TARIM VE HAYVANCILIKTA DEĞİŞEN DİNAMİKLER: İKLİM, TEKNOLOJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK











EDİTÖRLER

Prof. Dr. Yusuf UZUN

Doç. Dr. Şeyda ÇAVUŞOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Bulut SARĞIN

İKSAD Publishing House

www.iksadyayinevi.com

BÖLÜM 11

YENİ ORTAYA ÇIKAN KİRLETİCİLERİN HAYVAN BESLEMEDE ÖNEMİ: KAYNAKAR, ETKİLER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRYÖNETİM PERSPEKTİFLERİ

Cemal BUDAĞ[1]

DOI: https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18132318

[1] [1] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü Yemler ve Hayvan Besleme Ana Bilim Dalı, Van, Türkiye. cbudag@yyu.edu.tr Orcid ID: 0000-0003-3532-7727

GİRİŞ

Küresel ölçekte artan nüfus, sanayileşme, ilaç ve kimyasal üretimindeki çeşitlilik, çevreye yeni türde kirleticilerin girmesine yol açmıştır. Bu bağlamda "ortaya çıkan kirleticiler" (emerging contaminants – ECs) terimi, geleneksel izleme ve mevzuat sistemlerinin kapsamı dışında kalan, fakat çevresel ve biyolojik etkileri giderek önem kazanan bileşikleri tanımlamak için kullanılmaktadır (Li ve ark., 2024). EC'ler arasında ilaç kalıntıları, veteriner tıbbi ürünleri, endokrin bozucu kimyasallar, nanomalzemeler, mikro/nanoplastikler, alev geciktiriciler, pestisit türevleri ve yeni mykotoksinler gibi çok çeşitli gruplar yer almaktadır.

Bu bileşiklerin ortak özelliği, genellikle düşük derişimlerde bulunmalarına rağmen uzun süre çevrede kalabilmeleri, biyobirikim gösterebilmeleri ve karmaşık toksik etkiler yaratabilmeleridir. Geleneksel su ve yem kalite izleme sistemleri çoğu kez bu maddeleri tespit etmek için yeterli duyarlılığa sahip değildir. Son yıllarda analitik kimya alanında kaydedilen ilerlemeler (örneğin LC–MS/MS, yüksek çözünürlüklü MS, sensör teknolojileri) sayesinde çevresel örneklerde ng/L düzeyinde bile EC'lerin varlığı doğrulanabilmiştir (Patel ve ark., 2019).

EC'lerin önemi yalnızca çevre toksikolojisi ile sınırlı değildir; tarımsal üretim, gıda güvenliği ve halk sağlığı üzerinde de çok katmanlı etkiler yaratmaktadır. Hayvan besleme sistemleri, bu kirleticilerin çevreden biyosfere geçişinde kilit bir "ara basamak" niteliğindedir. Tarım arazilerinin sulanması, organik gübrelerin ve biyokatıların yem bitkisi üretiminde kullanılması, kirleticilerin doğrudan hayvan diyetine karışmasına neden olmaktadır (Kolawole ve ark., 2024).

Modern hayvancılıkta kullanılan karma yemler çok farklı kaynaklardan gelen bileşenlerin karışımından oluşur; bu da kontaminasyon riskini artırır. Özellikle ithal soya küspesi, mısır gluteni, balık unu, melas gibi bileşenlerde antibiyotik, pestisit ya da endokrin bozucu kalıntılarına rastlanabilmektedir (Zhang ve ark., 2022). Ayrıca, içme ve sulama sularında görülen farmasötik kalıntılar, polimer türevleri ve deterjan bileşenleri de hayvanların su tüketimi yoluyla sistematik maruziyet yaratır (FAO, 2021).

Bu nedenle EC'lerin hayvan besleme perspektifinden incelenmesi, yalnızca yem kalitesiyle değil, aynı zamanda One Health çerçevesinde çevre–hayvan–insan etkileşimini anlamak açısından da kritik bir öneme sahiptir. Bir başka ifadeyle, EC'ler klasik anlamda "kimyasal riskler" olmanın ötesinde,

gıda güvenliği zincirinin bütün aşamalarını etkileyen çok boyutlu unsurlardır (Geissen ve ark., 2015).

Geleneksel kirleticiler (nitrat, ağır metaller, pestisitler gibi) büyük ölçüde düzenlenmiş ve izlenebilir hâle gelirken, EC'lerin çoğu henüz herhangi bir mevzuat sınırıyla tanımlanmamıştır. Avrupa Birliği'nin 2015 yılında yayımladığı "Watch List for Emerging Pollutants" belgesi, estron, 17β-estradiol, diklofenak ve makrolid antibiyotikler gibi bazı EC'leri izleme kapsamına almış, ancak hayvansal beslenme özelinde herhangi bir limit belirlememiştir (European Environment Agency [EEA], 2015).

Hayvan besleme açısından bakıldığında, EC'lerin önemi dört temel eksende toplanabilir:

1. Besin zincirine giriş yolları: Toprak, su, yem ve hava yoluyla kirletici transferi (Wang ve ark., 2024).
2. Hayvan sağlığı üzerindeki doğrudan etkiler: Sindirim, üreme, bağışıklık sisteminde bozulmalar (Santos ve ark., 2025).
3. Hayvansal ürünlerde kalıntı riski: Süt, et ve yumurta yoluyla insanlara geçiş (Salvatore ve Ferrer, 2025).
4. Ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik: Üretim verimliliği ve çevre kalitesi üzerindeki etkiler (Khalifa ve ark., 2024).

Bu çalışma, EC'lerin hayvan besleme sistemlerindeki varlığını ve etkilerini çok yönlü biçimde inceleyerek, mevcut bilimsel bulguları bir araya getirmeyi ve gelecek araştırmalar için bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

1. YENİ ORTAYA ÇIKAN KİRLETİCİLERİN KAYNAKLARI VE YAYILIM YOLLARI

EC'lerin çevreye girişi çoğunlukla noktasal olmayan kaynaklardan gerçekleşir. Endüstriyel atık sular, evsel atıklar, tarımsal drenaj, ilaç ve kozmetik üretimi, plastik kullanımı, veteriner uygulamaları gibi geniş bir alan EC'lerin potansiyel kaynağıdır. Bu bileşikler doğal bozunmaya dirençli olduklarından, çevrede uzun süre kalabilir ve çeşitli yollarla yem zincirine karışabilir (Li ve ark., 2024).

1.1. Tarımsal ve Endüstriyel Kaynaklar

Modern tarımda kullanılan pestisitler, gübre katkıları, veteriner ilaçları ve endüstriyel kimyasallar EC'lerin başlıca tarımsal kaynaklarını oluşturur. Özellikle antibiyotikler ve büyüme düzenleyicileri, hayvan beslemede uzun yıllar boyunca verim artırıcı olarak kullanılmıştır. Bu maddeler metabolize

edilmeden dışkı yoluyla çevreye atıldığında, toprağa ve suya karışarak yeniden yem bitkilerine dönerler (Abdallah ve ark., 2022).

