



GIDA
THE JOURNAL OF FOOD
E-ISSN 1309-6273, ISSN 1300-3070

Derleme / Review
GIDA (2026) 51 (3) 615-632
doi:10.15237/gida.GD25107

**GIDA GÜVENLİĞİ İLE ÇEVRE VE İNSAN SAĞLIĞI AÇISINDAN ÇEVRESEL
KİRLETİCİLERİN ORAL YOLDAN İN VİTRO BİYOERİŞİLEBİLİRLİĞİ
ÇALIŞMALARININ DETAYLI BİR İNCELEMESİ**

Şeyda KAYA^{1*} , Ensar KAYA² 

¹Muş Alparslan Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Muş, Türkiye

²Bayburt Üniversitesi Aydıntepe Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Bayburt, Türkiye

Geliş / Received: 12.08.2025; Kabul / Accepted: 29.12.2025; Online baskı / Published online: 31.05.2026

ÖZ

Günümüzde küreselleşme, dünya nüfusunun artışı, sanayinin gelişmesi ve endüstriyel alanların hızla artması gibi pek çok sebep çevresel kirlenmelerin biyosfere salınımına neden olmaktadır. Organik kirlenmeler, ağır metaller, mikroplastikler gibi pek çok kirlenme, gıda güvenliğini, insan ve çevre sağlığını doğrudan tehdit etmektedir. Çevresel kirlenmelerin insan ve çevre sağlığı açısından riskleri değerlendirilirken genellikle ortamdaki kirlenme oranları göz önünde bulundurulmakta, kirlenmenin insan vücuduna alınma oranı göz ardı edilmektedir. Bu noktada, son yıllarda odak haline gelmiş olan, sindirim süreci sırasında gıda matrislerinden salınan ve bağırsak duvarı yoluyla emilmeye hazır olan bileşik miktarını ifade eden 'biyoerişilebilirlik' kavramı öne çıkmaktadır. Bu derleme çalışmada, çevresel kirlenmeleri konu alan in vitro oral biyoerişilebilirlik çalışmalarının detaylı bir incelemesi yapılmıştır. Mevcut bilgiler ışığında çevresel kirlenmelerin biyoerişilebilirliğinin iç ve dış faktörlerden nasıl etkilendiği konusunda genel bir bakış sunulmaya çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Gıda güvenliği, çevre sağlığı, in vitro biyoerişilebilirlik

**A DETAILED REVIEW OF ORAL IN VITRO BIOACCESSIBILITY
STUDIES OF ENVIRONMENTAL CONTAMINANTS FOR FOOD SAFETY
AND ENVIRONMENTAL AND HUMAN HEALTH**

ABSTRACT

Today, many factors, including globalization, global population growth, industrial development, and the rapid expansion of industrial areas, lead to the release of environmental pollutants into the biosphere. Many pollutants, such as organic pollutants, heavy metals, and microplastics, directly threaten food safety, human health, and environmental health. When assessing the risks of environmental pollutants to human and environmental health, the concentration of pollutants in the environment is generally considered, while the amount of the pollutant absorbed into the human body is often overlooked. At this point, the concept of "bioaccessibility," which has become a focus in recent years and refers to the amount of compounds released from food matrices during the digestive process and available for absorption through the intestinal wall, comes to the fore. This review provides a detailed review of in vitro oral bioaccessibility studies on environmental pollutants. Based on current knowledge, we attempt to provide an overview of how the bioaccessibility of environmental pollutants is affected by internal and external factors.

Key words: Food safety, environmental health, in vitro bioaccessibility

Yazışmalardan sorumlu yazar / Corresponding author: Şeyda KAYA

ORCID No: 0000-0003-0333-8966 **E-posta:** s.gungor@alparslan.edu.tr



Gıda Dergisi Creative Commons Atıf-Gayri Ticari 4.0 (CC BY-NC 4.0) Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.
The Journal of FOOD is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International
(CC BY-NC 4.0).

GİRİŞ

Günümüzde küreselleşmenin en güçlü sebep ve sonuçlarından biri olan sanayileşme tek başına bile sayısız çevresel zararı beraberinde getirmiştir. Organik bileşikler ve ağır metaller gibi pek çok çevresel kirlenici çevreye deşarj edilmekte ve ekolojik sistemler ve insan sağlığı üzerinde doğrudan bir tehdit unsuru haline gelmektedir (Lu vd., 2021). Diğer yandan artan dünya nüfusuna hizmet eden tüm alanlardaki endüstriyel üretimler sırasında çok sayıda kimyasal çevreye salınmaktadır. Bu da başta insanların olmak üzere karasal ve sucul canlıların sağlığını tehdit etmektedir (Ou vd., 2025).

Organik kirlenitiler kalıcı organik kirlenitiler ve yarı uçucular olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Fakat her iki gruba da girebilen türde organik kirlenitiler de mevcuttur. Özellikle yarı uçucu organik kirlenitilerin insanlar tarafından daha fazla oranlarda yutulup solunabildikleri bildirilmektedir. Bu maddeler aynı zamanda endokrin bozucular olarak nitelendirilmekte ve obezite ve diyabet gibi metabolik hastalıklarla ilişkili bulunmaktadırlar (Lu vd., 2021).

Kirliliğin temel yayılım noktaları toprak ve su kaynaklarıdır. Toprak kirliliği toprakta yetişen besinler ve yol tozları gibi pek çok kanal üzerinden insan sağlığını tehdit edebilir. Hidrofobik organik toprak kirlenitilerinin başlıcaları polisiklik aromatik hidrokarbonlardır (PAH'ler) (Ou vd., 2025). PAH'ler hem günlük diyetle hem de çevresel kaynaklardan vücuda alınabilen çevresel kirlenitilerdir. Özellikle düşük gelirli mahallelerde, asfalt yollara, süperfon sahalarına (Amerika Birleşik Devletleri tarafından insan sağlığı için tehlikeli maddelerle kirlenmiş olarak etiketlenen sahalardır ve bu fon aracılığı ile bu sahalarda temizlik ve araştırmaların yapılması amaçlanmaktadır) ve kirli su kaynaklarına yakın yerlerde ikamet eden bireylerde PAH'a maruz kalma oranı yüksektir (Harris vd., 2013). PAH'ler karsinogen, teratojenik ve mutajenik etkileri ile bilinmektedir. Bir PAH çeşidi olan benzo(a)pirenin (BaP) kök hücre çoğalması ve farklılaşmasını engellediği, DNA bütünlüğüne ve onarımına zarar verdiği ve kansere neden olduğu kanıtlanmıştır (Ou vd., 2025).

Poliklorlu hidrokarbonlar (PCH'ler), heksaklorobütadien (HCB), pentaklorobenzen (PeCB) da doğada kalıcılıkları insan vücudunun dokularında birikimleri ve toksisiteleri ile bilinen başka hidrofobik organik kirlenitilerdir (Ou vd., 2025). Bunun yanı sıra küresel çapta yaygınlaşan pestisitler, veteriner ilaçları,

klorlu hidrokarbonlar olarak isimlendirilen poliklorlu bifeniller (PCB) ve dioksinler, heterosiklik aminler, mikroplastikler gibi farklı alt gruplarda değerlendirilen daha pek çok çevresel kirlenici vardır (Harris vd., 2013).

Son yıllarda çevresel kirlenitilerin insan maruziyeti ve risk tahmini bağlamında yapılan çalışmaların büyük bir kısmı gastrointestinal sistemdeki emilim sürecini yok saymaktadır. Oysa pek çok kimyasal için emilim/sindirim süreçleri oldukça karmaşık olup bazı kimyasalların emilemediği veya kısmen emildiği ve vücuda alınan miktarlarının tam olarak doğrulanmıyor olabileceği bildirilmektedir (Lu vd., 2021). Bu noktada öne çıkan "biyoerişilebilirlik" kavramı; sindirim süreci sırasında gıda matrislerinden salınan ve bağırsak duvarı yoluyla emilmeye hazır olan bileşik miktarını ifade etmektedir (Cianciosi vd., 2020; Seraglio vd., 2021).

Bu çalışmanın amacı son yıllarda giderek artan çevresel kirlenitilerin insan sağlığı açısından tehlike katsayısı, tahmini risk değerlendirmesi, kanser riski gibi konularda sunulan öngörülerine farklı bir bakış açısı getiren biyoerişilebilirlik çalışmalarının detaylı bir derlemesini yapmaktır. Bu bağlamda gıda yolu veya kazara yutma ile çevresel kirliliğe oral yoldan maruziyetin boyutları var olan çalışmalar ışığında biyoerişilebilirlik kavramı çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Bu derleme çalışması kapsamında çevresel kirlenitilerin gıda güvenliğini, çevre ve insan sağlığını tehdit edecek şekilde oral yoldan biyoerişilebilirliğini inceleyen güncel orijinal araştırmaların, sistematik derleme ve meta analizlerin belirlenmesi için; Science Direct, Scopus, PubMed, Web of Science ve Google Scholar veritabanlarında "biyoerişilebilirlik (bioaccessibility)" anahtar kelimesi kullanılarak arama yapılmıştır. Son 5 yıla ait veriler arasından (2020-2025) tüm başlıklar okunarak ilişkili bulunan başlıklar seçilip, özet taraması yapıldıktan sonra makalelerin tümü detaylı olarak okunmuştur. Tarama yapılırken yalnızca evrensel akademik dil olan İngilizce makaleler çalışmaya dahil edilmiş, statik veya dinamik bir gastrointestinal sindirim simülasyonu tabanında yapılmamış çalışmalar, oral biyoerişilebilirlik ile ilişkisi bulunmayan dermal temasa ya da solunuma dayalı in vitro biyoerişilebilirlik çalışmaları ile çevresel kirlenici sayılmayan farklı bileşiklere ait in vitro biyoerişilebilirlik çalışmaları hariç tutulmuştur. Çalışmada geleneksel derleme metodu kapsamında mevcut literatür bilgisinin genelleştirilebilen temel çıktıları tartışılmıştır.

Bu çalışma; yeni bir odak haline gelen "biyoerişilebilirlik" konusunda çevre ve insan sağlığını tehdit eden çevresel

kirleticilerin oral yoldan insanlara ne derece olumsuz etki ettiğinin anlaşılması için detaylı bir literatür incelemesi sunmaktadır.

LİTERATÜR ÖZETİ

Çevresel kirleticiler günümüzde toprak, hava, su ve biyosferin diğer tüm katmanlarında yaygın şekilde bulunmaktadır. Özellikle toprak ve su kirliliği canlıların yaşamında önemli bir tehdit unsuru haline gelmiştir (Li vd., 2021). Bu çalışmada mevcut literatür bilgilerinin ışığında kirleticiler üzerinde yapılan biyoerişilebilirlik çalışmaları temel başlıklar halinde gruplandırılarak sunulmuştur.

Organik Kirleticiler

Çevre sağlığı bilimi; toprağın, türüne, konumuna, kullanım alanı gibi çevresel koşullarına bağlı olarak kirletici düzeyinin değişebileceği ve çok çeşitli inorganik ve organik bileşiklerin

kaynağı olduğunu söylemektedir. Çevresel kirleticilerin çoğu toprakta parçalanamaz ya da dönüştürülemez formdadır. Şekil 1'de gösterildiği gibi kirleticilerin topraktaki akümülyasyonunun birincil sebepleri kentleşme, endüstriyelleşme, sanayileşme gibi antropojenik faaliyetlerdir. Kirleticilerin topraktan insana geçiş yolları oral yol, solunum yolu ve dermal temasıdır (Li vd., 2021). Çevre bilimini ele alan çalışmalarda plazma BaP düzeyinin bireyin yaşadığı çevre (kentsel, endüstriyel alanlar veya banliyöler gibi) ile ve obez olma veya obez olmama durumuyla korelasyon gösterdiği bildirilmiştir. Özellikle obez olan bireylerin radyoimmünolojik analiz sonuçlarında daha yüksek serum BaP seviyesinin saptanması ve PAH'lerin çoğunlukla lipofilik olmaları nedeniyle vücut adipoz dokusunun PAH'ler için bir depolama alanı olduğu bildirilmiştir (Hutcheon vd.,1983).



Şekil 1. Çevresel kirleticiler, çıkış kaynakları ve insan vücuduna ulaşım yolları

Ou vd. (2025), Çin'de dört kirletici sahadan alınan toprak numunelerindeki hidrofobik organik kirleticilerin in vitro gastrointestinal bir simülasyonda oral biyoerişilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada toprak numunelerinde bulunan PAH, PCH, organofosfat alev geciktirici bileşikler (OPRF)'in doğrudan gastrik ve intestinal sıvılara salınan miktarları sırasıyla %1.74-%91.0, %2.51-%39.6 ve %1.37-%96.9 aralığında bildirilmiştir. Bu çıktılar bu üç hidrofobik organik kirleticinin insan vücuduna çok kolay bir şekilde girebileceğini göstermektedir. Benzer bir diğer çalışmada Wang vd. (2010), Hong Kong'tan örneklendirilen 20 balık türünde bulunan PAH'lerin in vitro gastrointestinal simülasyonda biyoerişilebilirliğini değerlendirmişlerdir. Çalışmada ortalama PAH biyoerişilebilirliği %24-31 arasında değişmiştir (Wang vd., 2010). Bu oranlar insan vücudunun kirleticiye maruz kaldığında oluşabilecek sağlık risklerini vurgulamaktadır.

