



TAVUKÇULUK ENDÜSTRİSİNDE ATIKLARIN ENTEGRE YÖNETİMİ: ÇEVRESEL RİSKLER, YENİLİKÇİ GERİ KAZANIM TEKNOLOJİLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNETİM MODELLERİ

Muhammed YÜCEER^{1*}, Ecem IŞIK²

¹Canakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale Technical Sciences Vocational School, Department of Food Processing, 017020, Canakkale, Türkiye

²Gemak Food Industry Machinery and Trade Inc., R&D Center, Alıcı OSB Disct., 2032 St., 06909, Ankara, Türkiye

Özet: Tavukçuluk endüstrisi, dünya genelinde hızla artan nüfusun protein ihtiyacını karşılamada en önemli hayvansal üretim kollarından biri haline gelmiştir. Ancak endüstrideki bu hızlı büyüme, beraberinde ciddi miktarda atık oluşumunu da getirmekte ve çevresel sürdürülebilirlik açısından yeni sorun alanları ortaya çıkarmaktadır. Gübre, tüy, kan, sakatat, yumurta kabuğu ve atıksu gibi farklı nitelikteki yan ürünler, kontrolsüz şekilde bertaraf edildiğinde amonyak emisyonları, sera gazı salımları, su ve toprak kirliliği ile halk sağlığı risklerine yol açabilmektedir. Bu çalışma, tavukçuluk atıklarının sınıflandırılması, çevresel etkileri, değerlendirme yöntemleri ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarına ilişkin güncel ulusal ve uluslararası literatürün kapsamlı bir şekilde incelenmesi ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi esasına dayanan bir derleme çalışmasıdır. Literatür verileri doğrultusunda, kompost ve biyogaz üretimi, enzimatik biyodönüşüm, tüylerden keratin geri kazanımı ile kan ve sakatatın protein hidrolizatlarına dönüştürülmesi gibi çevre dostu yaklaşımların tavukçuluk atıklarının döngüsel ekonomi kapsamında katma değerli ürünlere dönüştürülmesinde önemli potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak bu derleme, tavukçuluk atıklarının sürdürülebilir yönetimine yönelik mevcut uygulamaları ve gelecekteki araştırma gereksinimlerini bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirerek sektör için yol gösterici bilgiler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Kanatlı sektörü atıkları, Gübre yönetimi, Keratin geri kazanımı, Biyogaz, Döngüsel ekonomi, Çevresel etkiler

Integrated Waste Management in the Poultry Industry: Environmental Risks, Innovative Recovery Technologies, and Sustainable Management Models

Abstract: The poultry industry has become one of the most important livestock production sectors for meeting the increasing global demand for animal protein. However, the rapid expansion of the industry has also resulted in the generation of substantial amounts of waste, creating significant environmental sustainability challenges. Poultry manure, feathers, blood, offal, eggshells, and wastewater can lead to ammonia emissions, greenhouse gas release, soil and water contamination, and public health risks when improperly managed. This study was conducted as a comprehensive literature review by systematically evaluating recent scientific publications on poultry waste classification, environmental impacts, waste valorization technologies, and sustainable management practices. The collected information was comparatively analyzed to identify current utilization approaches, technological advancements, and future research needs. Recent biotechnological and environmentally friendly approaches demonstrate that poultry waste can be transformed into value-added products rather than simply disposed of. Composting, biogas production, enzymatic bioconversion, keratin recovery from feathers, and the production of protein hydrolysates from blood and offal are among the most promising valorization strategies supporting the circular economy. This review discusses the classification of poultry waste, its environmental impacts, current valorization methods, and future research perspectives, thereby providing a comprehensive framework for the development of sustainable poultry waste management strategies.

Keywords: Poultry industry waste, Manure management, Keratin recovery, Biogas, Circular economy, Environmental impacts

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Canakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale Technical Sciences Vocational School, Department of Food Processing, 017020, Canakkale, Türkiye

E mail: myuceer@comu.edu.tr (M.YÜCEER)

Muhammed YÜCEER  <https://orcid.org/0000-0001-6709-1347>

Ecem IŞIK  <https://orcid.org/0009-0000-5232-0821>

Gönderi: 13 Şubat 2026

Kabul: 15 Temmuz 2026

Yayınlanma: 15 Eylül 2026

Received: February 13, 2026

Accepted: July 15, 2026

Published: September 15, 2026

Cite as: Yüceer, M. & Işık, E. (2026). Integrated waste management in the poultry industry: environmental risks, innovative recovery technologies, and sustainable management models. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 9(5), 2844-2858.