Endüstriyel süreçlerde kullanılan alev geciktiriciler, nonilfenoller ve ftalatlar gibi bileşikler de yem hammaddelerinin üretim zincirine istemsiz biçimde dâhil olabilir. Örneğin, gıda ambalajlarından veya depolama tanklarından sızan ftalatların yemlerde bulunduğu gösterilmiştir (Patel ve ark., 2020).

1.2. Atık Su ve Sulama Sistemleri

EC'lerin çevresel döngüde en yaygın taşınma yolu atık sulardır. Kentsel ve endüstriyel atık suların büyük kısmı konvansiyonel arıtma tesislerinde yalnızca kısmen uzaklaştırılır. Özellikle ilaç kalıntıları ve hormon benzeri bileşikler, arıtma proseslerinden sonra dahi sucul sistemlerde varlığını sürdürebilir. Bu suların sulama amacıyla kullanılması, kirleticilerin yem bitkilerine geçişini hızlandırır (García-Rodríguez ve ark., 2014).

Sulama suyundaki EC'ler yaprak ve kök dokularına taşınabilir, oradan hayvanların tükettiği yemlere geçebilir. Araştırmalar, sulama suyunda ng/L düzeyinde tespit edilen diklofenak, karbamazepin ve 17β-estradiol'ün bitki dokularında µg/kg seviyelerine kadar biriktiğini göstermiştir. Bu birikim, özellikle yonca ve mısır silajı gibi su tüketimi yüksek yemlerde daha belirgindir (Li ve ark., 2024).

1.3. Biyokatılar, Gübreler ve Toprak Kontaminasyonu

Atık su arıtma tesislerinden elde edilen biyokatılar (çamur ve kompostlar), tarımda organik gübre olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu materyaller, EC'lerin önemli birikim alanıdır. Çalışmalar, arıtma çamurlarında antibiyotik kalıntılarının mg/kg düzeyinde olabildiğini ve toprağa uygulandığında uzun süre aktif kaldığını göstermektedir (Kolawole ve ark., 2024).

Ayrıca hayvan dışkıları da EC'lerin döngüsünde kritik rol oynar. Tedavi amaçlı kullanılan antibiyotikler ve antiparaziterler, dışkı ve idrar yoluyla ortama atıldığında, toprak mikrobiyotası üzerinde baskılayıcı etki yaratır. Bu durum, rumen ve toprak mikrobiyotasında benzer direnç genlerinin yayılımını kolaylaştırarak "rezistom"un tarım sistemine taşınmasına yol açar (Abdallah ve ark., 2022).

1.4. Yem Hammaddesi ve Su Yoluyla Maruziyet

EC'lerin hayvanlara ulaşmasında iki ana taşıyıcı ortam vardır: yem ve su. Yem hammaddeleri, özellikle ithal soya küspesi, mısır gluteni, pamuk tohumu küspesi gibi bileşenler; üretim bölgelerinde kullanılan pestisitler ve endüstriyel atıklar nedeniyle EC kalıntıları içerebilir. Küresel bir tarama çalışmasında, analiz edilen yemlerin %42'sinde emerging mykotoksinlere (enniatinler, beauvericin, moniliformin) rastlandığını bildirmiştir (Kolawole et al. 2024).

Su kaynakları ise EC'lerin taşınımında ayrı bir risk alanıdır. FAO (2021) verilerine göre, hayvansal üretim için kullanılan suların önemli bir bölümü geri dönüştürülmüş veya yüzeysel sulardan temin edilmektedir. Bu sular, hem pestisit hem de farmasötik kalıntılar içerebilir. İçme suyunda saptanan nonilfenol, triklosan ve bisfenol-A gibi bileşiklerin ruminantlarda hormonal yanıtları etkilediği, süt verimini ve doğurganlık parametrelerini düşürebildiği belirtilmiştir (Patel ve ark., 2020).

1.5. Yem İşleme ve Depolama Kaynaklı Kontaminasyon

Yemlerin üretim, taşıma ve depolama aşamalarında kullanılan plastik ambalajlar, katkı malzemeleri ve yağlayıcılar EC'lerin başka bir kaynağıdır. Özellikle polivinil klorür (PVC) ve polietilen tereftalat (PET) kaplardan sızan ftalat ve bisfenol A kalıntıları, yemlerde µg/kg düzeyinde ölçülmüştür. Bunun yanında yüksek sıcaklıkta preslenen pelet yemlerde organik kirleticilerin ısıl bozunma ürünleri de oluşabilir (Li ve ark., 2024).

Depolama ortamındaki nem ve mikrobiyal aktivite, özellikle yeni mykotoksinlerin oluşumunu tetikler. Bu toksinler henüz mevzuatla sınırlandırılmadığı için "gizli risk" olarak kabul edilmektedir (Kolawole ve ark., 2024).

1.6. Hava Yolu ve Atmosferik Taşınım

Son yıllarda EC'lerin havada taşınabildiği de gösterilmiştir. Aerosol parçacıklar ve tozlar, özellikle kurak bölgelerde pestisit ve ilaç kalıntılarının yem alanlarına ulaşmasına neden olabilir. Rüzgâr ve yağış taşınımı ile EC'ler uzak bölgelere ulaşabilir; böylece kirletici kontrolü yalnızca yerel düzeyde değil, bölgesel politikalarla da ele alınmalıdır (Boahen ve ark., 2025).

1.7. Karmaşık Maruziyet ve Etkileşimler

Gerçekte hayvanlar tek bir kirleticiye değil, birçok bileşiğin karışımına aynı anda maruz kalırlar. Bu durum, additif veya sinerjistik etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Örneğin, antibiyotik kalıntıları ile mikroplastiklerin birlikte bulunması, ilaç taşınımını kolaylaştırarak direnç gelişimini artırabilir. Aynı şekilde, EDC'lerin ve pestisitlerin birlikte varlığı hormonel etkileri şiddetlendirebilir (Patel ve ark., 2020).

Bu nedenle hayvan besleme sistemlerinde EC maruziyetini değerlendirirken, tekil kirleticilerden ziyade "toplam karışım etkisi" yaklaşımı benimsenmelidir (Gaudin, 2017). Bu yaklaşım, gelecekte risk modellemelerinde önem kazanacaktır.

2. KİRLETİCİ GRUPLARI VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Ortaya çıkan kirleticiler (ECs), kimyasal yapılarına, çevresel kalıcılıklarına ve biyolojik etki mekanizmalarına göre çok geniş bir yelpazede sınıflandırılır. Bu bileşikler, genellikle polar, düşük molekül ağırlıklı ve biyolojik olarak aktif maddelerdir. Ayrıca, büyük bir kısmı biyolojik bozunmaya dirençli ve çevre ortamında (su, toprak, biyota) uzun süre kalabilir. Hayvan besleme açısından kritik dört grup, literatürde en sık tartışılan sınıflardır: (i) antibiyotikler ve veteriner ilaçları, (ii) endokrin bozucu bileşikler, (iii) mikro/nano-plastikler ve nanomalzemeler, (iv) yeni mykotoksinler ve kalıcı organik kirleticiler.