Elektronik Atıklar

Elektronik kirlilik, elektronik atıkların uygun şekilde bertaraf edilememesi gibi problemler ile birleştiğinde ciddi sorunlara neden olabilmektedir. Dodd vd. (2023), Gana'nın Accra kentinde bulunan dünya çapındaki en büyük elektronik atık sahalarından biri olan Agbogboshie sahasında merkezi ve çevre yerleşkelerdeki ağır metal maruziyetini incelemişlerdir. Çalışmada saha merkezinde yakma ve söküm alanlarındaki topraklarda ağır metal konsantrasyonlarının uluslararası çevre toprak kalite yönergelerini aştığı bildirilmiştir. Öte yandan biyoerişilebilirliğin göz önünde bulundurularak yapıldığı tahmini risk değerlendirmelerinde merkezi bölgedeki yakma ve sökme sahalarındaki toprakların kazara yutulmasına ilişkin risklerin yüksek olduğu bildirilmiştir.

Ağır metaller

Ağır metaller yoğunluğu 5g/cm^3 'ten daha büyük olan metaller olarak ifade edilmekle birlikte, elementlerin atomik ağırlıklarına bakılmaksızın düşük derişimlerde bile toksik etki gösterebilen elementlerdir. Potansiyel toksik elementler (PTE) adı altında da değerlendirilen ağır metallerin dünya karasındaki oranı son 10 yılda hızlanarak artmıştır. Ağır metal maruziyetinin insan sağlığına birçok olumsuz etkisinin olduğu kanıtlanmıştır. Drahota vd. (2025), kirlenmiş topraklardan numunelendirilmiş 16 ayrı süpergen arsenat ve arsenik trioksit (As_2O_3) mineralinde arseniğin biyoeişilebilirliğini in vitro gastrointestinal bir simülasyonla değerlendirmişlerdir. Çalışmada skorodit, farmakosiderit gibi kararlı ve kristal fazlar daha düşük, daha düşük kristal ve daha az stabil fazlar ise daha yüksek As biyoeişilebilirliği sergilemiştir. Bu sonuçlara göre kirlenmiş topraklarda As maruziyeti incelenirken mineraloid bileşiminin ve yapısal karakterizasyonun önemi vurgulanmaktadır. Genellikle göz ardı edilse de termal alanların da özellikle ağır metallere maruz kalma açısından riskli alanlar olduğu söylenebilir. Yapılan bir başka çalışmada ise Rimondi vd. (2022), İtalya'nın Viterbo şehrindeki termal alanlardaki As biyoeişilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada yapılan risk analizi sonucu kazara toprak yutulmasının orta düzey karsinojen olduğunu, dermal yol ile maruz kalmanın ise ihmal edilebilir düzeyde olduğunu bildirmişlerdir.

Toprak ıslah çalışmaları ve toprağa yapılan müdahaleler ile maruziyet oranı azaltılabilmektedir. Yapılan bir çalışmada kurşun (Pb) ile kirlenmiş topraklarda çeşitli formlardaki fosfat katkı maddelerinin Pb biyoeişilebilirliğine etkisini inceleyen bir meta analiz sonuçlarına göre bu müdahalenin önemli etkileri olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle fosforik asidin (H_3PO_4) diğer formlara göre Pb maruziyetinden korunmada daha etkili olduğu bildirilmiştir (Mayer vd., 2022). Bir başka çalışmada Kastury vd. (2021), ocuklarda Pb, As ve antimon (Sb) maruziyetinin azaltılması için kirlenmiş topraklarda plumbojarosit oluşumunu biyoeişilebilirlik üzerindeki etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmada plumbojarosit oluşumunun Pb biyoeişilebilirliğinde %77.4-97.0 oranında azalma sağlayabileceği saptanmıştır. Eş zamanlı olarak fareler üzerinde yürütölen in vivo deney sonuçları da biyoeişilebilirlik sonuçlarını doğrulamıştır. Dolayısıyla kirlenmiş topraklarda plumbojarosit oluşumunun kirlilik oral maruziyetini azaltmada oldukça etkin olabileceği söylenebilir. İlginç bir çalışmada Sowers vd. (2023), Pb ve As kirleticilerinin toprak iyileştirme yönteminden biri olan toprağa potasyum-jarosit ve beudantit ekleme yolu ile oral biyoeişilebilirliğinin azalabileceğini bildirmişlerdir. Sıcaklık

bu etkiyi artırmıştır. Çalışmada çeşitli oranlarda As ve Pb ile kirlenilen topraklara potasyum-jarosit ve beudantit eklenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Potasyum-jarosit ekleme yöntemi yaklaşık %60'lık bir etki göstererek Pb ve As'nin oral biyoeişilebilirliğini %10'dan aza çekmeyi başarmıştır. Bir başka çalışmada bir izabe ocağında Pb ve As'yi azaltmak için demir sülfat (FeSO_4), üçlü süperfosfat ve biyokömür uygulamalarının etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada en etkili yöntemin (FeSO_4) uygulaması olduğu (kirlenmiş toprağa bileşimin karıştırılmasını ve plumbojarosit oluşumunun sağlanması için $>100^\circ\text{C}$ 'de işlem görmesi), dolayısıyla kirlenmiş topraklarda As ve Pb'nin immobilizasyonu için potansiyel olarak kullanılabileceği bildirilmiştir (Alankarage vd., 2024).

Kirlenmiş topraklardan hasat edilen besinler kirleticilerin insan vücuduna taşınmasındaki en önemli kanalların başında gelmektedir. Muleya vd. (2023), Malavide hasat edilen tahıl unlarında dışsal toprak kirliliğinin tahıldaki demir (Fe) biyoeişilebilirliğine etkisini incelemişlerdir. Tahıllardaki Fe, işleme ekipmanlarından kaynaklanabilen veya toprakta bulunup bitkiye geçen ekstrinsik Fe toprakta bulunan diğer titanyum (Ti), Alüminyum (Al), Vanadyum (V) gibi belirli ağır metallerin varlığı ile korelasyon gösterebilmektedir. Malavi'de 3 farklı kirlilikteki toprak örneği incelendiğinde biyoeişilebilir Fe konsantrasyonu farklılık göstermiştir. Fakat un numuneleri incelendiğinde Fe biyoeişilebilirliğinde anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Ek olarak; topraktaki V'nin tahıllardaki ekstrinsik Fe varlığının iyi bir göstergesi olduğu bildirilmiştir. Fe minerali, ağır metallerin toksisitesini ve hareketliliğini azaltabilmekte iyi bir stabiliteye sahiptir. Fang vd. (2022), ilginç bir çalışma tasarımı ile marul, pirinç ve elma örneklerinin, ağır metallerle kirlenmiş bölgelerden örneklendirilen topraklardaki As ve Zn'nin FeSO_4 ile stabilizasyonundan sonra biyoeişilebilirliği ve morfolojik değışimleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada kirlenmiş toprak örnekleri uygun şekilde örneklendirilip homojenize hale getirildikten sonra deney grubuna FeSO_4 eklemesi yapılmıştır. Temin edilen gıda örnekleri ise 60°C 'de kurutulduktan sonra toz haline getirilmiştir. İn-vitro simülasyonu oluşturulan gastrointestinal sindirim sistemine toprak ve gıda numune tozları belirli oranlarda (%0, %25, %50, %100, %200, %400, gıda/toprak) eklenerek test edilmiştir. Çalışmada FeSO_4 'ın As biyoeişilebilirliği üzerindeki çözünme etkisini zayıflattığı ve gastrik ve intestinal fazda bu iki ağır metalin biyoeişilebilirliğini azalttığı bildirilmiştir.

Toprak kaynaklı kirleticiler maruziyetinin en aza indirilmesi için yapılan çeşitli deneysel çalışmalardan bir diğesinde, Hussain

vd. (2024), kadmiyum (Cd) ile kirlenmiş topraklarda yetişen pirinç örneklerinde Cd biyoerişilebilirliğini azaltmak için pirinç yapraklarına hasat öncesi selenyum-nanopartikül püskürtmenin fayda sağladığını bildirmişlerdir. Ayrıca bu uygulamanın pirinç tanelerinde fitik asit içeriğini düşürdüğü, selenyum (Se), çinko (Zn), Fe ve protein seviyelerini yükselterek besin değerlerini artırdığı bildirilmiştir.

Tüm bunların yanı sıra atmosfer kirliliği kirleticilerin oral biyoerişilebilirliği üzerinde minimal etkilere sahip olsa da yapılan az sayıdaki çalışma bu etkinin varlığını vurgulamaktadır. Izquierdo-Díaz vd. (2023), kentsel alanlarda temiz bir substrat içinde yetiştirilen marul örneklerinin ortam atmosferinin kirliliğinden etkilenip etkilenmediğini incelemişlerdir. Örnekler Kopenhag Şehrinin farklı dozlarda hava kirliliğine sahip belirli 5 lokasyonunda yetiştirilmiş ve incelenmiştir. Çalışma sonucunda daha yüksek atmosfer kirliliğine sahip lokasyonlarda üretilen marulların daha fazla eser element içerdiği, marullarda yüzey kirliliğinden etkilenmemek için yıkamanın önemli olduğu bildirilmiştir. Bir başka çalışmada Güney Çin'deki bir mega kentte (Guangzhou), sanayi bölgesi, trafik kavşakları ve tarım alanlarından toplanan yol tozundaki iz metallerin biyoerişilebilirliği ve insan sağlığına etkileri incelenmiştir. Çalışmada toz örneklerinde başta Zn, Cd, bakır (Cu) ve Pb olmak üzere önemli iz elementler orta ve ağır kirlilik düzeyinde tespit edilmiştir. İn vitro gastrointestinal simülasyon denemesinde ise Zn, Cd, Cu ve As'nin yüksek düzeyde biyoerişilebilir olduğu ortaya konulmuştur. Bu ağır metallerin biyoakümülyasyon sonucu insan vücudunda karsinojen olabileceği bildirilmiştir (Tang vd., 2022). Ma vd. (2021), Çin'in Xiamen kentine bağlı 6 farklı ilçesinde bulunan 58 anaokulundan yağmurun yağmadığı 7 günün ardından ev tipi bir elektrikli süpürge yardımıyla 20'şer gr toz örnekleri toplamışlardır. Tozlar polietilen torbalarda saklanarak analiz edilmiştir. Yapılan in vitro analizlerde tozlarda bulunan ağır metallerin (V, kobalt (Co), nikel (Ni), As, molibden (Mo), krom (Cr), mangan (Mn), Cu, Zn ve Pb) oral biyoerişilebilirlik değerleri %1-76 arasında değişmiştir. Toz kaynaklı ağır metallerin başta kömür yakma olmak üzere, endüstriyel alanlar, trafik, inşaat alanları gibi bölgelerden yayılım gösterdiği bildirilmiştir. Liu vd. (2023), yol tozundan kaynaklanan metaloit kirliliğini çevreye salınım açısından incelemişlerdir. Bir trafik eğitim tesisinde, eser metaloitlerin yol tozu, bahçe sebzeleri ve ağaç dokularında (kabuk ve kök) incelemişlerdir. Çalışma sonucunda tesis kaynaklı yol tozunda önemli miktarda eser metaloit birikimi (en yüksek Pb, Cd, Sb olmak üzere) bulunmuştur. Ağaç doku örneklerinde yüksek düzeyde Pb, Zn, Sb saptanmıştır, bahçelerde yetişen lahana ve

turpun yenilebilir yapraklarında ise Cd ve Pb güvenlik limitlerini aşmıştır. Yol tozunun in vitro gastrointestinal bir simülasyonda incelendiği ve sağlık risk değerlendirmelerinin yapıldığı çalışma sonuçlarına göre ise Cd, Ni ve Cr'nin yetişkin ve çocuklarda karsinojen etkileri bildirilmiştir. Dolayısıyla oto lastikleri ve araç emisyonlarından doğrudan etkilenen yol tozunun insan sağlığı açısından risklerine vurgu yapılmıştır. Gabersek vd. (2024), Slovenya'nın Maribor kasabasında toprak, tavan tozu, ev tozu ve sokak tozu olmak üzere 118 örnekleme yapmışlar ve örneklerde bulunan ağır metaller oral biyoerişilebilirlik açısından test edilmiştir. Sonuçlar örneklemlerde ve gastrik ve intestinal fazlarda oldukça değişken olarak saptanmıştır. Gastrik fazda en fazla biyoerişilebilir ağır metaller arasında tüm ortamlardaki Cd (%53), Cu (%28), Pb (%34) ve Zn (%48) bulunmuştur. Ortam fark etmeksizin tüm örneklerde en biyoerişilebilir olanlar bunlar bulunmuştur. Öte yandan cıva (Hg) (%3.8) ve kalay (Sn) (%2.2) gastrik fazda en az biyoerişilebilir olan ağır metallerdir. İntestinal fazda ise, en yüksek ortalama biyoerişilebilirlik Cu (%35) ve Cd (%23) şeklinde saptanmıştır. Çoğu ağır metalin ortalama biyoerişilebilirlikleri gastrik fazda artsa da, bazen intestinal faza çözünmüş olarak gelen ağır metallerin burada tekrar kristalleşmesine bağlı olabilecek şekilde azalabilmektedir. Çalışmada yazarlar farklı ortamlarda tozların karakterizasyon farklılıklarına bağlı olarak bu tozlarda bulunan toksik elementlerin biyoerişilebilirliğinin değişebileceğini bildirmişlerdir. Dolayısıyla partikül boyutundaki mikromorfolojik analizler önem arz etmektedir. Laura Ruiz-Azcona vd. (2022), Kuzey İspanya'da bulunan bir forromangan alaşım tesisi çevresinde yaşayan sağlıklı popülasyonda bilişsel işlevin çevresel havadaki Mn seviyesi ile ilişkisi incelenmiştir. Çalışmada 130 katılımcı çeşitli bilişsel işlev testlerine (sözel akıcılık testleri, iz sürme testi, rakam aralığı testi gibi) tabi tutulmuştur. Çalışmada deneklere verilen kişisel hava örnekleycileri denekler tarafından 24 saat boyunca taşınmış ve örnekleri partikül boyutları ince ($\leq 2.5 \mu\text{m}$) ve kaba ($2.5-10 \mu\text{m}$) olmak üzere toplamıştır. Toplanan partikül örnekleri in vitro gastrointestinal bir simülasyonda Mn biyoerişilebilirliği açısından değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda; toplam Mn seviyeleri daha yüksek olan katılımcılarda daha düşük bilişsel işlevler gözlenmiştir. Teknik olarak bu çalışma solunuma dayalı maruz kalmayı esas alsa da kaza ile yutma sonucu Mn maruziyetinin bilişsel işlevde olumsuz sonuçlara yol açabildiğini göstermektedir.