1. Giriş

Küresel nüfus artışı, kentleşme ve değişen beslenme alışkanlıklarına bağlı olarak hayvansal protein kaynaklarına olan talep her geçen yıl artmaktadır. Bu talebin karşılanmasında önemli bir role sahip olan

tavukçuluk sektörü, kısa üretim döngüsü, yüksek yem dönüşümü ve ekonomik üretim kapasitesi sayesinde dünya genelinde en hızlı büyüyen hayvansal üretim alanlarından biri olarak kabul edilmektedir. Ancak sektördeki üretim hacminin sürekli artması, yalnızca et



ve yumurta üretimini değil, aynı zamanda önemli miktarda organik ve inorganik atığın oluşumunu da beraberinde getirmektedir. Tavuk gübresi, altlık materyali, tüyler, ölü hayvanlar, kesimhane yan ürünleri ve atık sular gibi farklı özelliklere sahip bu atıklar, uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel kirlilik, sera gazı emisyonları, kötü koku oluşumu, patojen mikroorganizmaların yayılımı ile toprak ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olmakta; dolayısıyla ekosistem ve halk sağlığı açısından ciddi riskler oluşturmaktadır. Buna karşın söz konusu atıklar, içerdikleri organik madde, besin elementleri ve biyolojik bileşenler sayesinde biyogaz üretimi, organik gübre eldesi, kompostlama, enerji geri kazanımı, protein ve keratin geri kazanımı ile çeşitli biyoteknolojik ürünlerin üretimi gibi uygulamalarda değerlendirilebilecek önemli bir biyokaynak niteliği taşımaktadır. Bu nedenle tavukçuluk atıklarının etkin ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesi, yalnızca çevresel etkilerin azaltılması açısından değil, aynı zamanda kaynak verimliliğinin artırılması, atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesi ve döngüsel ekonomi ilkelerinin hayata geçirilmesi bakımından da stratejik önem taşımaktadır (Karuppannan vd., 2021; Raclavská vd., 2022; Ghaffari-Bohlouli vd., 2023).

Tavukçuluk endüstrisi, günümüzde küresel tarımsal üretimin en dinamik ve en hızlı büyüyen kollarından biri haline gelmiştir. Kırmızı ete kıyasla daha düşük maliyetli, kolay erişilebilir ve yüksek kaliteli bir hayvansal protein kaynağı sunması, sektörü küresel gıda güvencesinin merkezine taşımaktadır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) verilerine göre, 2020 yılında 133 milyon ton seviyesine ulaşan küresel tavuk eti üretiminin, artan nüfus ve talep doğrultusunda önümüzdeki dönemde de istikrarlı yükselişini sürdüreceği öngörülmektedir (Zinina vd., 2022). Dünya genelinde ise yaklaşık 18,5 milyar broyler tavuk bulunduğu ve yalnızca gübre kaynaklı 6,7 milyon ton azotun her yıl çevreye salındığı bildirilmektedir (Mottet ve Tempio, 2017). Bu yüksek üretim kapasitesinde Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Brezilya ve Hindistan önde gelirken, Avrupa Birliği ülkeleri de kayda değer bir paya sahiptir (Brandelli vd., 2015). Kanatlı hayvan yetiştiriciliğinin endüstriyel ölçekte belirli coğrafi bölgelerde yoğunlaşması (kümelenmesi), üretimin sürdürülebilirliği önünde ciddi bir lojistik ve ekolojik bariyer oluşturmaktadır. Özellikle küresel ölçekte yıllık yaklaşık 4,7 milyon ton hacme ulaşan tavuk tüyü gibi yüksek keratin içerikli dirençli biyokütlelerin yanı sıra, altlık gübresi ve kesimhane yan ürünlerinin (sakatat, kan, karkas parçaları) yarattığı asimetrik atık yükü, lokal ekosistemler üzerinde akut çevresel riskler barındırmaktadır. Söz konusu organik atıkların entegre ve rasyonel bir yönetim stratejisiyle bertaraf edilememesi; yeraltı su kaynaklarında ötrofikasyona, toprak kalitesinde kimyasal dejenerasyona ve sera gazı emisyonlarında artışa neden olarak, endüstrinin karbon

ve su ayak izini kritik düzeyde yükseltmektedir (Moktip vd., 2025).