2.1. Antibiyotikler ve Veteriner İlaçları

Antibiyotikler, hayvancılıkta hem tedavi hem de performans artırma amacıyla uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ancak bu uygulama, kalıntıların yem ve çevre ortamlarında birikmesine yol açarak antimikrobiyal direnç riskini güçlendirmektedir (Abdallah ve ark., 2022). Özellikle tetrasiklinler, sulfonamidler, makrolidler ve florokinolonlar gibi gruplar, arıtma sistemlerinden tam olarak uzaklaştırılamamakta ve çevrede ng/L–µg/L düzeylerinde tespit edilmektedir (Li ve ark., 2024).

Ruminantlarda antibiyotik maruziyeti, rumen mikrobiyotasının çeşitliliğini azaltarak lif sindirimi, uçucu yağ asidi (VFA) üretimi ve mikrobiyal protein sentezini olumsuz etkiler (Zhang ve ark., 2022). Monogastrik türlerde (özellikle domuz ve kanatlılarda) antibiyotik kalıntıları, bağırsak mukozasında inflamasyon ve mikrobiyal dengesizliklere neden olabilir. Uzun vadede antibiyotiklerin düşük dozda alınması, bakteriyel rezistomun (direnç gen

havuzu) besleme sistemi boyunca yayılmasına aracılık eder (García-Rodríguez ve ark., 2014).

Veteriner ilaç kalıntıları arasında antiparaziterler (ivermektin, albendazol gibi), non-steroidal antiinflamatuvarlar (diklofenak vd.) ve hormon türevleri de yer alır. Diklofenak gibi bileşiklerin karaciğer ve böbrek fonksiyonlarını baskıladığı, özellikle kanatlılarda akut toksisiteye neden olabileceği bilinmektedir (Patel ve ark., 2020).

2.2. Endokrin Bozucu Bileşikler (EDC)

Endokrin bozucu bileşikler, hormon sistemine müdahale ederek hayvanlarda üreme, gelişme, bağışıklık ve metabolik süreçleri etkileyen maddelerdir. Bu grup; bisfenoller, nonilfenoller, ftalatlar, pestisit türevleri, poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve bazı farmasötik hormon analoglarını içerir. EDC'ler, genellikle lipofilik özellikte olduklarından biyolojik dokularda birikir ve nesiller arası etkiler yaratabilir (Geissen ve ark., 2015).

Hayvan besleme açısından EDC'ler iki yönlü etki gösterir:

1. **Doğrudan etkiler:** Hormonal sistemde reseptör bağlanması veya gen ekspresyonunun değişmesiyle üreme fonksiyonlarını bozabilir. Örneğin, nonilfenol maruziyeti boğalarda sperm motilitesini düşürmekte, dişilerde östrus döngüsünü kısaltmaktadır (Li ve ark., 2024).

2. **Dolaylı etkiler:** EDC'ler oksidatif stres, bağışıklık baskılanması ve endokrin-metabolik dengesizlik yoluyla yemden yararlanma verimini azaltabilir (Boahen ve ark., 2025).

Bu bileşiklerin çevresel kalıcılığı oldukça yüksektir. Bisfenol-A'nın yarı ömrü toprakta 6 aydan fazla olabilir; ftalatlar ve nonilfenoller ise biyodegradasyona karşı dirençlidir. Hayvan vücudunda ise karaciğer ve yağ dokularında birikim eğilimi gösterirler (Boahen ve ark., 2025).

2.3. Mikro/Nano-Plastikler ve Nanomalzemeler

Son yıllarda mikro (1 µm–5 mm) ve nano (< 1 µm) plastiklerin çevresel ortamlarda ve gıda zincirinde yaygınlaştığı saptanmıştır. Mikroplastikler (MP'ler), yem bitkilerine, suya ve hayvansal ürünlere kadar ulaşabilmektedir. Yem karışımlarında polipropilen, polistiren, polietilen ve poliamid parçacıkları belirlenmiştir (Boahen ve ark., 2025).

Hayvanlar bu parçacıkları sindirim sırasında fiziksel ve kimyasal stres faktörü olarak algılar. Mikroplastikler bağırsak bariyerini bozabilir, mikrobiyota dengesini değiştirebilir ve kirleticileri adsorbe ederek **"taşıyıcı"** işlevi görebilir (Li ve ark., 2024). Antibiyotik veya ağır metal kalıntılarını yüzeylerinde biriktirdiklerinde, hayvanda sistemik toksisite riski artar.

Nanomalzemeler (örneğin gümüş, titanyum dioksit, çinko oksit nanoparçacıkları), tarımsal uygulamalarda ve yem katkı maddelerinde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bunların biyolojik etkileşim potansiyeli ve uzun dönem toksikolojisi henüz tam aydınlatılamamıştır. Ruminantlarda nanoparçacık maruziyetinin rumen mikrobiyal enzim aktivitelerini azalttığı, sindirilebilirliği olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Abdallah ve ark., 2022).

2.4. Yeni Mykotoksinler Ve Kalıcı Organik Kirleticiler

Klasik mikotoksinler (aflatoksin, okratoksin, zearalenon, fumonisin) uzun süredir bilinse de, son yıllarda **"**emerging mycotoxins**"** adı altında tanımlanan enniatinler, beauvericin, moniliformin, fusaproliferin gibi toksinler ortaya çıkmıştır. Bu bileşikler, genellikle *Fusarium spp.* kaynaklıdır ve yemlerde yaygın biçimde tespit edilmektedir (Kolawole ve ark., 2024).

Yeni mikotoksinlerin toksik etkileri klasiklerden farklıdır: iyon kanallarında değişim, hücre membran geçirgenliği, mitokondriyal disfonksiyon gibi mekanizmalarla oksidatif stresi tetiklerler. Bu da bağışıklık sisteminde baskılanma ve yem tüketiminde azalma olarak yansır (Kim ve ark., 2023).

Kalıcı organik kirleticiler (POPs) ise kimyasal kararlılıkları nedeniyle çevrede uzun süre kalırlar. Poliklorlu bifeniller (PCB), polibromlu difenil eterler (PBDE) ve perfloroalkil maddeler (PFAS) gibi bileşikler, hem endüstriyel hem tarımsal kaynaklıdır. PFAS grubundaki perflorooktanoik asit (PFOA) ve perflorooktansülfonik asit (PFOS), süt ve yumurtalarda tespit edilmiştir (Li ve ark., 2024).

3. HAYVAN BESLEME SİSTEMİNDE MARUZİYET MEKANİZMALARI

Ortaya çıkan kirleticilerin hayvanlarda oluşturduğu etkiler, yalnızca dozla değil, maruziyet süresi**,** bileşiklerin biyoyararlanımı**,** biyotransformasyon yeteneği ve türler arası farklılıklarla da ilişkilidir. Bu nedenle EC'lerin hayvan besleme sistemlerindeki davranışı, hem toksikokinetik (emilim-dağılım-metabolizma-atılım) hem de fizyolojik süreçler üzerinden değerlendirilmelidir.

3.1. Emilim, Dağılım ve Biyobirikim

Kirleticilerin çoğu, sindirim kanalından pasif difüzyon veya taşıyıcı aracılı mekanizmalarla emilir. Lipofilik bileşikler (EDC'ler, POP'lar vd.) yağ dokularında birikme eğilimindedir. Hidrofilik bileşikler (antibiyotikler, farmasötikler vd.) ise genellikle idrarla atılır, fakat rumen ve karaciğerde metabolitleri birikebilir (Abdallah ve ark., 2022).