Terk edilmiş endüstriyel ve sanayi bölgelerinde toprak kirliliği homojen dağılmamakla birlikte insan hayatını riske edecek düzeylere çıkabilmektedir (Shentu vd., 2023). Yapılan bir çalışmada maden şirketlerinin Meksika'nın Hidalgo kentinde (Zimapan'da) terk ettiği atık yığınları ağır metaller açısından

risk teşkil ettiği için ve özellikle hava yoluyla dağılım gösterdiği için rüzgâr tünelleri kullanılarak (kalıntılar yüzeyden 0-5 cm alınmak suretiyle gerçeğe en yakın şekilde) 40 maden kalıntısı örnekleme yapılmıştır. Çalışmada olası kazara yutmalar için test edilen gastrik biyoyerişilebilirlik solunum biyoyerişilebilirliğine nazaran daha fazla bulunmuş ve yazarlar bunu düşük gastrik pH ile ilişkilendirmiştir. Çalışmada gastrik biyoyerişilebilirlik As için %2, Cd ve Zn için %43, Pb %1.6 saptanmıştır (Jesús Eulises vd., 2021). Corona Sanchez vd. (2021), Meksika'nın Zimapán kentindeki maden ocaklarından kaynaklanan atmosferik partiküllerdeki metaloitlerin oral ve solunumsal biyoyerişilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada örneklerdeki metaloit konsantrasyonları sırasıyla $As > Zn > Fe > Pb > Cu > Mn > Cd$ şeklinde bildirilmiştir. Çalışma sonucunda metaloitlerin biyoyerişilebilirlikleri akciğer ve mide simülasyonlarında oldukça değişken olup sırasıyla Pb için %10 ve %37 ve As için %8 ve %6 olarak bildirilmiştir. Ayrıca farklı toz parçacık boyutlarına göre alınan örneklerin ($\leq 10 \mu m$ ve $\leq 2.5 \mu m$) her ikisinde de As ve Cd konsantrasyonları izin verilen limitlerin üzerinde bulunmuştur. Yazarlar bu metaloit kirleticilerin ekosistemde daha uzak yerlere hava yolu ile taşınabileceğine vurgu yapmaktadır. Bir başka çalışmada Xing vd. (2020), bir kurşun eritme tesisine yakın evlerde pencere pervazlarındaki tozların oral biyoyerişilebilirliğini ve insan sağlığı açısından riskini incelemişlerdir. Örnekler tesisin 1 km yakınındaki evlerden ve 4-5 km yakınındaki şehir merkezinde bulunan evlerden 1. ve 9. kata kadar tüm kat pencere pervazlarından (< 10 , 10-45 μm ve 45- 125 μm boyut fraksiyonlarında) toplanmıştır. Çalışmada en fazla Pb konsantrasyonunun 10-45 μm fraksiyon boyutunda bulunduğu, işleme tesisine yakın bölgelerde bulunan evlerde yüksek katlardaki pencere pervaz toz örneklerinde alçak katlardakine göre anlamlı şekilde daha fazla Pb konsantrasyonu tespit edilirken; şehir merkezinde bulunan evlerde tam tersi bir durum gözlenmiştir. Çalışma sonucunda genel gastrik ve intestinal biyoyerişilebilirlik sırasıyla %68.9-89.9 ve %1.3-17.0 şeklinde bulunmuştur. Öte yandan ilginç bir şekilde çalışma sahasına yakın bölgelerde bulunan evlerden toplanan örneklerdeki Pb biyoyerişilebilirliği şehir merkezinde bulunan evlere kıyasla daha az biyoyerişilebilir bulunmuştur. Bu durum fraksiyon farklılıkları ile açıklanabilir gibi görünmektedir. Diğer yandan tüm örneklerde HI (Sağlık endeksi) değeri < 1 olup Pb'nin yutma veya solunum yoluyla oluşturduğu sağlık riskinin sınırlı olduğu şeklinde bildirilmiştir. Soltani vd. (2021), İran'da bulunan bir demir madenciliği kompleksinden alınan toz örneklerinde bulunan PTE'lerin in vitro biyoyerişilebilirliğini incelemişlerdir. Farklı partikül boyutları göz önünde bulundurularak alınan toz örneklerinde ($\leq 10 \mu m$ ve $\leq 2.5 \mu m$) As, Cd, Co, Cu, Fe, Ni ve Pb için oral

biyoyerişilebilirlik incelenmiştir. Toz örneklerindeki PTE'lerin biyoyerişilebilirliği mide ve bağırsak fazlarında sırasıyla %0.35-%41.55 ve %0.06-37.58 aralığında değişmiştir. Çalışmada PTE biyoyerişilebilirliğinin toz parçacıklardaki PTE konsantrasyonları ile doğru orantılı olduğu bildirilmiştir.

Aktif veya terkedilmiş maden sahalarına atfedilen yüksek sağlık risklerinin yeniden değerlendirilmesi üzerinde duran diğer bazı çalışmalarda ise; Mehta vd. (2020), İtalya'da (Gorno) terk edilmiş bir maden sahasının etrafındaki kayada, atık suda, toprakta ve konut çevrelerinde bulunan toksik elementlerin insan sağlığı açısından risk değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmada, özellikle As, Cd, Pb ve Zn'nin yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu ve bu çevresel kirleticilerin tamamen biyoyerişilebilir olmadığı sonucuna varılmıştır. Toplam konsantrasyonlar ve biyoyerişilebilirlik oranları göz önünde bulundurulduğunda yutma yolu ile karsinogen olmayan ve karsinogen riskte sırasıyla %34 ve %93 oranlarında azalma gözlenmiştir. Dolayısıyla çevresel risk değerlendirmelerinde tek başına kirleticiler konsantrasyonlarının gerçek riski yansıtmadığı bildirilmiştir. Ettler vd. (2022), Selebi-Phikwe bölgesindeki maden ocaklarından kaynaklanan tozlardaki metaloit kirleticilerin in vitro biyoyerişilebilirliğini incelemişlerdir. Toz örneklerinde başta Cu, Ni ve Co olmak üzere çeşitli düzeylerde (ince tozlarda daha yüksek düzeylerde olmak üzere) metaloit kirleticiler tespit edilmiştir. Kobalt, Cu ve Ni'nin en yüksek biyoyerişilebilir konsantrasyonu çoğunlukla bu metallerin sülfidlerle (pentlandit, pirotin, kalkopirit vb.) bağlı olduğu formlarında gözlenmiştir. Öte yandan ilgili maden ocaklarının çitle çevrili, dolayısıyla yerel halk için erişilemez olması, granül cüruf döküm alanlarında ince partiküllerin az miktarda bulunması gibi nedenlerle tahmini risk değerlendirmesinin gerçekçi olmayabileceği bildirilmiştir. Olası bir başka senaryoda toprağın yutulması durumunda ise oldukça yüksek bir miktar olan 280 mg/gün dikkate alındığında bile insan sağlığı açısından oluşturacağı risk oldukça sınırlı olarak bildirilmiştir.

Mikroplastikler

Mikroplastikler 1 μm ile 5 mm arasında değişen boyutlardaki plastik parçacıklardır. Mikroplastikler kimyasal yapıları açısından plastikler ile aynıdır ve maruz kalınması halinde ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Mikroplastikler ağır metallerin taşıyıcıları olarak hareket edebilmektedir. Yapılan bir çalışmada mikroplastiklerle ilişkili ağır metallerin insan sağlığına etkileri, As, Cr, Cd ve Pb olmak üzere 4 ağır metal ve polivinil klorür (PVC) mikroplastikleri kullanılarak test edilmiştir. Çalışma sonucunda özellikle Pb'nin PVC'ye adsorbsiyonu

ortaya konmuştur. İn-vitro modelde özellikle gastrik fazda Pb, PVC mikropplastiklerinden daha fazla desorbsiyon olma eğilimi göstermiştir. Bu sonuçlar PVC gibi mikropplastiklerin özellikle ağır metaller ile kirlenmiş sular gibi ortamlarda bir akümülatör gibi davranabileceğini göstermektedir (Chen vd., 2022). Ayrıca doğal sularda bulunan mikropplastik kalıntıları, pürüzlü yüzey morfolojileri ve yüksek özgül yüzey alanları sebebiyle organik kirleticileri adsorbe edebilir ve kazara yutulduğunda insan sağlığına zarar verebilir (Wu vd., 2023). Hu vd. (2022), mikropplastiklere yapışabilen fenantren ve türevlerinin yüksek oranda biyoerişilebilir olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmada polietilen mikropplastiklerinin, fenantren türevleri için biyoerişilebilirlik bazında en yüksek katkıya sahip olduğu, mikropplastiklerin hidrofobisiteyle fenantren türevlerinin sorbsiyonunun pozitif korelasyonlu olduğu bildirilmiştir. Öte yandan mikropplastiklere bağlı fenantren türevlerinin yaşam boyu kanser riskini Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından önerilen güvenli dozdan 10^{-6} ila 10^{-4} kat fazla olduğu, bunun da ciddi potansiyel sağlık riskleri taşıdığı bildirilmiştir. Başka bir çalışmada Vega-herrera vd. (2024), Akdeniz midyelerinde mikropplastiklerin (polietilen, polistiren, polietilen tereftalat), varlığı ve midyelerin triklosan ve polifloroalkil gibi organik kirleticileri biyoakümüle etme düzeyleri mikropplastikler varlığında ve yokluğunda test edilmiştir. Çalışmada, organik kirleticiler mikropplastik yüzeylerinde stabilize olduğu, mikropplastik varlığında organik kirleticilerin biyoerişilebilirliğinin arttığı bildirilmiştir. Mikropplastik yüzeylerinde organik kirleticilerin adsorbsiyon ve biyoakümüleyonuna dair etkileşimler sindirim süreci sırasında kolayca değişebilir ve kirleticilerin biyoerişilebilirliği artabilmektedir. Wu vd. (2023) simüle edilmiş insan gastrik sıvılarında polipropilen mikrofiber ilişkili tetrasiklin ve siprofloksasinin antibiyotiklerinin biyoerişilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada polipropilen mikrofibre yapışarak insan gastrointestinal kanalına giren bu antibiyotiklerin kanalda kolaylıkla salındığı ve iyi bir biyoerişilebilirlik gösterdiği bildirilmiştir. Yazarlar mikropplastiklerin kendi zararlarına ek olarak taşıyabildikleri ek kirleticiler açısından da insan sağlığı açısından risk teşkil ettiğini bildirmişlerdir. Armada vd. (2023), sentetik futbol sahalarında kullanılan lastik kauçuğunun oral biyoerişilebilirliğini araştırarak, 3-6 yaş aralığındaki çocuklarda kazara yutulması halinde oluşabilecek risk değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmada, in vitro simülasyonu oluşturulan ağız, mide ve bağırsak ortamlarında lastik kauçuklarında bulunan PAH'lar dahil olmak üzere neredeyse tüm zararlı bileşenler tespit edilmiştir. Çalışmada sindirim sonucunda biyoerişilebilirlik test edilen PAH'lar için mide sıvısında 60 ng/g'a kadar (ortalama

biyoerişilebilirlik %0,25), test edilen BaP'ler için ise 2.5 ng/g'a kadar ulaştığı bildirilmiştir. Çalışmada sentetik çimli futbol sahalarının öncelikli kullanıcılarının çocuklar olmasından dolayı olası maruziyetlerin çocuk sağlığı açısından zararlı olabileceği bildirilmiştir.

Çevresel kirleticilerin insan sağlığına etkilerine farklı bir açıdan bakan bir başka çalışmada Masset vd. (2022), otomobil lastiklerinin zamanla aşınımına uğraması sonucu meydana gelen ve çevreye salınan polimer parçacıkları ile ilişkili organik bileşiklerin biyoerişilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada en yaygın kullanılan yedi lastik türü ve bunlarla ilişkili kimyasallar Gökkuşuğu Alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) temelli bir in vitro sindirim modeli kullanılarak balık sindirim sıvılarındaki biyoerişilebilirliği incelenmiştir. Çalışma sonucunda seçilen bileşiklerin %0.06-44.1'inin biyoerişilebilir olduğu bildirilmiştir. Bu kimyasalların tek başına yutulması ile karşılaştırıldığında lastik polimerlerinin sisteme dahil olması kimyasalların biyoerişilebilirliklerinde çeşitli değişikliklere neden olmuştur. Fakat genel olarak kimyasalların lastik polimerleri ile birlikte yutulmasının biyoerişilebilirliklerinde artmaya neden olduğu ve toksikolojik açıdan daha riskli hale geldiği bildirilmiştir (Masset vd., 2022).

