
- Younis, N. A., Laban, S. E., Al-Mokaddem, A. K., & Attia, M. M. (2020). Immunological status and histopathological appraisal of farmed *Oreochromis niloticus* exposed to parasitic infections and heavy metal toxicity. *Aquaculture International*, 28(6), 2247-2262.
- Yu, Y. B., Lee, J. W., Jo, A. H., Choi, Y. J., Choi, C. Y., Kang, J. C., & Kim, J. H. (2024). Toxic Effects of Cadmium Exposure on Hematological and Plasma Biochemical Parameters in Fish: A Review. *Toxics*, 12(10), 699.