Biyobirikim katsayısı (BCF) yüksek olan bileşikler (> 1000), hayvan dokularında kalıcı hale gelir. PFAS, PCB ve bazı mikotoksinler bu gruba dâhildir. Ruminantlarda bu maddelerin süt ve yağ dokusunda birikimi, hayvansal ürünlerin insanlara kirletici taşıyıcısı haline gelmesine yol açabilir (FAO, 2021).

3.2. Mikrobiyota Etkileşimleri

Rumen mikrobiyotası, besleme fizyolojisinin merkezinde yer alır. EC'lerin birçoğu (özellikle antibiyotikler, EDC'ler ve nanomalzemeler) mikrobiyota dengesini bozabilir. Bu durum, fermantasyon süreçlerinde uçucu yağ asitleri (VFA) profili değişimlerine, metan üretiminde artışa ve sindirim verimliliğinde düşüşe neden olur (Zhang ve ark., 2022).

Mikro/nano-plastiklerin rumen veya bağırsak mikrobiyotasında **biyofilm benzeri** yapılar oluşturduğu, böylece diğer kirleticilerin (ağır metaller, pestisitler vd.) adsorpsiyonunu artırdığı saptanmıştır (Boahen ve ark., 2025). Bu "taşıyıcı etki", antibiyotik kalıntılarıyla birleştiğinde direnç genlerinin taşınmasını kolaylaştırır (García-Rodríguez ve ark., 2014).

3.3. Tür Bazında Duyarlılıklar

Ruminantlar

Ruminantlar, yüksek mikrobiyal aktiviteye sahip sindirim sistemleri nedeniyle hem bozunma hem biyotransformasyon kapasitesine sahiptir. Ancak bu durum EC'lerin tamamen zararsız hale getirildiği anlamına gelmez. Bazı antibiyotikler (monensin, oksitetrasiklin vd.) rumende parçalanmaz, dolayısıyla mikrobiyal flora üzerinde uzun süreli baskı oluşturabilir. Rumen sıvısında oluşan sekonder metabolitler, bazen orijinal bileşikten daha toksik olabilir. Örneğin, diklofenak metabolitleri karaciğer toksisitesini artırabilir (Patel ve ark., 2020).

Monogastrikler

Domuz ve kanatlı türleri, EC'lere karşı daha hassas kabul edilir. Çünkü bağırsak florası çeşitliliği düşüktür ve karaciğer metabolizma kapasitesi ruminantlara kıyasla daha sınırlıdır. Mykotoksinler bu türlerde yem alımını hızla azaltabilir (Kim ve ark., 2023).

Su Ürünleri ve Diğer Türler

Akuatik hayvanlarda EC birikimi daha belirgindir; çünkü maruziyet hem yem hem de su (ortam) yoluyla gerçekleşir. Mikroplastiklerin balık ve karideslerde sindirim dokularında biriktiği, kas dokusuna geçtiği rapor edilmiştir. Bu durum, su ürünlerinin yem katkısı olarak kullanılmasında zincirleme kirletici aktarımı riskini artırır (Li ve ark., 2024).

3.4. Kombine ve Kronik Maruziyet Etkileri

Hayvan beslemede EC'lerin çoğu düşük dozda fakat sürekli maruziyet şeklinde etki gösterir. Kronik maruziyet, kısa süreli toksik etki göstermese de uzun vadede fizyolojik dengesizlik yaratır. EDC'lerin ve farmasötik kalıntıların uzun süreli düşük doz maruziyeti, hipotalamus-hipofiz-gonad ekseninde hormonal değişimlere yol açabilir (Li ve ark., 2024).

Ayrıca, kirleticiler arasındaki sinerjistik etkileşimler önemlidir. Örneğin, zearalenon ve nonilfenol kombinasyonu dişilerde östrus döngüsünü kısaltırken, erkeklerde sperm üretimini düşürür (Kolawole ve ark., 2024). Benzer şekilde antibiyotiklerle mikroplastiklerin birlikte bulunması, bağırsakta ilaçların adsorpsiyonunu artırarak toksisiteyi güçlendirebilir (Boahen ve ark., 2025).

3.5. Biyotransformasyon ve Atılım

Hayvan organizmaları EC'leri genellikle karaciğer mikrozomal enzimleri aracılığıyla detoksifiye eder. Ancak bazı bileşikler, faz-I metabolizmasında toksik ara ürünler oluşturabilir. Örneğin, diklofenak metabolitleri oksidatif stres ve doku nekrozuna neden olabilir (Patel ve ark., 2020). EDC'lerin konjugasyon yoluyla glukuronid veya sülfat türevlerine dönüştürülmesi mümkündür, ancak bu metabolitler de idrar veya süt yoluyla çevreye yeniden girebilir. Bu da EC'lerin kapalı döngüsel bir çevrim oluşturduğunu göstermektedir (FAO, 2021).

4. HAYVAN BESLEME VE FİZYOLOJİK ETKİLER

Ortaya çıkan kirleticiler, hayvan besleme süreçlerinde yalnızca kimyasal kirlilik riski değil, aynı zamanda fizyolojik, biyokimyasal ve üretimsel dengesizliklerin de kaynağıdır. Bu bileşikler; sindirim sistemi, endokrin mekanizmalar, üreme ve bağışıklık sistemleri üzerinde çok yönlü etkiler oluşturur. Etkilerin şiddeti, maruziyet süresi, tür farkı, yaş, fizyolojik durum ve kirleticinin kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişir (Li ve ark., 2024).

4.1. Yem Alımı ve Yemden Yararlanma (Feed Conversion Ratio, FCR)

Yem alımı ve yemden yararlanma oranı, besleme verimliliğinin en temel göstergeleridir. EC'ler, hem doğrudan iştah üzerine etkili olabilir hem de metabolik süreçlerde bozulmaya yol açarak yemden yararlanmayı düşürebilir. Mikotoksinler ve emerging mykotoksinler bu açıdan öne çıkar. Enniatinler ve beauvericin, hayvanlarda hücre zarında iyon geçişini bozarak iştah kaybı, ishal ve su tüketiminde azalma gibi semptomlar yaratır (Kolawole ve ark., 2024). Deneysel çalışmalarda ruminantlarda zearalenon ve moniliformin maruziyetinin yemden yararlanmayı %8–15 oranında azalttığı, monogastriklerde bu düşüşün %20'yi bulduğu bildirilmiştir (Kim ve ark., 2023).

Endokrin bozucular (EDC), metabolik hormonların regülasyonunu değiştirerek yem tüketimini dolaylı biçimde etkiler. Nonilfenol, bisfenol A ve ftalatların insülin-tiroid eksenine müdahale ettiği, leptin sinyalini baskılayarak hayvanlarda beslenme davranışlarını değiştirdiği saptanmıştır (Li ve ark., 2024). Bu durum büyüme geriliği ve yemden yararlanma kaybı şeklinde sonuçlanır. Antibiyotik kalıntıları da rumen veya bağırsak mikrobiyotasında flora dengesizliği yaratarak sindirilebilirliği düşürür. Özellikle oksitetrasiklin ve makrolid kalıntıları, nişasta fermentasyonunda görevli bakterilerin sayısını azaltarak VFA üretimini düşürür. Böylece enerji kaynağı olarak kullanılabilir uçucu asit miktarı azalır, yemden yararlanma kötüleşir (Zhang ve ark., 2022).