Pestisitler

Modern tarım uygulamalarında sıklıkla kullanılan pestisitler, yüksek oral biyoerişilebilirlikleri nedeniyle insan sağlığına tehdit eden önemli unsurlardan biridir. Ma vd. (2024), muz ve mangolarda yaygın olarak kullanılan pestisitlerin oral biyoerişilebilirliğini etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Çalışmada tespit edilen 10 pestisit örneğinde en yüksek biyoerişilebilirliğin (oral faza göre) mide ve bağırsak sindiriminden sonra gerçekleştiği, pestisit biyoerişilebilirliğinin büyük oranda katı/sıvı oranının artması ile azaldığı bildirilmiştir. Muzdaki pestisitler mangodaki pestisitlere göre daha yüksek bir biyoerişilebilirlik sergilemiştir. Protein, lipit, karbohidrat ve diyet lifinin pestisit biyoerişilebilirliğini %9-48 oranında azaltabildiği bilinmektedir. Öte yandan pepsin ve α -amilaz seviyelerindeki düşme nedeniyle yetişkinler ve yaşlıların en az, bebeklerin ise bu kirleticiler açısından en yüksek biyoerişilebilirliğe sahip olduğu ve risk grubunda oldukları bildirilmiştir.

Çevresel kirleticilerden olan organik kirleticiler, elektronik kirleticiler, ağır metaller, mikropplastikler ve pestisitlere ait biyoerişilebilirlik çalışmalarının yöntem ve diğer teknik bilgilerine yönelik ayrıntılı bir aktarımı Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Bazı çevresel kirleticilere ait biyoerişilebilirlik çalışmalarının yöntem ve diğer teknik bilgilere yönelik ayrıntılı bir aktarımı

ÇEVRESEL KİRLETİCİ İN KAYNAĞI VE KONUMU	VİTRO İN VİTRO BİYOERİŞİLEBİLİRLİK ORANI (GASTRİK) BİYOERİŞİLEBİLİRLİK ORANI (İNTESTİNAL)	VİTRO İN VİTRO BİYOERİŞİLEBİLİRLİK ORANI (İNTESTİNAL)	İN VİTRO BİYOERİŞİLEBİLİRLİK ANALİZ YÖNTEMİ
PAH, PCH, OPFR / Çin / Ou vd. (2025)	PAH, PCH, OPFR için gastrik biyoerişilebilirlik oranı sırasıyla %1.74, %2.51, %1.37 şeklindedir. %96.9 şeklindedir.	PAH, PCH, OPFR için intestinal biyoerişilebilirlik oranı sırasıyla %91.0, %39.6, %96.9 şeklindedir.	Çalışmada simüle edilmiş gastrik (1.76 gr sodyum klorür (NaCl), 0.1 gr trisodyum sitrat dihidrat, 84 µL DL-malik asit disodyum tuzu, 100 µL asetik asit ve 0.25 gr pepsin eklenmek suretiyle) ve intestinal sıvılar (0.4 gr domuz safrası ve 0.12 gr pankreatin) hazırlanmıştır. Örnekler, gastrik sıvıda (pH:1.5, 37 °C) 1 saat intestinal sıvıda (pH:7) 4 saat süresince (100 dev/dakika osilatör hızında) inkübe edilmiş ve içerik analizi yapılmıştır.
20 balık türünde PAH. / Hong Kong / Wang vd. (2010)	Ortalama PAH biyoerişilebilirliği tüm örneklerde %24 ile %31 arasında değişmiştir.	Dinamik in vitro gastrointestinal simülasyon. (Yönteme dair ayrıntılı bilgiye ulaşılamamıştır)	
Elektronik atık geri dönüşüm tesisinden toplanan toz örneklerinde ağır metal. / Gana (Accra Kenti) / Dodd vd. (2023)	Çalışmada Ag, As, Co, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn ağır metallerinin gastrik biyoerişilebilirlik değerleri sırasıyla; %65.8, %23.3, 41.3, %8.8, %58.9, %67.5, %38.3, %58.4'tür.		Çalışmada elenmiş toprak örneklerinin 1 gr'ı, pH'ı 1.5 olan 100 ml 30 gr/l glisin ve konsantre HCl çözümü içinde 1 saat boyunca karıştırılarak muamele edilmiştir. Ardından ekstrakt filtrelenmiş ve ICP-MS ile analiz edilmiştir.
Kirlenmiş topraklardan numunelendirilmiş 16 ayrı süpergen arsenat ve arsenik trioksitten (As ₂ O ₃) kaynaklanan As ağır metali. / Namibya / Drahota vd. (2025)	Çalışmada farklı fazlarda gastrik As biyoerişilebilirliği %0.15 ile %100 arasında değişmiştir. En yüksek biyoerişilebilirlik, Ca ve Ca-Mg arsenatları ve Cu, Co, Ni, Pb ve Zn arsenatları gibi alkali koşullar altında karardı olan minerallerde gözlenmiştir.		Öncelikle glisin, HCl ve su ile açlık durumunda gastrik ortamı simüle eden bir çözümü (pH 1.5) hazırlanmıştır. Karışıma kompozit kuvars, toprak tozu ve arsenik fazları eklenmiştir (Sıvı/Katı oranı 100/1). Karışım 37 °C'de 1 saat (80 rpm) inkübe edilmiştir. İnkübasyon boyunca pH düzenli aralıklarla ölçülüp gerekli noktalarda HCl eklemesi yapılmıştır. Daha sonra karışım 0.45 µm'lik bir naylon filtreden süzülerek ICP-OES ile analiz edilmiştir.
Termal alanlardan kaynaklanan As ağır metali. / İtalya (Merkezi Viberto bölgesi) / Rimondi vd. (2022)	Örneklendirme noktalarına bağlı olarak gastrik biyoerişilebilirlik %6 ile %100 arasında değişken bulunmuştur.		Çalışmada <250 µm toprak parçacık boyut fraksiyonlarından yaklaşık 1 ± 0.05 gr'ı alınarak sentetik gastrik çözümü (50 mL glisin (0.4 M) ve HCl içeren çözümü/ pH: 1.50 ± 0.05) içerisine aktarılmıştır. Bu karışım 37 °C'de 1 saat boyunca 30 rpm'de karıştırılmıştır. Ardından karışım santrifüj edilip üst faz nitrat selüloz filtrelerle (0.45 µm) ayrılmış ve analize kadar 4 °C'de saklanmıştır. Ardından karışım AAS cihazı ile analiz edilmiştir.
(Volkanik kayaçlardan 10, travertenlerden 26 örnek)			
Ağır metaller içeren toprakla kirlenmiş danı unundaki Fe minerali. / Malavi / Muleya vd. (2023)	Sırasıyla %0, %0.1, %0.5 ve %1 oranında toprakla kirlenmiş unlardaki Fe biyoerişilebilirliği kirlilik düzeyi arttıkça azalmıştır. Öte yandan bu azalma istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.		Çalışmada oral fazda saf su, kalsiyum klorür (CaCl ₂) ve 1 M NaOH (pH 7 için) kullanılmıştır. Karışım 37 °C'de 2 dk çalkalanmıştır. Gastrik fazda (pH 3 için) 1 M HCl eklenmiş ve 2 saat inkübe edilmiştir. İntestinal fazda (pH 7 için) 1 M NaOH eklenmiş ve 2 saat inkübe edilmiştir. Ardından karışım diyaliz membranından geçirilmiş ve ICP-MS cihazı ile analiz edilmiştir.
Sanayi bölgesi, trafik kavşakları ve tarım alanlarından toplanan yol tozlarındaki iz metaller. / Güney Çin (Guangzhou Kenti) / Tang vd. (2022)	Çalışma sonuçlarına göre biyoerişilebilirlik değerleri; Zn için % 57.1 ± 21.7, Cd için %47.4 ± 23.3, Cu için %30.6 ± 20.5, As için %16.6 ± 20.3 oranında bulunmuştur.		Çalışmada 1 gr yol tozu örneği 150 ml simüle gastrik sıvıya (1 l deiyonize su, 10 gr pepsin ve 8.77 gr NaCl / pH 2.5) eklenmiş, karışım 37 °C'de 150 rpm'de yatay olarak çalkalanmıştır. İntestinal fazda safra (3.5 g/l) ve pankreatin (0.35 g/l) eklenmiş ve pH 5.5'e ayarlanmıştır. Tüm çözeltiler santrifüj edilip 0.22 µm'lik bir filtreden süzülüş ve içerik bakımından analiz edilmiştir.

Çizelge 1. Devamı

Altı farklı ilçede bulunan 58 anaokulundan toplanan toz örneklerindeki ağır metaller./ Çin (Xiamen Kenti) / Ma vd. (2021)	V, Co, Ni, As, Mo, Cr, Mn, Cu, Zn, Pb'e ait ortalama biyoerişilebilirlik oranları sırasıyla %15.68, %14.10, %24.24, %40.74, %7.62, %5.98, %25.93, %29.27, %66.16, %47.56'dır.	Çalışmada simüle gastrik sıvı olan 1 M gisin (1000 ml ultra saf suda çözölmüş 30.03 gr gisin) HCl ile pH 1.5 olacak şekilde ayarlanmış ve 37 °C'de ısıtılmıştır. Ardından 0.05 gr kentsel toz örneği sıvıya eklenmiş, 1 saat inkübe edilmiştir. 2 dakika boyunca 12.000 rpm'de santrifüj edilip üstteki sıvı 0.45 µm'lik bir filtreden süzölmüş ve %2'lik HNO ₃ ile seyreltiltikten (1/1) sonra ICP-MS ile analiz edilmiştir.
Araç emisyonlarından etkilenen bir trafik eğitim tesisinden toplanan yol tozları içerisindeki ağır metaller./ Çin (Guangzhou Kenti) / Liu vd. (2023)		Çalışmada 2 yöntem birlikte kullanılmıştır. İlk olarak 150 mL gastrik sıvıya 1 gr yol tozu eklenmiş ve pH 2.5'a ayarlanmıştır. Fizyolojik bazı ekstraksiyon yönteminde ise 100 ml gastrik sıvıya 1 gr yol tozu eklenip pH 1.8'e ayarlanmıştır. Karışımlar 37 °C'de 150 rpm'de yatay olarak çalkalanmıştır. Ardından 10 dakika boyunca 4000 rpm'de santrifüj edilip intestinal faz için Na ₂ CO ₃ eklenmek sureti ile ilk yöntem için pH 5.5'a, diğer yöntemde göre pH 7'ye ayarlanarak karışma safra ve pankreatin eklenmiştir. Karışımlar 0.22 µm'lik bir filtreden süzölmüş ve içerik bakımından analiz edilmiştir.
Toprak, tavan tozu, ev tozu ve sokak tozu olmak üzere 118 örnekte çeşitli ağır metaller./ Slovenya (Maribor Kasabası) / Gabersek vd. (2024)	Gastrik fazda en fazla biyoerişilebilirlik sergileyen ağır metaller; Cd (%53), Cu (%28), Pb (%34) ve Zn (%48)'dir. Ardından sırasıyla As, Ni ve La'nın ortalama biyoerişilebilirlikleri %10-%20 arasında, Ce, Cr, Sb ve Li'nin altında bulunmuştur. Gastrik fazdan intestinal ortalama biyoerişilebilirlikleri %5-%10 arasında bulunmuştur. Gastrik fazda en az biyoerişilebilir ağır metaller ise Hg (%3.8) ve Sn (%2.2)'dir.	Çalışmada in vitro birleşik BARGE (UBM) yöntemi kullanılmıştır. Her faz için 0.6 gr numune kullanılmış ve oral fazda (pH 6.5) 9 ml tükürük simüle sıvısı içerisinde bulunan numune 10 saniye çalkalanmıştır. Gastrik fazda 13.5 ml gastrik simüle sıvısı karışma eklenmiş ve pH ayarlaması (pH:1.5) HCl ile yapılmış, 37 °C'de 1 saat çalkalanmıştır. Ardından karışımlar 4500 gr'da 15 dakika santrifüj edilmiş ve 27 ml intestinal simüle sıvısı ve 9 ml safra eklenmiş ve pH NaOH ile 6.3'e ayarlanmıştır. Daha sonra karışımlar dinamik intestinal faz için 37 °C'de 4 saat çalkalanmış ve gastrik fazda olduğu gibi 4500 g'de 15 dakika santrifüj edilmiştir. İçerik analizi ICP-MS cihazı ile yapılmıştır.
Maden atıklarının hava yolu ile yayılımı sonucu oluşan toz örneklerindeki çeşitli ağır metaller./ Meksika (Hidalgo Kenti) / Jesús Eulises vd. (2021)	Çalışmada gastrik biyoerişilebilirlik As için %2, Cd ve Zn için %43, Pb için %1.6 saptanmıştır.	Çalışmada 200 mg toz örnekleri 20 ml 'Gamble' çözeltisi içerisinde eklenmiştir. Karışım 37 °C'de 24 saat tutulduktan sonra 10 dakika 4000 rpm'de santrifüj edilmiş ve sonrasında filtrelennmiştir (Whatman, no 42). Ardından 10 ml gastrik çözelti (0.4 M gisin, pH:1.5) içerisine aktarılmış ve 37 °C'de 1 saat tutulmuştur. Tekrar filtrelenip (Whatman, no 42) AAS cihazı ile analiz edilmiştir.
Maden atıklarından yayılan toz örneklerindeki çeşitli ağır metaller./ Meksika (Zimapan Kenti) / Corona Sanchez vd. (2021)	Çalışma sonucunda metaloidlerin biyoerişilebilirlikleri Pb > Zn > As > Cd şeklinde saptanmış ve sırasıyla Pb için %37, Zn için %15, As için %6, Cd için %5 olarak bildirilmiştir.	Çalışmada gastrik faz için yalnızca <10 µm boyutundaki partikül örneği çalışılmıştır. Bu bağlamda 20 ml gastrik simüle sıvısı örnek ile birleştirilmiştir. Numuneler 37 °C'lik bir su banyosunda 1 saat tutulmuştur. Ardından 4000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilmiş ve sonrasında filtrelennmiştir (Whatman, no 42). Filtratlar ICP-OES cihazı kullanılarak analiz edilmiştir.
Bir kurşun eritme tesisinin çevresindeki evlerde, pencere pervazlarındaki toz örneklerindeki Pb elementi./ Çin (Jiyuan Kenti) / Xing vd. (2020)	Çalışma sonucunda gastrik simüle sıvıdaki biyoerişilebilir Pb oranı intestinal simüle sıvıdan daha fazla bulunmuştur. Tüm örneklerde gastrik Pb biyoerişilebilirliği %68.9-89.9 aralığında değişmiştir.	Çalışmada fizyolojik bazı ekstraksiyon yöntemi kullanılmıştır. Gastrik fazda 0.2 gr numune 20 ml gastrik simüle sıvısına eklenmiş, 37 °C'de 1 saat çalkalanıp 20 dakika santrifüj edilmiştir. Intestinal faz için 20 ml intestinal simüle sıvısı karışma eklenmiş ve 4 saat boyunca 37 °C'lik su banyosunda çalkalanmıştır. Örnekler analizden önce 4 °C'de saklanmış ve her iki faz sonuçları da AAS'de analiz edilmiştir.