4.2. Rumen Fermantasyonu, Sindirim ve Mikrobiyal Denge

EC'lerin sindirim sistemi üzerindeki en kritik etkisi, mikrobiyota kompozisyonunun değişmesidir. Ruminantlarda bu denge bozulduğunda, fermentasyon parametreleri (pH, amonyak-N, VFA oranları) doğrudan etkilenir.

- Antibiyotikler: Düşük doz antibiyotik maruziyeti rumen bakteriyel çeşitliliğini %30'a kadar azaltabilir. Bu durum, özellikle selülolitik

bakterilerde kayıplara yol açarak lif sindirimini sınırlar (Abdallah ve ark., 2022).

- Mikroplastikler ve nanomalzemeler: Bu parçacıklar, rumen yüzeyine tutunarak biyofilm benzeri tabakalar oluşturur. Böylece besin maddelerinin mikroorganizmalara ulaşımı zorlaşır. Ayrıca mikroplastik yüzeyine adsorbe olan toksinler mikrobiyal enzimleri inhibe edebilir (Boahen ve ark., 2025).
- EDC'ler: Rumende mikrobiyal enzim aktivitelerini baskılayabilir, özellikle β-glukuronidaz aktivitesini düşürür. Bu da bazı toksinlerin konjugasyonla atılımını engeller.

Rumen dışı sindirim sisteminde de EC etkileri gözlenir. Monogastriklerde (tavuk, domuz vd.) antibiyotik kalıntıları bağırsak mikrobiyotasında disbiyozise yol açar; yararlı bakterilerin (*Lactobacillus, Bifidobacterium*) azalmasıyla patojen mikroorganizmalar çoğalır. Bu durum, besin emilimini azaltırken bağırsak geçirgenliğini artırır ("leaky gut" sendromu) (Kim ve ark., 2023).

4.3. Üreme ve Endokrin Sistem Üzerindeki Etkiler

Endokrin bozucuların hayvansal üretim üzerindeki etkisi, literatürde en geniş belgelenmiş alanlardan biridir. EDC'ler östrojen, androjen, tiroid ve glukokortikoid reseptörleriyle etkileşime girerek hormonal dengeyi bozar (Geissen ve ark., 2015).

Ruminantlarda östrojen benzeri bileşikler (zearalenon, bisfenol A vd.) uterus gelişimini değiştirir, östrus döngüsünü bozar, gebelik oranını düşürür. Sığır sürülerinde zearalenon içeren yemlerin kullanıldığı işletmelerde doğurganlık oranının %10–18 azaldığı bildirilmiştir (Patel ve ark., 2020).

Erkek hayvanlarda nonilfenol ve ftalat maruziyeti testis ağırlığında azalma, sperm sayısında düşme ve motilite kaybına neden olur (Li ve ark., 2024). Hormon sentezinde görevli genlerin ekspresyonu da baskılanabilir. Kanatlılarda ise EDC'lerin dişi bireylerde cinsiyet oranını değiştirdiği, yumurtlama sıklığını azalttığı rapor edilmiştir (Kolawole ve ark., 2024).

4.4. Bağışıklık Sistemi ve Oksidatif Stres

EC'lerin bir diğer önemli etkisi, bağışıklık sistemi baskılanması ve oksidatif stresin artmasıdır. Özellikle farmasötikler, ağır metal-taşıyıcı mikroplastikler ve mykotoksinler reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini artırarak hücre zarını ve mitokondriyi hasara uğratır.

Ruminantlarda bu stres, süt veriminde düşüş ve mastitis insidansında artışla ilişkilidir. Mikroplastik maruziyeti sonucu karaciğer ve böbreklerde MDA (malondialdehit) düzeylerinin yükseldiği, antioksidan enzim aktivitelerinin (SOD, CAT, GPx) azaldığı rapor edilmiştir (Boahen ve ark., 2025). Bağışıklık baskılanması, özellikle mikotoksinlerle sinerjik etkileşim halinde daha belirgindir. Enniatinler ve beauvericin, lenfosit proliferasyonunu ve fagositoz kapasitesini azaltır. Bu nedenle EC'lerin varlığı, hayvanların enfeksiyonlara karşı direncini zayıflatır (Kim ve ark., 2023).

4.5. Ürün Kalitesi ve İnsan Sağlığına Yansımalar

Hayvansal ürünlerdeki EC kalıntıları, gıda güvenliği zincirinde en kritik halkayı oluşturur. Lipofilik kirleticiler (PFAS, PCB, PBDE vd.) yağ dokularında birikir ve süt, et, yumurta gibi ürünlerle insanlara taşınabilir.

FAO (2021) raporuna göre, süt ürünlerinde PFAS düzeyleri 0,2–1,5 µg/kg aralığında tespit edilmiştir. Bu bileşiklerin düzenli tüketim yoluyla insan serumunda birikebildiği ve hormonal etkiler oluşturabileceği bilinmektedir. Ayrıca mykotoksin metabolitleri (aflatoksin M1 gibi) süt yoluyla doğrudan insanlara geçer.

Dolayısıyla, EC'lerin yalnızca hayvan besleme değil, aynı zamanda One Health yaklaşımıyla bütüncül değerlendirilmesi gerekir.

5. ANALİTİK YAKLAŞIMLAR VE TESPİT YÖNTEMLERİ

EC'lerin hayvan besleme zincirindeki varlığını belirlemek için yüksek duyarlılığa sahip analitik yöntemler gerekir. Bu bileşikler genellikle ng/L–µg/kg düzeylerinde bulunduğundan, klasik analiz teknikleriyle tespit edilmeleri zordur. Günümüzde, kütle spektrometri, yüksek performanslı sıvı kromatografi (HPLC), biyosensör teknolojileri ve nanomalzeme tabanlı tespit sistemleri yaygın biçimde kullanılmaktadır (Patel ve ark., 2019; Gaudin, 2017).

5.1. Kütle Spektrometrik Analizler (LC-MS/MS, GC-MS)

Yem, su ve biyolojik örneklerde EC tespiti için en yaygın teknikler LC-MS/MS (Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry) ve GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)'dir. Bu yöntemler, bileşiklerin kimyasal imzasını ve miktarını yüksek hassasiyetle ölçer.

- LC-MS/MS: Termolabil ve polar bileşikler (antibiyotikler, farmasötikler, EDC'ler) için uygundur. Tespit sınırı genellikle 0,1–1 ng/L arasındadır.

- GC-MS: Uçucu veya yarı uçucu organik bileşiklerin (pestisitler, PBDE'ler, PAH'lar) analizinde kullanılır.

Son yıllarda, yüksek çözünürlüklü kütle spektrometresi (HRMS) teknikleri (Orbitrap, TOF-MS) ile çoklu kirletici analizi yapılabilmektedir. Bu sistemler, aynı örnekte yüzlerce bileşiğin taranmasına imkân tanır (Li ve ark., 2024).

5.2. Katı Faz Ekstraksiyonu (SPE) ve Numune Hazırlığı

Numune hazırlığı, EC analizlerinin en kritik aşamasıdır. Yem ve su örneklerinde matriks etkisi yüksektir; bu nedenle katı faz ekstraksiyonu (SPE) yaygın olarak uygulanır. Bu yöntem, istenmeyen bileşenleri uzaklaştırarak hedef kirleticilerin konsantrasyonunu artırır. Örneğin, nonilfenol ve bisfenol A'nın yem ekstraktlarında belirlenebilmesi için C18-SPE kartuşları kullanılır; geri kazanım oranı %85'in üzerindedir. Mikotoksin analizlerinde ise immünoafinite kolonları tercih edilir (Gaudin, 2017).

5.3. Biyosensör ve Nanoteknoloji Tabanlı Tespit Sistemleri

Son yıllarda biyosensör teknolojileri, EC'lerin izlenmesinde hızlı ve maliyet etkin bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Biyosensörler, antikor, enzim, DNA probu veya nanomalzeme tabanlı algılayıcı unsurlarla çalışır.

- Elektrokimyasal sensörler: Nonilfenol, zearalenon ve tetracycline gibi bileşikleri tespit edebilir.
- Optik sensörler: Yüksek özgüllük sağlar; floresan veya yüzey plazmon rezonansı (SPR) tabanlı çalışır.
- Nanomalzeme tabanlı sensörler: Karbon kuantum noktaları (CQD), grafen oksit (GO) ve gümüş nanoparçacıkları kullanılarak düşük algılama sınırları (0,1 µM altı) elde edilmiştir (Singh ve ark., 2018).

Bu sistemler, yem üretim tesislerinde yerinde izleme (on-site monitoring) için uygulanabilir hâle gelmiştir. Özellikle nanobiyosensörler, kirleticilerin pikomolar düzeylerinde bile belirlenmesini sağlar.

5.4. İzleme Protokolleri ve Örnekleme Stratejileri

EC'lerin dağılımı zamana ve çevresel koşullara bağlı olduğundan, örnekleme planları periyodik olmalıdır. Kompozit numune alma, alan bazlı (grid) örnekleme ve akışa bağlı su örnekleme yöntemleri tercih edilir.

Hayvan besleme sisteminde izleme, genellikle üç aşamada yürütülür:

1. Hammadde kontrolü: Yem hammaddeleri (tahıllar, küspe, unlar) giriş aşamasında test edilir.
2. Üretim hattı izlemesi: Karışım ve depolama aşamalarında kontaminasyon riski değerlendirilir.
3. Son ürün analizi: Nihai yemde veya hayvansal ürünlerde EC kalıntıları ölçülür.

Uluslararası standartlar (ISO 18857, EPA 1694) EC analizleri için metodolojik kılavuzlar sunmaktadır. Ancak yem özelinde bu standartların henüz tam uyarlanmadığı belirtilmektedir (Kolawole ve ark., 2024).

5.5. Veri Değerlendirme ve Raporlama

EC analizlerinde, sadece tespit edilen konsantrasyon değil, aynı zamanda etki eşiği (NOAEL) ve maruziyet katsayısı (HQ) gibi risk göstergeleri de değerlendirilir. Örneğin, yemlerde bisfenol A için NOAEL değeri 5 µg/kg vücut ağırlığı/gün; HQ > 1 olması durumunda potansiyel risk kabul edilir (EEA, 2015).

Veriler, genellikle log-normal dağılım varsayımıyla istatistiksel olarak analiz edilir. Çoklu kirletici analizlerinde principal component analysis (PCA) veya cluster analysis gibi çok değişkenli yöntemler EC profillerini sınıflandırmak için kullanılır (Li ve ark., 2024).

6. RİSK DEĞERLENDİRMESİ VE DÜZENLEYİCİ ÇERÇEVE

Hayvan besleme sisteminde ortaya çıkan kirleticilerin (EC'lerin) oluşturduğu riskin doğru değerlendirilmesi, yalnızca kimyasal analize değil, aynı zamanda biyolojik etkilerin modellemesine **ve** maruziyet dinamiklerinin anlaşılmasına bağlıdır. EC'ler için risk değerlendirmesi genellikle maruziyet tahmini**,** tehlike tanımlaması**,** doz–yanıt ilişkisi ve risk karakterizasyonu aşamalarından oluşur (FAO, 2021).

6.1. Uluslararası Limitler ve Standartlar

Avrupa Birliği ve ABD EPA, EC'leri geleneksel kirleticilerden farklı biçimde **"**izleme listeleri (watch lists)**"** kapsamında değerlendirir.

AB'nin 2015 ve 2020 güncellemelerinde estron, 17β-estradiol, diklofenak, makrolid antibiyotikler, bisfenol A ve nonilfenol gibi bileşikler yüzey suları için sınır değerlerle tanımlanmıştır (EEA, 2015).

Ancak hayvan yemi veya hayvansal ürünler için hâlen uluslararası düzeyde spesifik limitler belirlenmemiştir.

EFSA (2023), EC'lerin özellikle mikotoksinler ve pestisit türevleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamış; "kombine toksisite" yaklaşımını önermiştir.
ABD EPA, içme sularında farmasötik kalıntılar için rehber değerler (örneğin diklofenak < 0.1 µg/L, 17β-estradiol < 0.4 ng/L) yayımlamış, ancak yem kaynaklı maruziyet için bir sınırlama getirmemiştir.

Türkiye'de Tarım ve Orman Bakanlığı'nın Yem Hijyeni Yönetmeliği ve TS 266 Su Kalitesi Standardı, ağır metaller ve klasik kirleticiler için eşik değerler içerir; fakat emerging kirleticiler için düzenleme bulunmamaktadır. Bu durum, mevzuatın güncellenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. (**TSE, 2005;** Resmi Gazete, 2011).

6.2. Maruziyet ve Tehlike Değerlendirme Parametreleri

Risk karakterizasyonu genellikle iki temel parametreyle yapılır (Doménech ve Martorell, 2024; Lambré ve ark., 2023):

- **NOAEL (No Observed Adverse Effect Level)** – Olumsuz etki gözlenmeyen en yüksek doz.
- **ADI (Acceptable Daily Intake)** – Hayvanın günlük alımında güvenli kabul edilen doz.

Kirleticiye özgü ADI ve NOAEL değerleri çoğu zaman deneysel veriye dayanır. Örneğin, zearalenon için sığırda NOAEL = 40 µg/kg BW/gün; bisfenol A için ADI = 5 µg/kg BW/gün'dür (Patel ve ark., 2020).

Riskin nicelleştirilmesinde Tehlike Katsayısı (HQ) kullanılır:

HQ=Maruziyet Du¨zeyiReferans DozHQ = \frac{Maruziyet\ Düzeyi}{Referans\ Doz}HQ=Referans DozMaruziyet Du¨zeyi

HQ > 1 olduğunda potansiyel sağlık riski kabul edilir (Li ve ark., 2024). EC'ler genellikle düşük dozlarda bulunduğu için tekil HQ değerleri düşüktür; ancak birikimli maruziyet (∑HQ) dikkate alındığında riskin arttığı görülür.