Çizelge 1. Devamı

Demir kompleksinden alınan toz örneklerindeki çeşitli ağır metaller. / İran / Soltani vd. (2021)	Çalışmada gastrik fazda ortalama göreceli biyoerişilebilirlik sırayla; Fe (0.97 g/kg) > Cu (49.04 mg/kg) > Co (3.10 mg/kg) > Ni (5.04 mg/kg) > As (2.24 mg/kg) > Pb (0.70 mg/kg) > Cd (0.022 mg/kg) şeklinde bildirilmiştir.	Çalışmada intestinal fazda ortalama göreceli biyoerişilebilirlik çoğu ağır metalde gastrik faza göre azalmış ve sırayla; Fe (0.18 g/kg) > Cu (31.79 mg/kg) > Ni (4.32 mg/kg) > As (2.23 mg/kg) > Co (2.02 mg/kg) > Pb (0.51 mg/kg) > Cd (0.020 mg/kg) şeklinde bildirilmiştir.	Çalışmada in vitro birleşik BARGE yöntemi (UBM) kullanılmıştır. 0.6 gr toz numunesi (<250 µm) sırasıyla; oral fazda (37 °C'de, pH 6.5) 5 dakika, gastrik fazda (37 °C'de, pH 0.9-1) 1 saat ve intestinal fazda (37 °C'de, pH 6.3) 4 saat inkübe edilmiştir. İntestinal fazda safra ve duodenum sıvıları karışma eklenmiştir. Ardından ICP-MS cihazı ile içerik analizi yapılmıştır.
Terkedilmiş bir maden sahasının etrafındaki kaya, atık su, toprak ve konut çevrelerinde bulunan toksik elementler. / İtalya (Gorno Kenti) / Mehta vd. (2020)		Tüm numuneler için, As ve Cd biyoerişilebilirliği sırasıyla %5-33 ve %72-98'dir. Co ve Cr'nin toplam konsantrasyonlarının çok düşük olduğu saptanmıştır. Atık kaya, atık su ve toprak örneklerinde Cu biyoerişilebilirliği sırasıyla %54, %49 ve %41 olarak bulunmuştur. Tüm örnekler için Ni biyoerişilebilirliği ortalama %33 olarak bulunmuştur.	Çalışmada in vitro birleşik BARGE yöntemi (UBM) kullanılmıştır.
Bir Ni-Cu madencilik tesisinden eritme cürufu, maden atıkları ve toprağın toz fraksiyonlarında çeşitli ağır metaller. / Selebi-Phikwe / Ertler vd. (2022)		Cüruf tozu numuneleri için en yüksek biyoerişilebilir ağır metaller; Zn (%66.8), Co (%29.2), Cr (%27.1), As (%24.5), Pb (%17.5) şeklindedir. Maden atığı numunelerinde ise Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V ve Zn açısından ICP-OES ve ICP-MS kombinasyonu ile en yüksek biyoerişilebilir ağır metaller Ni (%21) ve Co (%10.3) şeklinde saptanmıştır. Toprak tozu numunelerindeki en yüksek biyoerişilebilir ağır metaller ise V (%11.1) ve Ni (%2.1) şeklindedir. Sonuçlar <48 µm partikül boyutu için aktarılmıştır.	Numuneler, sıvı-katı oranı 100/1 olan, HCl ile pH 1.5'a ayarlanmış 0.4 mol/L glisin çözeltisine eklenmiştir. Karışım, bir 37°C'de 1 saat boyunca hafifçe çalkalanmıştır. Ardından ekstraktlar 0.45 µm'lik bir membran filtreden geçirilmiştir. Ardından As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V ve Zn açısından ICP-OES ve ICP-MS kombinasyonu ile analiz edilmiştir.
Mikroplastiklere yapışan fenantren (PHE) ve türevleri. / Çin / Hu vd. (2022)	Gastrik fazda, PHE ve PHE türevlerinin geniş bir biyoerişilebilirlik aralığına sahip olduğu (%13.89 ± 1.49'dan %49.18 ± 0.68'e kadar) saptanmıştır. Bu durum mikroplastiklerin dokusundan ziyade PHE ve PHE türevlerinin hidrofobisiteyle ilgili bulunmuştur. Zayıf hidrofobisiteye sahip PHE türevleri daha güçlü suda çözünürlükleri nedeniyle, hidrofobik PHE türevlerinden daha verimli bir şekilde mikroplastiklerden desorbe olmuşlardır.	Gastrik fazda, PHE ve PHE türevlerinin biyoerişilebilirlik oranları zamanla doğrusal olarak artmıştır ve süreç sonunda %53-%90'a ulaşmıştır. Bu fazda PHE ve PHE türevlerinin biyoerişilebilirlikleri mikroplastiklerin dokusuyla ilişkilendirilmiş, kaucuk formdaki mikroplastiklerin (polietilen/PE ve Polipropilen/PP gibi) PHE ve PHE türevlerini barındırmak için daha fazla serbest hacme sahip olabilmelerine rağmen, kirleticilerin kararlı olmadığını ve kolayca desorbe edildiğini göstermiştir.	Çalışmada fizyolojik bazlı ekstraksiyon yöntemi kullanılmıştır. 10 mg PHE ve PHE türevi taşıyan mikrokplastik, 20 ml gastrik simüle sıvılarına (37 °C, pH 2.5) eklenmiştir. Karışım kararlı bir şekilde 150 devirlik bir çalkalayıcıda (10, 20, 40, 60 ve 120 dakika) inkübe edilmiştir. Gastrik fazdan sonra (NaOH ile) pH 2.5'tan 7.0'ye ayarlanmış ve karışma 10 mg tripsin ve 35 mg kolat eklenmiştir. Karışım kararlı bir şekilde 150 devirlik bir çalkalayıcıda inkübe edilmiştir (20, 40, 60, 120, 240, 360 ve 480 dakikalarda örnekendirilmiştir). Ardından paslanmaz çelik bir elek içine yerleştirilen 0.25 gr Tenax® gözenekli polimer ile filtre edilmiştir. Ardından numuneler içerik açısından HPLC cihazı ile incelenmiştir.

Çizelge 1. Devamı

Akdeniz midyelerinde bulunan mikroplastikler (polietilen, polistiren, polietilen tereftalat). / Akdeniz (Ebro Delta) / Vega-herrera vd. (2024)	Mikroplastiklerin varlığından midyelerde bulunan triklosan ve polifloroalkil gibi organik kirleticilerin biyoerişilebilirlik oranları anlamlı bir şekilde artmıştır.	Çalışmada 2'şer gr midye örneği ön hazırlıktan sonra; sırasıyla oral fazda 4 ml tükürük simüle sıvısı içerisinde (pH: 7) 5 dakika, gastrik fazda 8 ml gastrik simüle sıvısı (pH: 2) içerisinde 2 saat ve intestinal fazda 8 ml duodenum sıvısı ve 4 ml safra sıvısı içerisinde (pH:7) 2 saat inkübe edilmiştir. Ardından, karışımlar 10°C'de 30.000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilerek biyoerişilebilir fraksiyon ayrılmış ve bu fraksiyonlar analize kadar -20°C'de saklanmıştır. Mikroplastik analizi HPLC cihazı ile yapılmıştır.
Polipropilen mikrofiber çalışmada mikrofibre yapışarak insan (TC) ve siprofloksasinin (CIP) antibiyotiklerini. / Çin / Wu vd. (2023)	Çalışmada 0.1 gr polipropilen mikrofiberin 10 mg/l TC/CIP ile simüle edilmiş insan gastrointestinal sıvılarına maruz bırakılması sonrasında, simüle edilmiş insan tükürüğünde, gastrik ve intestinal sıvılarda tükürüğünde, gastrik ve intestinal sıvılarda TC konsantrasyonları sırasıyla 0.440, 0.678 ve 1.840 mg/l ve CIP konsantrasyonları sırasıyla 0.700, 1.367 ve 3.281 mg/l olarak bulunmuştur.	Çalışmada dinamik bir modelde simüle edilmiş insan gastrointestinal sıvıları kullanılmıştır. Polipropilen mikrofibre içeren 0.1 gr TC/CIP karışımı 37 °C ve 150 rpm reaktörde insan tükürük sıvısı, mide sıvısı ve bağırsak sıvılarında sırasıyla 60 saniye, 4 saat ve 8 saat boyunca (her biriyle 20 ml karıştırılmasıyla) tutulmuştur. Daha sonra, 0.3 ml reaksiyon çözeltisi tükürük sıvısından (0, 10, 20, 40 ve 60 saniye), mide sıvısından (0, 1, 2, 3 ve 4 saat) ve bağırsak sıvısından (0, 2, 4, 6 ve 8 saat) 0.22 µm naylon membran kullanılarak çıkarılmış ve kalıntı konsantrasyonu HPLC kullanılarak belirlenmiştir.
Sentetik futbol sahalarında dolgu olarak kullanılan lastik kauçuğundan elde edilen 18 çeşit PAH. / İspanya / Armada vd. (2023)	Çalışmada 17 çeşit PAH'n ortalama biyoerişilebilirlik yüzdeleri %0.044 ile %63 arasında değişmiştir.	Çalışmada UBM yöntemi kullanılmıştır. Sindirim simülasyonunda ilk olarak, 200 mg kauçuk granülata örneği, 50 ml polipropilen santrifüj tüpüne yerleştirilmiştir. Ardından sırasıyla 3 ml tükürük ve 4.6 ml mide sıvısı eklenmiş ve pH 1.2 ± 0.1'e ayarlanmıştır. Tüpler 37 ± 2 °C'de 1 saat boyunca çalkalanmıştır. İntestinal faz için, önceki karışma 9.2 ml duodenum sıvısı ve 3 ml safra eklenmiş ve pH 6.3 ± 0.5'e ayarlanmıştır. Karışım 37 ± 2 °C'de 4 saat boyunca tekrar çalkalanmıştır. Son olarak karışım 1479 rc'de 30 dakika santrifüj edilmiştir ve süpernatantlar toplanmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada PAH'ların ve/veya diğer organik bileşiklerin adsorpsiyonunu önlemek için karışma MeOH (%5, 1/1 oranında) eklenmiştir.
Muz ve mango örneklerinde tespit edilen 10 çeşit pestisit. / Çin (Tianjin Kenti) / Ma vd. (2024)	Pestisitlerin çoğunluğu simüle edilmiş bağırsak sıvısında gastrik sıvıya göre nispeten daha yüksek biyoerişilebilirlik göstermiştir. İntestinal sıvıda pestisit türlerinin ortalama biyoerişilebilirliği %40-95 arasında değişmiştir. Muz örneklerindeki pestisitlerin ortalama gastrik biyoerişilebilirliği %30.75 ile %76.61 arasında, mango örneklerindeki pestisitlerin ortalama gastrik biyoerişilebilirliği %14.65 ile %82.57 arasında değişmiştir.	Çalışma çok yönlü olarak tasarlanmış olup temelde INFOGEST modelini baz almıştır. Çalışmada oral fazda ilk olarak 0.5 gr numune 150 U/ml α-amilaz ile birlikte 10 ml simüle edilmiş tükürük sıvısına eklenmiştir. Oral fazda pH 1 M/l HCl kullanılarak 7.0 ± 0.1'e ayarlanmış ve karışım 37 °C'de 40 rpm'de 5 dakika çalkalanmıştır. Gastrik fazda (pH: 2.5) 10 ml oral sindirim sıvısı ile pepsin içeren 15 ml simüle gastrik sıvı karıştırılmış, ardından 2 saat boyunca 37 °C'de 150 rpm'de çalkalanmıştır. İntestinal fazda pH (NaHCO3 kullanılarak) 7.0 ± 0.1'e ayarlanmış ve ardından safra tuzu (20 mmol/l) ve pankreatin (4000 U/ml) içeren 15 ml simüle edilmiş bağırsak sıvısı eklenmiştir. Karışım 150 rpm'de çalkalanarak ve 37°C'de 4 saat inkübe edilmiştir. İnkübasyondan sonra numuneler ayrı ayrı pestisitler açısından analiz edilmiştir.

gr: gram, µL: mikrolitre, l: litre, rpm: dakikadaki devir sayısı, µm: mikrometre, M: molar, mg: miligram, mmol: milimol, ref: bağıl santrifüj kuvveti.

gr: gram, µL: mikrolitre, l: litre, rpm: revolutions per minute, µm: micrometer, M: molar, mg: miligram, mmol: millimole, ref: relative centrifugal force.