6.3. Türkiye ve Gelişmekte Olan Ülkelerde Durum

Türkiye'de EC'lerle ilgili araştırmalar son yıllarda artış göstermiştir, ancak uygulamada yem ve su kalitesi izleme programları hâlâ sınırlıdır. Atık suların tarımsal sulamada kullanılması, organik gübre uygulamaları ve ithal yem hammaddeleri, EC maruziyet riskini yükseltmektedir (Çapar ve ark., 2020; Carter ve ark., 2025).

Gelişmekte olan ülkelerde benzer durum gözlenir: laboratuvar altyapısının sınırlılığı, ekonomik kısıtlar ve farkındalık eksikliği, EC yönetimini zorlaştırmaktadır (Kolawole ve ark., 2024).

Bu nedenle ulusal düzeyde izleme ağlarının kurulması, akademi-kamu-sanayi işbirliğiyle EC veri tabanlarının oluşturulması gerekmektedir.

7. AZALTMA, ÖNLEME VE YÖNETİM STRATEJİLERİ

Ortaya çıkan kirleticilerin hayvan besleme zincirine girişini önlemek, yalnızca teknik arıtma süreçleriyle değil, entegre yönetim yaklaşımlarıyla mümkündür. Etkin bir strateji; kaynağın azaltılmasından, üretim zincirinin izlenmesine ve son aşamada biyolojik arıtıma kadar uzanmalıdır (FAO, 2021).

7.1. Arıtma Teknolojileri

Biyosorpsiyon ve Biyobozunma

Mikroalgler, mantarlar ve bakteriler, özellikle farmasötikler ve EDC'lerin uzaklaştırılmasında etkili doğal biyosorbanlardır. *Chlorella vulgaris* ve *Spirulina platensis*, suda çözünmüş antibiyotiklerin %80'e kadarını absorbe edebilir. Ayrıca *Trametes versicolor* gibi beyaz çürük mantarlar, enzimatik sistemleriyle nonilfenol ve diklofenak'ı parçalayabilir (Li ve ark., 2024).

İleri Oksidasyon Prosesleri (AOPs)

Ozonlama, fotokataliz ve elektro-oksidasyon gibi yöntemler, EC'lerin kimyasal yapılarını bozarak toksisitelerini azaltır. LC-MS/MS analizleri, ozonlama sonrası bisfenol A konsantrasyonunun %95 azaldığını göstermiştir (Gaudin, 2017).

Filtrasyon ve Adsorpsiyon Sistemleri

Aktif karbon, zeolit ve grafen oksit tabanlı filtreler, EC'lerin fiziksel olarak tutulmasında etkilidir. Yem üretim tesislerinde hava-su filtrasyon sistemlerinin kurulması, üretim hattına EC taşınımını engelleyebilir (Marnani ve ark., 2024).

7.2. Yem Hammaddesi Kontrolü ve İzlenebilirlik

Yem güvenliği zincirinde ilk basamak hammadde seçimi ve kontrolüdür**.** Her parti yem hammaddesinin kimyasal analiz raporları (özellikle pestisit, antibiyotik ve mikotoksin taramaları) üretici tarafından doğrulanmalıdır (ISO, 2011; Union, 2005; Pellegrino Missaglia ve ark., 2020).

ISO 22000 ve HACCP sistemleri, bu izlenebilirliği sağlamak için etkin araçlardır. Ayrıca blok zinciri (blockchain) tabanlı tedarik zinciri yönetimi, hammaddenin kaynağından çiftliğe kadar izlenmesini mümkün kılar. Bu sistem, özellikle organik üretim ve ihracat pazarlarında güven artırıcı bir uygulamadır (Boahen ve ark., 2025).

7.3. Çiftlik Düzeyinde Yönetim ve İyi Uygulamalar

- **Atık yönetimi:** Hayvan dışkılarının doğrudan toprağa verilmesi yerine biyogaz veya kompostlama süreçlerinden geçirilmesi, EC'lerin çevreye geçişini azaltır(Wyszkowska ve ark., 2025).
- **Su kalitesi yönetimi:** İçme ve yıkama sularının periyodik analizi, özellikle farmasötik ve deterjan kalıntıları açısından yapılmalıdır (Mosharaf ve ark., 2024).
- **Yem katkı maddeleri:** EC'leri bağlayabilen organik bentonit, aktif karbon veya maya hücre duvarı türevleri yemlere eklenebilir (Kim ve ark., 2023).
- **Eğitim ve farkındalık:** Üreticilere EC'lerin riskleri, arıtım teknikleri ve izleme gereklilikleri hakkında düzenli eğitim verilmelidir (Kılıç ve Sönmez, 2024).

7.4. Politika ve Sürdürülebilirlik Yaklaşımları

EC yönetimi, sürdürülebilir üretim politikalarıyla entegre edilmelidir. Birleşmiş Milletler'in 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (özellikle Amaç 6 – Temiz Su ve Sanitasyon**,** Amaç 12 – Sorumlu Üretim ve Tüketim**)** bu yönde

çerçeve sunar. Ayrıca One Health yaklaşımı, EC'lerin yalnızca hayvan sağlığı değil, insan ve çevre sağlığını da kapsayan çok disiplinli stratejilerle ele alınmasını gerektirir (Geissen ve ark., 2015).

8. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Ortaya çıkan kirleticiler, hayvan besleme bilimi açısından yeni bir paradigma değişimini temsil eder. Bu bileşikler, klasik toksikolojik anlayışın ötesine geçerek; düşük doz, uzun süreli ve çoklu maruziyet koşullarında biyolojik sistemleri etkileyebilmektedir.

Derleme boyunca öne çıkan bulgular şu şekilde özetlenebilir:

1. **Kapsam genişliği:** EC'ler; antibiyotikler, EDC'ler, mikro/nano-plastikler, yeni mikotoksinler ve kalıcı organik kirleticiler gibi farklı gruplardan oluşur.
2. **Yayılım yolları:** Tarımsal sulama, atık sular, biyokatılar, yem hammaddeleri ve su kaynakları EC'lerin ana taşıyıcılarıdır.
3. **Hayvansal etkiler:** Mikrobiyota değişimi, yemden yararlanma düşüşü, hormonal dengesizlik, üreme ve bağışıklık sorunları sık gözlenir.
4. **İnsan sağlığı bağlantısı:** Hayvansal ürünlerde EC kalıntıları, besin zinciri yoluyla insanlara taşınabilir.
5. **Analitik ve yönetim ihtiyacı:** Mevzuat boşlukları ve izleme yetersizliği, risklerin doğru yönetilmesini engellemektedir.

Gelecekteki çalışmalar şu alanlara odaklanmalıdır:

- EC'lerin **kombine etkilerini** değerlendiren çoklu maruziyet modellerinin geliştirilmesi,
- **Omik teknolojileri (metagenomik, metabolomik)** kullanarak mikrobiyota-kirletici etkileşimlerinin aydınlatılması,
- Hayvan besleme zinciri için ulusal veri tabanlarının oluşturulması,
- EC içeren atıkların döngüsel ekonomi prensipleriyle yeniden kullanımı,
- Türkiye koşullarına özgü limit değerlerin belirlenmesi.