Besin Matrisi ve Besin Öğeleri

Diyetle alınan besin matrisleri; tüm diğer besin öğeleri, çevresel kirleticiler, gıda katkı maddeleri vb. unsurların farmakokinetiğini doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmalar BaP biyoerişilebilirliğinin besin matrisiyle doğrudan ilişkili olduğunu bildirmiştir (Kawamura vd., 1988). Yu vd. (2012), Şanghay'dan toplanan 18 çeşit gıdada (tavuk, balık ve kabuklu deniz ürünleri) PAH biyoerişilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada PAH bu gıdalarda çeşitli konsantrasyonlarda bulunmuş ve in vitro deneyde ortalama PAH biyoerişilebilirliği ölçülmüştür. Çalışma sonucunda biyoerişilebilirlik oranları %29-61 arasında değişmiştir. Çalışmada kabuklu deniz ürünlerinden salyangoz ve istiridye örneklerinde PAH biyoerişilebilirliği maksimum seviyede bulunmuştur.

Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi'nin (EFSA/2022) yayınladığı bir rapora göre gıda matrisi kimyasal kirleticilerden ağır metallerin biyoerişilebilirliği üzerinde oldukça etkindir. Raporda, pek çok çalışmanın sonuçlarına göre balık, deniz ürünleri, deniz yosunu, pirinç, bazı sebzeler, mantarlar gibi gıda matrislerinde metaloitlerin veya ağır metallerin biyoerişilebilirliği sonuçları istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Sonuçlara göre As biyoerişilebilirliği sırasıyla balık (%80-100), deniz ürünleri (%45-85) ve deniz yosunu (%50-80) gıda matrislerinde çeşitli oranlardadır. Cıva biyoerişilebilirliği balıklarda ortalama %10-40 iken deniz ürünlerinde %0-10 arasındadır. Kurşun biyoerişilebilirliği deniz ürünlerinde %25-45 iken yeşil yapraklı sebze türlerinde %15-65 arasında değişmiştir. Kadmiyum biyoerişilebilirliği ise sırasıyla deniz ürünlerinde %35-85, yeşil yapraklı olmayan sebze türlerinde ve mantarlarda %50-80, balıklarda %40-50, pirinçte %20-50, yeşil yapraklı sebzelerde %10-30 ve deniz ürünlerinde %15-25 arasında değişmiştir. Bu sonuçlar çevresel kirleticilerin biyoerişilebilirliğinin anlaşılmasında gıda matrisi başta olmak üzere pek çok dış faktörün etkili olduğunu göstermektedir.

Diyet yağı çevresel kirleticilerin vücuda alınmasında önemli bir parametredir. Özellikle diyet yağlarının %90'ını oluşturan trigliseritler (TAG), mideden bağırsağa geçiş sırasında PAH'lerin çözünebileceği bir ortam oluşturmaktadır. Nitekim; TAG alımı ile BaP maruziyeti arasında pozitif korelasyonlar saptanmıştır. Diğer yandan diyet lifinin BaP emilimini azaltabildiğine dair sonuçlar da mevcuttur (Harris vd., 2013). Bağırsakta safra tuzlarının varlığı ise misel çözünürlüğünü kolaylaştırarak BaP'lerin de enterositlere taşınmasını oradan da vücuda lenf

sistemi ile dahil olmasını kolaylaştırmaktadır (Harris vd., 2013). Zhou vd. (2024), sığır eti, domuz eti, domuz karaciğeri, tavuk eti ve tatlı su balığı olmak üzere 5 hayvansal gıdada pentaklorofenol (PCP) oral biyoerişilebilirliğini incelemişlerdir. Üç farklı kontaminasyon durumu için saf su ile seyreltilerek farklı konsantrasyonda hazırlanan PCP numunelere eklenerek homojenize edilmiştir. Çalışmada daha yüksek yağ oranına sahip domuz eti ve sığır eti PCF biyoerişilebilirliğini artırmada önemli bir faktör olmuştur. Öte yandan tavada kızartma işleminin PCP biyoerişilebilirliğini artırdığı bildirilmiştir, bu nedenle maruziyetten kaçınmak amacıyla kaynatma ve buharda pişirme yöntemlerinin kullanılması tavsiye edilmiştir. Lestido-Cardama vd. (2024); konserve deniz ürünlerinde bulunan BpA diglisidil eter (cyclodi-BADGE)'nin in vitro biyoerişilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda cyclodi-BADGE'nin biyoerişilebilirlik oranının %90.9-112.3 olduğu ve yağlı gıdalarla birlikte tüketildiğinde bu oranın arttığı bildirilmiştir. Ayrıca domatesli ton balığı konservesi örneği ele alınarak tahmini diyet maruziyeti hesaplanmış ve 14.26 µg/kg/gün ile tolere edilebilir günlük alımın aşıldığı bildirilmiştir. Dolayısıyla bu çalışma özellikle konserve gıdaların tüketiminde oluşabilecek maruziyetleri vurgulamaktadır. Bir başka çalışmada kirlenmiş topraktaki poliklorlu PCB biyoerişilebilirliğine çeşitli gıda türlerinin etkisi in vitro gastrointestinal simülasyon ile incelenmiştir. Çalışmada tam sindirim sıvısına yağ (oleik asit) eklenmesinin protein (sığır serum albümini) veya glikoz eklenmesinin tersine PCB biyoerişilebilirliğini artırdığı bildirilmiştir. Dolayısıyla kirleticilerin biyoerişilebilirliğinin besin ögesi türüne göre ele alınması gerektiği vurgulanmıştır (Starr vd., 2019). Ek olarak, PAH bileşikler lipofilik bileşiklerdir ve lipid benzeri moleküller PAH'lerin biyoerişilebilirliklerini etkiler. PAH gibi çevresel kirleticilerin biyoerişilebilir olmayan kısımları da insan sağlığına zararlıdır. Nitekim yapılan çalışmalarda enterositlere gireme bile PAH'lerin kolon ve rektal kanserler gibi GI tümörlere neden olduğu bildirilmektedir (Harris vd., 2013). Hamidi vd. (2022), ızgara edilmiş dana eti ve tavuktaki PAH biyoerişilebilirliğini etlerin pişme derecesi ve yağ içeriklerine göre in vitro deneysel simülasyonda incelemişlerdir. Çalışmada PAH'lerin biyoerişilebilirliği pişme derecesi (pişirme süreleri ve etlerin kızarma oranları dikkate alınarak az pişmiş, orta pişmiş ve iyi pişmiş) arttıkça yükselmiş ve etlerdeki yağ içeriği ile pozitif korelasyon göstermiştir.

Diyet lifi ile ilgili çalışmalar ise oldukça kısıtlıdır. Lopez-ruiz vd. (2023), diyet lifinin mikotoksinlerin biyoerişilebilirliği

üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 4 mikotoksin türünün (zearalenon, deoksinivalenol, HT-2 ve T-2 toksinleri) lifle zenginleştirilmiş ve zenginleştirilmemiş bisküvilerle birlikte tüketildiğinde biyoerişilebilirliği incelenmiştir. K-karragenanın diyet lifinin zearalenon toksininin biyoerişilebilirliğini %20'nin altına çekebildiği, pektin diyet lifinin ise daha çok deoksinivalenol, HT-2 ve T-2 toksinlerinin biyoerişilebilirliğini etkilediği bildirilmiştir.

Yapılan bir çalışmada smoothielerin (taze meyveler bazlı), nanofraksiyonlar içeren yaygın bir gıda katkı maddesi olarak kullanılan E171 kodlu titanyum dioksit (TiO₂) biyoerişilebilirliğini azalttığı bildirilmiştir. Çalışmada özellikle gastrik ortamda azalan biyoerişilebilirliğin ortamdaki düşük pH nedeniyle nanopartiküllerin aglomerasyonundan kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Öte yandan çalışma sırasında ortama eklenen *Lactiplantibacillus plantarum* B suşunda TiO₂ varlığında hücre morfolojik değişimler, hücre duvarlarında büzülme ve deformasyonlar gözlenmiş ve bakterilerin sindirim sırasında büyümesi önemli ölçüde azalmıştır (Baranowska-Wójcik vd., 2022). Gıda katkı maddeleri genel olarak çevresel kirleticiler olarak anılmasa bile, üretim operasyonları ve tüketim sırasında çok çeşitli olumsuz çevresel etkileri mevcuttur.

Diğer Dış Faktörler

Biyoerişilebilirlik kavramı, besin matrisinin yanı sıra pH, enzim miktarı, sıcaklık gibi pek çok dış faktörden etkilenebilmektedir. Lestido-Cardama vd. (2022), BpA'nın in vitro gastrointestinal sindirim sırasında biyoerişilebilirliği ve kimyasal davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada gastrik pH, gıda matrisi ve enzimler gibi faktörlerin etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda BPS'nin sindirim süreci sonunda %50-80 aralığında varlığını koruduğu bildirilmiştir. Öte yandan pH'nın tek başına etkili olmadığı, enzim varlığının ise bağırsak fazında biyoerişilebilirliği hafif azaltmıştır. Ayrıca hazır soya içeceği (içerisinde su, soya, deniz tuzu, 2g/100 mL yağ, 3.6g/100 mL protein, 22 mg/100 mL izoflavon bulunmaktadır) biyoerişilebilirliği %5 oranında azaltmıştır. Dış faktörlerinin önemine vurgu yapan bir başka çalışmada Lopez-Vazquez vd. (2022), simüle edilmiş açlık ve tokluk koşullarında (açlık koşullarında gastrik pH:1.20±0.05, 1.5 mL tükürük sıvısı, 4.6 mL duodenal sıvı; tokluk koşullarında gastrik pH:2-3, 1.2 mL tükürük sıvısı, 2.4 mL duodenal sıvı) BpA ve fitalat esterlerinin biyoerişilebilirliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, tokluk durumunda açlığa göre daha yüksek mikrobiyal biyoerişilebilirliği saptanmış, bu durum sisteme

dahil olan daha fazla miktarda yüzey aktif molekülün varlığına atfedilmiştir.

Besinlere uygulanan çeşitli pişirme yöntemleri ve mutfak uygulamalarının da kirleticilerin biyoerişilebilirliği üzerinde etkin olduğu söylenebilir. Jiao vd. (2021), Pasifik kaynaklı istiridyelerde deltametrin biyoerişilebilirliğini farklı pişirme yöntemlerine göre in vitro gastrointestinal simülasyon ve hücre hatları üzerinde test etmişlerdir. Çalışma sonucunda çiğ istiridyede deltametrin biyoerişilebilirliği %82, buharda pişirmede %65, kavurma işleminde %51 oranında bulunmuştur. Öte yandan gastrik sindirimde intestinal sindirime göre daha yüksek biyoerişilebilirlik gözlenmiş ve bu gastrik pH'ya atfedilmiştir. Ayrıca safra gibi intestinal sindirim faktörlerinin deltametrin gibi bileşiklerin kimyasını yapısal olarak etkiliyor olabileceği bildirilmiştir. Costa vd. (2022), Portekiz kıyılarından hasat edilen çeşitli deniz ürünlerinde (Siyah kını balık (*Aphanopus carbo*), Ton balığı (*Thunnus* sp.), Kılıç balığı (*Xiphias gladius*), Mavi köpek balığı (*Prionace glauca*) olmak üzere) Hg'nin mevcudiyeti ve biyoerişilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada balık örneklerinde Hg miktarı mevzuatta belirtilen yasal sınırların altında bulunup, Hg biyoerişilebilirliği %10-90 arasında değişmiştir, bu değer kılıç balığı, mavi köpek balığı, ton balığı gibi yırtıcı türlerde artmıştır. Çiğ balıklara göre test edilen pişirme yöntemlerinde (kızartma ve buharda pişirme / *Aphanopus carbo* için değerlendirilmiştir) Hg biyoerişilebilirliği önemli ölçüde (en az 3 kat) azalmıştır. İn-vivo olarak tasarlanmış bir başka çalışmada ton balığında pişirmenin metilciva, As ve Se üzerindeki etkisi incelenmiştir. Domuz deneklerine pişmiş ve çiğ ton balığı öğünleri verilerek portal ven ve karotis arterden öğün sonrası 0, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 ve 540. dakikalardaki kan örnekleri toplanmıştır. Balık kasını pişirmenin metilcivanın çözünürlüğünü ve bunun sonucunda da biyoerişilebilirliğini önemli ölçüde azalttığı daha önceki in vitro çalışmaların aksine domuzlar metilciva biyoerişilebilirliği bakımından balıklarda pişirmeden etkilenmemiştir. Fakat pişmiş öğünde metilciva emilim kinetiği daha hızlı gerçekleşmiştir (Charette vd., 2021). Dolayısıyla bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu söylenebilir. Cunha vd. (2022), Avrupa levreğini yeşil çayla marine etmenin tonalide (kişisel bakım ürünleri kaynaklı bir çevresel kirletici) ve benzofenon-3'ün biyoerişilebilirliğine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada polifenol açısından zengin olan yeşil çay (*Camellia sinensis*) ile marinyasyonun kavurma ve kızartma ile pişirilmiş Avrupa levreğinde Tonalide ve Benzofenon-3'ün (BP-3)

miktarını önemli ölçüde düşürmüştür. Diğer yandan yeşil çayla marinasyon her iki kirleticide de biyoerişilebilirliği artırmıştır. Ayrıca marine edilmemiş örneklerde kavurma, kızartmaya göre her iki kirleticinin biyoerişilebilirliğinin azalmasında daha etkili bulunmuştur. Bu şaşırtıcı sonuç yeşil çayın Avrupa levreğinde kirleticili biyoerişilebilirliğine etkisini tam olarak anlaşılamaz kılmuştur.

Son olarak kültürel beslenme tarzları bazı grupların genel popülasyona göre çevresel kirleticilerden çok daha fazla etkilenmesine yol açabilmektedir. Bu konu ile yapılan bir çalışmada Li vd. (2022), Çin'de yaygın olarak tüketilen solucan türlerinde (geleneksel pazarlardan 30 örnekleme yapılmıştır) As seviyelerini ve As'nin in vitro biyoerişilebilirlik durumunu incelemişlerdir. Çalışmada As, tüm solucanlarda 0.4 ila 53.6 mg/kg arasında değişen konsantrasyonlarda bulunmuştur. Öte yandan biyoerişilebilirliği oldukça değişken olup %12.1-69.1 aralığında değişmiştir. Örneklerin çoğunda biyoerişilebilirlik göz önüne alındığında tahmini günlük alım, tehlike katsayısı ve karsinojen risk güvenlik sınırlarını aşmıştır. Çalışmada yazarlar solucan tüketiminin yaygın olduğu bölge ve kültürler için As tehlikesinin göz önünde bulundurulması gerektiğini bildirmiştir. Buna benzer tüketim alışkanlıklarının gıda güvenliği ve insan sağlığına etkilerinin araştırılması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

SONUÇ

Küreselleşme, dünya nüfusunun artması ve tüm alanlarda endüstriyelleşmenin bir sonucu olarak tüm dünyada çevresel kirleticiler hızla biyosfere yayılmakta, gıda güvenliği, çevre ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Öte yandan moleküllerin insan sindirim sisteminden ne oranda vücuda alındığını inceleyen bir alan olan 'biyoerişilebilirlik' son yıllarda yeni bir odak noktası haline gelmiştir. Bu derlemede çevresel kirlilik maruziyeti konusuna daha rasyonel bir bakış sunan çevresel kirleticilerin oral yoldan in vitro biyoerişilebilirliğine dair güncel çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir.

Mevcut literatürün sonuçlarına göre; çevresel kirliliğin insan vücuduna ulaşırken temel yayılım noktaları toprak ve su kaynaklarıdır. Atmosfer kaynaklı çevresel kirlilik oral yoldan biyoerişilebilirlik üzerinde oldukça minimal etkilere sahiptir. Fakat pek çok çalışma atmosfer kaynaklı kirleticili barındıran tozları kazara yutma sonucu oluşabilecek maruziyet açısından değerlendirmiştir. Özellikle çevre sağlığı düşük olan düşük

gelirli mahalleler, asfalt yol kenarı yerleşimleri, kirli su yakınları diğer gruplara göre çevresel kirliliğe maruz kalma açısından daha büyük risk altındadır. Çevresel kirleticilerin temel yayılım noktalarının asfalt yol tozları ve araç emisyonları, aktif veya terkedilmiş maden ocakları, alarım tesisleri başta olmak üzere neredeyse tüm sanayi bölgeleri, oto lastiklerin geri dönüştürülmesi ile veya sentetik kauçuktan üretilen yapay çimli spor sahaları, atık kirli su yakınları, terkedilmemiş veya aktif atık bölgeleri olduğu söylenebilir. Öte yandan iklimsel faktörlerden özellikle rüzgâr aracılığıyla çoğu çevresel kirleticili unsur küresel bir tehdit haline gelmektedir.

Yapılan çalışmalar toprak kaynaklı kirleticilerin (PAH, PCB, OPRR, ağır metaller) genel olarak %1-97 oranında biyoerişilebilir olduğunu bildirmektedir. Bu oran daha düşük kararlılıkta ve daha az kristal formda bulunan kirleticiler için artarken daha kararlı ve daha kristalize olanlar için azalmaktadır. Bu kirleticilerin çevreye yayılımı da daha stabil ve partikül büyüklüğü fazla örneklerle kıyasla daha az stabil ve küçük boyutlarda bulunabilen kirleticilerde daha fazladır. Toprakta plumbojarosit oluşturma, potasyum-jarosit, FeSO₄ ve biyokömür uygulama gibi çeşitli toprak ıslah veya müdahale çalışmalarının kirleticilerin biyoerişilebilirliği üzerinde etkili olduğu bildirilmektedir. Çalışmalar toprak kirliliğinin, kirli toprakta yetişen gıdalar yolu ile doğrudan insan vücuduna ulaşabildiğini göstermektedir. Bu konuda Fe'nin özellikle ağır metal toksisitesini azaltmada iyi bir mineral olduğu, toprağa FeSO₄ müdahalesinin As gibi bazı ağır metallerin biyoerişilebilirliğini azalttığı bildirilmiştir. Öte yandan pratik bir uygulama olarak pirinç yapraklarına selenyum nanopartikül püskürtmenin Cd biyoerişilebilirliğini azalttığı saptanmıştır. Ayrıca toprakta yetişen gıdaların iyi bir şekilde yıkanmasının kirlilikten korunmada etkili olduğu vurgulanmıştır.

Kirleticilerin biyoerişilebilirliği doğadaki salınım katsayısı, partikül boyutu, kirleticiliye ait kimyasal karakterizasyon, ortam pH'ı, enzimlerin varlığı ve aktifliği, gıda matrisi, gıdanın pişirilmesi ve mutfak müdahaleleri, sıcaklık gibi pek çok konudan etkilenebilen kompleks bir süreçtir. Örneğin bazı ağır metallerin biyoerişilebilirliğinin gastrik sindirim sırasında düşük pH'dan etkilenecek artabildiği, ince bağırsakta artan pH ile tekrar kristalize olabildiği ve biyoerişilebilirliklerinin azalabildiği bildirilmiştir.

Bir başka kirleticiler olan mikropplastikler kendi çevresel zararlarının yanı sıra pürüzlü yüzey ve yüksek özgül yüzey alanları sebebiyle özellikle kirli ve atık su noktalarında başta ağır

metaller olmak üzere çok çeşitli kimyasalların insan vücuduna taşınmasında ön ayak olabilmektedirler. Mevcut bilgiler PVC partiküllerinin Pb maruziyetinde önemli bir rol oynadığını kanıtlamıştır.

Diyetle alınan gıda matrisi kirleticilerin karakterizasyonuna göre farklı etkiler göstermiştir. Bu konuda en önemli bileşenin diyet yağları olduğu özellikle TAG'ların PAH gibi kirleticilerin çözünmesi ve salınımı için uygun ortamın oluşmasında etkili olduğu bildirilmiştir. Öte yandan safra tuzları yağlar üzerindeki etkinliği ve misel çözünürlüğünü artırdığı için kirleticilerin biyoerişilebilirliğini genel olarak artırabilmektedir. Diğer yandan sınırlı sayıdaki çalışma verilerine göre diyet lifleri gıda kaynaklı toksinlerin biyoerişilebilirliğini çeşitli oranlarda azaltabilmiştir. Bu etkinin mekanizması tam olarak açıklanamasa bile özellikle çözünemeyen diyet lifinin pek çok besin ögesinin emiliminde görüldüğü gibi çevresel kirleticiler açısından önemli bir bariyer olabileceği öngörülebilir. Çoğu çalışmaya göre gıdanın pişirilmesine dair yöntemlerin çoğu çiğ gıdalara göre çevresel kirleticilerin biyoerişilebilirliğinde azalma sağlayabilmektedir. Öte yandan pişirme yöntemlerinden kızartma çoğunlukla biyoerişilebilirliği artırabilirken, buharda pişirme veya kaynatma kısmen azaltabilmiştir. Bu durum kızartmanın öğüne sağladığı fazladan yağın kirleticiler açısından biyoerişilebilirliği artırıcı etkisi ile veya suda kaynatma veya buharda haşlamanın bazı kirleticilerin suya geçmesi ve dolayısıyla ögünden çıkması ile açıklanabilir gibi görünmektedir. Yine de tüm kirleticiler için genel bir çıkarım yapmak oldukça zordur. Diğer yandan et gibi PAH açısından riskli gıdaların pişirilme derecesi ve süresi arttıkça PAH oran ve biyoerişilebilirliğinin arttığı bildirilmiştir. Diyetle alınan gıda matrisi ve pişirme ve tüm diğer mutfak uygulamalarının biyoerişilebilirlik üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılabilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Açlık ve tokluk durumlarında çevresel kirleticilerin biyoerişilebilirliği incelendiğinde BpA ve fitalat özelinde yapılmış bir çalışmanın sonucunda göre tokluk durumunda açlığa göre biyoerişilebilirlik anlamlı şekilde fazla bulunmuştur. Bu durum tokluk durumunda gastrointestinal sisteme dahil olan çok daha fazla yüzey aktif maddenin varlığı ile açıklanmıştır. Ayrıca, pepsin ve α -amilaz gibi enzim oranlarının düşmesi nedeniyle yaşlı popülasyonda çevresel kirleticilerin biyoerişilebilirliği azalırken bebek ve çocuklarda arttığı bildirilmiştir.

Tüm bu çalışmalar ışığında, çevresel kirleticilerin biyoerişilebilirliğin pek çok iç ve dış faktörden etkilenebilirliği ve

daha geniş bir perspektiften bakılabilmesi için farklı türlerdeki çevresel kirleticiler için farklı alanlarda yapılacak daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu söylenebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, çalışmayla doğrudan veya dolaylı olarak ilgili herhangi bir maddi veya maddi olmayan çıkar çatışmasının olmadığını beyan ederler.

YAZAR KATKISI

Tüm yazarlar çalışmanın kavramsallaştırılmasına ve tasarlanmasına katkıda bulunmuştur. Materyal hazırlama, veri toplama ve analiz çalışmaları Şeyda KAYA tarafından gerçekleştirilmiştir. Makalenin ilk taslağı Ensar Kaya tarafından yazılmış ve tüm yazarlar makalenin üretim süreci boyunca söz sahibi olmuştur. Tüm yazarlar makalenin son halini okuyup onaylamıştır.

TEŞEKKÜR

Çalışmamıza sunduğu teknik desteklerinden ve gösterdiği yoğun ilgilerinden ötürü Sayın Asım Kaya'ya teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Alankarage, D., Betts, A., Scheckel, KG., Herde, C., Cavallaro, M., Juhasz, AL. (2024). Remediation options to reduce bioaccessible and bioavailable lead and arsenic at a smelter impacted site-consideration of treatment efficacy. *Environmental Pollution*, 15;341:122881, doi: 10.1016/j.envpol.2023.122881.
- Armada, D., Martinez-Fernandez, A., Celeiro, M., Dagnac, T., Llompart, M. (2023). Assessment of the bioaccessibility of PAHs and other hazardous compounds present in recycled tire rubber employed in synthetic football fields. *Science of The Total Environment*, 20;857(Pt 2):159485, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159485.
- Baranowska-Wójcik, E., Szwajgier, D., Joško, I., Pawlikowska-Pawłęga, B., Gustaw, K. (2022). Smoothies reduce the "bioaccessibility" of TiO₂ (E 171) in the model of the in vitro gastrointestinal tract. *Nutrients*, 25;14(17):3503, doi: 10.3390/nu14173503.
- Charette, T., Bueno Dalto, D., Rosabal, M., Matte, JJ., Amyot, M. (2021). Assessment of in vitro bioaccessibility and in vivo oral bioavailability as complementary tools to better understand the effect of cooking on methylmercury, arsenic, and selenium in tuna. *Toxics*, 3;9(2):27, doi: 10.3390/toxics9020027.