Sonuç olarak, EC'lerin hayvan besleme üzerindeki etkileri yalnızca bilimsel bir konu değil, aynı zamanda tarımsal üretimin sürdürülebilirliği ve toplum sağlığının korunması açısından da stratejik önemdedir. One Health

temelli, disiplinler arası yaklaşımlar geliştirilmedikçe, bu kirleticilerin oluşturduğu riskler artarak devam edecektir.

KAYNAKÇA

1. Abdallah, M. F., et al. (2022). Environmental contaminants and animal health: Analysis, toxicity, and mitigation. Frontiers in Veterinary Science.
2. Boahen, E., et al. (2025). A comprehensive review of emerging environmental contaminants. Environmental Chemistry Letters. https://doi.org/10.1007/s44274-025-00259-x
3. Carter, L. J., Adams, B., Berman, T., Cohen, N., Cytryn, E., Elder, F. C. T., ... & Chefetz, B. (2025). Co-contaminant risks in water reuse and biosolids application for agriculture. *Environmental Pollution*, 126219.
4. Çapar, G., Coşkun, Ç., & Arslan, S. (2020). Assessment of livestock drinking water quality: A case study in a special environmental protection area. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 36 (1): 61-75.
5. Doménech, E., & Martorell, S. (2024). Review of the terminology, approaches, and formulations used in the guidelines on quantitative risk assessment of chemical hazards in food. Foods 13 (5), 714.
6. European Commission. (2020). Commission Implementing Decision (EU) 2020/1161 amending Decision (EU) 2018/840 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy. Brussels: European Commission.
7. European Environment Agency (EEA). (2015). Watch list for emerging water pollutants in the EU. EEA Report No. 7/2015.
8. FAO. (2021). Water quality for livestock and feed hygiene. Rome: Food and Agriculture Organization.
9. Gaudin, V. (2017). Advances in biosensors for detection of antibiotics in environmental samples. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 409(25), 6281–6292.
10. García-Rodríguez, A., Molina-Domínguez, L., Taj, A., & Martínez-Bueno, M. J. (2014). Antibiotic residues and antibiotic resistance patterns in aquatic environments. Environmental Science and Pollution Research, 21(6), 3850–3861.
11. Geissen, V., Mol, H., Klima, M., et al. (2015). Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management. International Soil and Water Conservation Research, 3(1), 57–65. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.002
12. ISO. (2011). The ISO survey 2010. ISO. http://www.iso.org.

13. ISO. (2011–2013). ISO 18857 (series): Water quality — Determination of selected alkylphenols. Geneva: International Organization for Standardization.
14. Khalifa, H. O., Shikoray, L., Mohamed, M. Y. I., Habib, I., & Matsumoto, T. (2024). Veterinary drug residues in the food chain as an emerging public health threat: Sources, analytical methods, health impacts, and preventive measures. *Foods*, *13*(11), 1629.
15. Kılıç, F. N., & Sönmez, O. (2024). Pollutant Effects and Management of Animal Manure. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, *12*(8), 1467-1475.
16. Kim, J. H., et al. (2023). Determination of safe levels and toxic levels for feed contaminated by mycotoxins. East Asian Journal of Animal Sciences, 65(3), 490–506.
17. Kolawole, O., Siri-Anusornsak, W., Petchkongkaew, A., et al. (2024). A systematic review of global occurrence of emerging mycotoxins in crops and animal feeds, and their toxicity in livestock. Emerging Contaminants, 10, 100305. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100305
18. Lambré, C., Barat Baviera, J. M., Bolognesi, C., Chesson, A., Cocconcelli, P. S., ... & Van Loveren, H. (2023). Re-evaluation of the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes and Processing Aids (CEP), *EFSA Journal*, *21*(4), e06857.
19. Li, X., et al. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Chemical characteristics, sources, environmental and health impacts. Eco-Environment & Health. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420
20. Marnani, N. N., Tezel, F. H., & Basu, O. D. (2024). Adsorptive removal of dyes: a comparison of graphene oxide to granular activated carbon and zeolite NaY. *Applied Sciences*, *14*(21), 9811.
21. Mosharaf, M. K., Gomes, R. L., Cook, S., Alam, M. S., & Rasmusssen, A. (2024). Wastewater reuse and pharmaceutical pollution in agriculture: Uptake, transport, accumulation and metabolism of pharmaceutical pollutants within plants. *Chemosphere*, *364*, 143055.
22. Patel, M., Tiwari, S., & Sharma, R. (2019). Detection and monitoring of emerging pollutants using advanced analytical techniques. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7(4), 103188.

23. Patel, M., Tiwari, S., Chaturvedi, S., & Sharma, R. (2020). Emerging contaminants in aquatic ecosystems: Health risks and remediation. Environmental Chemistry Letters, 18, 1023–1036.

24.Pellegrino Missaglia, A., Bruno, A., & Battaglia, D. (2020). Good practices for the feed sector.

25. Resmi Gazete, (2011). *Yem Hijyeni Yönetmeliği.* Tarih: 13.12.2011, Sayı: 28155.

26.EFSA Scientific Committee. (2023). Guidance on the assessment of exposure to multiple chemicals (mixture risk assessment). EFSA Journal.

27.Salvatore, S., & Ferrer, M. V. (2025). Report for 2023 on the results from the monitoring of residues of veterinary medicinal products in live animals and animal products. European Food Safety Authority (EFSA), (Vol. 22, No. 2, p. 9297E).

28.Santos, L. H., Rodríguez-Mozaz, S., & Buttiglieri, G. (2025). Pharmaceutical contamination in edible plants grown on soils amended with wastewater, manure, and biosolids: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-24.

29.Singh, R., Kumar, S., & Verma, N. (2018). Functionalized carbon quantum dots for detection of nonylphenol in water. Sensors and Actuators B: Chemical, 254, 1116–1124.

30.TSE (2005): TS 266 Sular-İnsani Tüketim Amaçlı Sular. Türk Standartları Enstitüsü, 29 Nisan 2005.

31.Union, E. (2005). Regulation (EC) No 183/2005 of the European parliament and of the council of 12 January 2005 laying down requirements for feed hygiene. *Off J Eur Comm L*, *35*, 1-22.

32.U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2007). Method 1694: Pharmaceuticals and personal care products in water, soil, sediment, and biosolids by HPLC/MS/MS. Washington, DC: EPA.

33.United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations.

34.Wang, F., Xiang, L., Leung, K. S. Y., Elsner, M., Zhang, Y., Guo, Y., ... & Tiedje, J. M. (2024). Emerging contaminants: a one health perspective. *The Innovation*, *5*(4).

35.Wyszkowska, J., Mikulski, D., Borowik, A., Zaborowska, M., Kucharski, J., Kozłowski, K., ... & Jankowski, J. (2025). The Effect of Fertilization with Antibiotic-Contaminated Manure on Microbial Processes in Soil. *Agriculture*, *15*(9), 979.

36. Zhang, Y., Li, T., & Chen, Z. (2022). Antibiotic residues in livestock feed and their effects on rumen microbiota. Journal of Animal Feed Science and Technology, 285, 115238.