- Chen, XJ., Ma, JJ., Yu, RL., Hu, GR., Yan Y. (2022). Bioaccessibility of microplastic-associated heavy metals using an in vitro digestion model and its implications for human health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(51):76983-76991, doi: 10.1007/s11356-022-20983-8.
- Cianciosi, D., Forbes-Hernández, TY., Afrin, S., Gasparrini, M., Quiles, JL., Gil, E., & Giampieri, F. (2020). The influence of in vitro gastrointestinal digestion on the anticancer activity of manuka honey. *Antioxidants (Basel)*, 10;9(1):64, doi:10.3390/antiox9010064.
- Cioca, AA., Langerholc, T., Tušar, L. (2022). Implementation of food matrix effects into chemical food contaminant risk assessment. *EFSA Journal*, 14;20(Suppl 2):e200905, doi: 10.2903/j.efsa.2022.e200905.
- Corona Sánchez, JE., González Chávez, MDCA., Carrillo González, R., Scheckel, K., Tapia Maruri, D., García Cue, JL. (2021). Metal(loid) bioaccessibility of atmospheric particulate matter from mine tailings at Zimapán, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(15):19458-19472, doi: 10.1007/s11356-020-11887-6.
- Costa, F., Mieiro, CL., Pereira, ME., Coelho, JP. (2022). Mercury bioaccessibility in fish and seafood: Effect of method, cooking and trophic level on consumption risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 179:113736, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113736.
- Cunha, SC., Gadelha, JR., Mello, F., Marmelo, I., Marques, A., Fernandes, JO. (2022). Effects of green tea marinade in the bioaccessibility of tonalide and benzophenone 3 in cooked european seabass. *Molecules*, 29;27(15):4873, doi: 10.3390/molecules27154873.
- Dodd, M., Amponsah, LO., Grundy, S., Darko, G. (2023). Human health risk associated with metal exposure at Agbogbloshie e-waste site and the surrounding neighbourhood in Accra, Ghana. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(7):4515-4531, doi: 10.1007/s10653-023-01503-0.
- Drahota, P., Ettler, V., Košek, F. (2025). Arsenic bioaccessibility in environmentally important arsenic minerals. *Journal of Hazardous Materials*, 5;485:136838, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.136838.
- Ettler, V., Hladíková, K., Mihaljevič, M., Drahota, P., Culka, A., Jedlicka, R., & Bagai, Z. (2022). Contaminant Binding and Bioaccessibility in the Dust From the Ni-Cu Mining/Smelting District of Selebi-Phikwe (Botswana). *GeoHealth*, 1;6(11):e2022GH000683, doi: 10.1029/2022GH000683.
- Fang, Y., Cui, Y., Mou, X., Lu, L., Shentu, J., Zhu, M. (2022). In vitro bioaccessibility and health risk assessment of arsenic and zinc contaminated soil stabilized by ferrous sulfate: effect of different dietary components. *Toxics*, 26;11(1):23, doi: 10.3390/toxics11010023.
- Gaberšek, M., Gosar, M. (2024). Oral bioaccessibility of potentially toxic elements in various urban environmental media. *Environmental Geochemistry and Health*, 20;46(7):259, doi: 10.1007/s10653-0202073-5.
- Hamidi, EN., Hajeb, P., Selamat, J., Lee, SY., Abdull Razis, AF. (2022). Bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled meat: the effects of meat doneness and fat content. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10;19(2):736. doi: 10.3390/ijerph19020736.
- Harris, KL., Banks, LD., Mantey, JA., Huderson, AC., Ramesh, A. (2013). Bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons: relevance to toxicity and carcinogenesis. *Expert Opinion on Drug Metabolism & Toxicology*, 9(11):1465-80, doi: 10.1517/17425255.2013.823157.
- Hu, X., Yu, Q., Gatheru Waigi, M., Ling, W., Qin, C., Wang, J., Gao, Y. (2022). Microplastics sorbed phenanthrene and its derivatives are highly bioaccessible and may induce human cancer risks. *Environment International*, 168:107459, doi: 10.1016/j.envint.2022.107459.
- Hussain, B., Yin, X., Lin, Q., Hamid, Y., Usman, M., Hashmi, ML., Lu, M., Imran Taqi, M., He, Z., Yang, XE. (2024). Mitigating cadmium exposure risk in rice with foliar nano-selenium: Investigations through Caco-2 human cell line in-vivo bioavailability assay. *Environmental Pollution*, 1;356:124356, doi: 10.1016/j.envpol.2024.124356.
- Hutcheon, DE., Kantrowitz, J., Van Gelder, RN., Flynn, E. (1983). Factors affecting plasma benzo[a]pyrene levels in environmental studies. *Environmental Research*, 32(1):104-10, doi: 10.1016/00139351(83)90196-2.
- Izquierdo-Díaz, M., Hansen, V., Barrio-Parra, F., De Miguel, E., You, Y., Magid, J. (2023). Assessment of lettuces grown in urban areas for human consumption and as bioindicators of atmospheric pollution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 256:114883, doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.114883.
- Jesús Eulises, CS., González-Chávez, MDCA., Carrillo-González, R., García-Cué, JL., Fernández Reynoso, DS., Noerpel, M., Scheckel, KG. 2021. Bioaccessibility of potentially toxic elements in mine residue particles. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 4;23(2):367-380, doi: 10.1039/d0em00447b.
- Jiao, Y., Liu, C., Feng, C., Regenstein, JM., Luo, Y., Tan, Y., Hong, H. (2021). Bioaccessibility and intestinal transport of deltamethrin in pacific oyster (*Magallana Gigas*) using simulated digestion/NCM460 cell models. *Frontiers in Nutrition*, 17;8:726620, doi: 10.3389/fnut.2021.726620.
- Kastury, F., Tang, W., Herde, C., Noerpel, MR., Scheckel, KG., Juhasz, AL. (2021). Plumbojarosite formation in contaminated soil to mitigate childhood exposure to lead, arsenic and antimony. *Journal of Hazardous Materials*, 15;418:126312, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126312.
- Kawamura, Y., Kamata, E., Ogawa, Y., Kaneko, T., Uchiyama, S., & Saito, Y. (1988). The effect of various foods on the intestinal absorption of benzo(a)pyrene in rats. *Food Hygiene and Safety Science*, 29 (1), 21-25.

- Lestido-Cardama, A., Sánchez, BM., Sendón, R., Rodríguez-Bernaldo de Quirós, A., Barbosa Pereira, L. (2022). Study on the chemical behaviour of bisphenol s during the in vitro gastrointestinal digestion and its bioaccessibility. *Food Chemistry*, 15;367:130758, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130758.
- Lestido-Cardama, A., Vázquez-Loureiro, P., Sendón, R., Bustos, J., Paseiro-Losada, P., de Quirós, ARB., Barbosa-Pereira, L. (2024). In vitro bioaccessibility of cyclodi-BADGE present in canned seafood: A new approach for the estimation of dietary exposure of the Spanish population. *Food Chemistry*, 30;459:140274, doi: 10.1016/j.foodchem.2024.140274.
- Li, Y., Li, H., Zan, K., Wang, Y., Zuo, T., Jin, H., & Ma, S. (2022). Medicinal earthworm: Speciation and bioaccessibility of arsenic and its potential health risks. *Frontiers in Pharmacology*, 31;13:795530, doi: 10.3389/fphar.2022.795530.
- Li, Y., Padoan, E., Ajmone-Marsan, F. (2021). Soil particle size fraction and potentially toxic elements bioaccessibility: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209:111806, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111806.
- Liu, G., Chen, T., Cui, J., Zhao, Y., Li, Z., Liang, W., & Xiao, T. (2023). Trace metal(loid) migration from road dust to local vegetables and tree tissues and the bioaccessibility based health risk: impacts of vehicle operation-associated emissions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 31;20(3):2520, doi: 10.3390/ijerph20032520.
- López-Ruiz, R., Marin-Saez, J., Cunha, SC., Fernandes, A., de Freitas, V., Viegas, O., Ferreira, IMPLVO. (2023). Investigating the impact of dietary fibers on mycotoxin bioaccessibility during in vitro biscuit digestion and metabolites identification. *Foods*, 23;12(17):3175, doi: 10.3390/foods12173175.
- López-Vázquez, J., Rodil, R., Trujillo-Rodríguez, MJ., Quintana, JB., Cela, R., Miró, M. (2022). Mimicking human ingestion of microplastics: Oral bioaccessibility tests of bisphenol A and phthalate esters under fed and fasted states. *Science of The Total Environment*, 20;826:154027, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154027.
- Lu, M., Li, G., Yang, Y., Yu, Y. (2021). A review on in-vitro oral bioaccessibility of organic pollutants and its application in human exposure assessment. *Science of The Total Environment*, 15;752:142001, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142001.
- Ma, C., Zhang, Q., Lv, DZ., Song, J., Fan, Q., Tian, H., Wang, MY. (2024). Study of factors influencing the oral bioaccessibility of commonly used and detected pesticides in bananas and mangoes based on in vitro methods. *Foods*, 26;13(13):2019, doi: 10.3390/foods13132019.
- Ma, JJ., Yan, Y., Chen, XJ., Niu, ZR., Yu, RL., Hu, GR. (2021). Incorporating bioaccessibility and source apportionment into human health risk assessment of heavy metals in urban dust of Xiamen, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 13;228:112985, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112985.
- Masset, T., Ferrari, BJD., Dufefoi, W., Schirmer, K., Bergmann, A., Vermeirssen, E., & Breider, F. (2022). Bioaccessibility of organic compounds associated with tire particles using a fish in vitro digestive model: solubilization kinetics and effects of food coingestion. *Environmental Science & Technology*, 15;56(22):15607-15616, doi: 10.1021/acs.est.2c04291.
- Mayer, MM., Basta, NT., Scheckel, KG. (2022) Using phosphate amendments to reduce bioaccessible Pb in contaminated soils: A meta-analysis. *Frontiers in Soil Science*, 7;2:1-14, doi: 10.3389/fsoil.2022.1028328.
- Mehta, N., Cipullo, S., Cocerva, T., Coulon, F., Dino, GA., Ajmone-Marsan, F., & De Luca, DA. (2020). Incorporating oral bioaccessibility into human health risk assessment due to potentially toxic elements in extractive waste and contaminated soils from an abandoned mine site. *Chemosphere*, 255:126927, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126927.
- Muleya, M., Young, SD., Broadley, MR., Joy, EJM., Chopera, P., Bailey, EH. (2023). Bioaccessibility of iron in pearl millet flour contaminated with different soil types. *Food Chemistry*, 15;402:134277, doi: 10.1016/j.foodchem.2022.134277.
- Ou, SP., Liao, XL., Huang, ZT., Hu, YC., Cai, Z., Chen, ZF. (2025). Bioaccessibility and health risk assessment of hydrophobic organic pollutants in soils from four typical industrial contaminated sites in China. *Journal of Environmental Sciences, (China)* 147:282-293, doi: 10.1016/j.jes.2023.12.003.
- Rimondi, V., Costagliola, P., Lattanzi, P., Catelani, T., Fornasaro, S., Medas, D., & Paolieri, M. (2022). Bioaccessible arsenic in soil of thermal areas of Viterbo, Central Italy: implications for human health risk. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(2):465-485, doi: 10.1007/s10653-021-00914-1.
- Ruiz-Azcona, L., Markiv, B., Expósito, A., Pozueta, A., García-Martínez, M., Fernández-Olmo, I., Santibáñez, M. (2022). Poorer cognitive function and environmental airborne Mn exposure determined by biomonitoring and personal environmental monitors in a healthy adult population. *Science of The Total Environment*, 1;815:152940, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.152940.
- Seraglio, SKT., Schulz, M., Gonzaga, LV., Fett, R., Costa, ACO. (2021). Current status of the gastrointestinal digestion effects on honey: A comprehensive review. *Food Chemistry*, 19;357:129807, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129807.
- Shentu, J., Fang, Y., Wang, Y., Cui, Y., Zhu, M. (2023). Bioaccessibility and reliable human health risk assessment of heavy metals in typical abandoned industrial sites of southeastern China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 256:114870, doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.114870.

- Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Cave, M., Sorooshian, A., Mahmoudi, MR., & Golshani, R. (2021). In vitro bioaccessibility, phase partitioning, and health risk of potentially toxic elements in dust of an iron mining and industrial complex. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1;212:111972, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.111972.
- Sowers, TD., Blackmon, MD., Betts, AR., Jerden, ML., Scheckel, KG., Bradham, KD. 2023. Potassium jarosite seeding of soils decreases lead and arsenic bioaccessibility: A path toward concomitant remediation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 12;120(50):e2311564120, doi: 10.1073/pnas.2311564120.
- Starr, JM., Li, W., Graham, SE., Shen, H., Waldron, F. (2019). Is food type important for in vitro post ingestion bioaccessibility models of polychlorinated biphenyls sorbed to soil? *Science of The Total Environment*, 20;704:135421, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135421.
- Tang, F., Li, Z., Zhao, Y., Sun, J., Sun, J., Liu, Z., & Cui, J. (2022). Geochemical Contamination, Speciation, and Bioaccessibility of Trace Metals in Road Dust of a Megacity (Guangzhou) in Southern China: Implications for Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 29;19(23):15942, doi: 10.3390/ijerph192315942.
- Vega-Herrera, A., Savva, K., Lacoma, P., Santos, LHMLM., Hernández, A., Marmelo, I., & Farré, M. (2024). Bioaccumulation and dietary bioaccessibility of microplastics composition and cocontaminants in Mediterranean mussels. *Chemosphere*, 363:142934, doi:10.1016/j.chemosphere.2024.142934.
- Wang, HS., Man, YB., Wu, FY., Zhao, YG., Wong, CK., Wong, MH. (2010). Oral bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) through fish consumption, based on an in vitro digestion model. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 10;58(21):11517-24. doi: 10.1021/jf102242m.
- Wu, X., Zhao, X., Wang, X., Chen, R., Liu, P., Liang, W., Wang, J., Shi, D., Gao, S. (2023). Bioaccessibility of polypropylene microfiber-associated tetracycline and ciprofloxacin in simulated human gastrointestinal fluids. *Environment International*, 179:108193, doi: 10.1016/j.envint.2023.108193.
- Xing, W., Yang, H., Ippolito, JA., Zhang, Y., Scheckel, KG., Li, L. (2020). Lead source and bioaccessibility in windowsill dusts within a Pb smelting-affected area. *Environmental Pollution*, 266(Pt2):115110, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115110.
- Yu, YX., Chen, L., Yang, D., Pang, YP., Zhang, SH., Zhang, XY., Yu, ZQ., Wu, MH., Fu, JM.(2012). Polycyclic aromatic hydrocarbons in animal-based foods from Shanghai: bioaccessibility and dietary exposure. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 29(9):1465-74, doi: 10.1080/19440049.2012.694121.
- Zhou, Q., Chen, H., Li, L., Wu, Y., Yang, X., Jiang, A., Wu, W. (2024). The Bioaccessibility and Bioavailability of Pentachlorophenol in Five Animal-Derived Foods Measured by Simulated Gastrointestinal Digestion. *Foods*, 19;13(8):1254, doi: 10.3390/foods13081254.

Nasıl Atıf Yapılır?:

Kaya Ş., Kaya E. (2026) Gıda güvenliği ile çevre ve insan sağlığı açısından çevresel kirleticilerin oral yoldan in vitro biyoerişilebilirliği çalışmalarının detaylı bir incelemesi. *GIDA* (2026) 51 (3) 615-632 doi: 10.15237/gida.GD25107

Cite this article as:

Kaya Ş., Kaya E. (2026) *A detailed review of oral in vitro bioaccessibility studies of environmental contaminants for food safety and environmental and human health.* *GIDA* (2026) 51 (3) 615-632 doi: 10.15237/gida.GD25107