Türkiye ise, dünya tavukçuluk sektöründe ilk 10 üretici ülke arasında yer almakta olup hem yumurta hem de etlik piliç üretiminde tarım ekonomisinin lokomotif sektörlerinden biridir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2024 yılında Türkiye’de yaklaşık 2,51 milyon ton tavuk eti (beyaz et) ve 21,16 milyar adet tavuk yumurtası üretilmiştir (Anonim, 2024). Bu üretim hacmi, tavukçuluk sektörünün ülke ekonomisi ve gıda arzındaki stratejik önemini ortaya koyarken, aynı zamanda yönetilmesi gereken önemli miktarda organik atığın oluşmasına da neden olmaktadır. Bu üretim, kırsal kalkınma ve ihracat gelirleri açısından önemli katkılar sağlamakla birlikte, atık yönetimini de stratejik bir zorunluluk haline getirmektedir. Ülkemizde tavuk gübresinin çoğunlukla doğrudan tarım arazilerinde gübre olarak kullanıldığı görülmektedir; ancak bu uygulama, aşırı azot ve fosfor yüklemesine bağlı olarak yeraltı sularında nitrat kirliliği ve amonyak emisyonlarının artışı gibi çevresel riskler yaratmaktadır (Singh vd., 2018; Rahman vd., 2022). Son yıllarda biyogaz üretimi, kompostlaştırma, anaerobik fermentasyon, tüylerden keratin geri kazanımı ve kesimhane yan ürünlerinin biyoteknolojik yöntemlerle değerlendirilmesi gibi yenilikçi uygulamalar, Türkiye’de hem pilot ölçekli hem de endüstriyel düzeyde giderek daha fazla ilgi görmektedir ve yaygınlaşmaktadır. Bu gelişmeler, tavukçuluk atıklarının yalnızca bertaraf edilmesi gereken çevresel bir yük olarak değil, aynı zamanda enerji, biyomalzeme ve katma değerli ürün üretiminde kullanılabilecek önemli bir biyokaynak olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, tavukçuluk sektörünün küresel ve ulusal ölçekte sürekli büyümesi, ekonomik katkılarının yanı sıra oluşan atıkların çevresel etkilerini azaltacak, kaynak verimliliğini artıracak ve döngüsel ekonomi ilkelerini destekleyecek sürdürülebilir atık yönetim stratejilerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını gerekli kılmaktadır (Dalkılıç ve Uğurlu, 2013; Yenilmez, 2015; Konkol vd., 2023; Tawfik vd., 2023).

Tavukçuluk endüstrisinde üretim ve kesim süreçleri sonucunda oluşan atıklar; fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine göre genel olarak gübre, tüy, yumurta kabuğu, kan, sakatat ve atıksu olmak üzere altı temel grupta toplanmaktadır. Bu atıkların her biri, doğru yönetilmediğinde ciddi birer çevre kirliliği unsuru (koku, yeraltı suyu kirliliği, sera gazı emisyonu) olma riski taşıırken; doğru geri kazanım yöntemleriyle (biyogaz, kompost, yem ham maddesi) ekonomik değere dönüştürülebilme potansiyeline sahiptir (Okur ve Eratahar, 2019). Öncelikle, gübre tavukçulukta en büyük atık grubunu oluşturmaktadır. Gübre, dışkının talaş, pirinç kabuğu veya saman gibi yataklık materyallerle karışmasından meydana gelir. Ayrıca yüksek azot, fosfor ve potasyum içeriği nedeniyle tarımda organik gübre olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hatta Edwards ve Daniel’in 1992 yılında yaptıkları bir çalışmada, 10 haftalık bir yetiştirme döneminde 1000 etlik piliçten

yaklaşık 1,46-ton (kuru bazda) gübre elde edildiği bildirilmiştir. Ancak bu miktar, kullanılan yataklık materyalin türüne, sürü yoğunluğuna ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Edwards ve Daniel, 1992). Kanatlı endüstrisinin en dirençli yan ürün akımlarından birini, toplam canlı ağırlığın yaklaşık %8'ine tekabül eden tüy atıkları oluşturmaktadır. Küresel ölçekte yıllık 4,7 milyon tonu aşan bu kütle, %85–90 oranında kristalin hidrofobik keratin matrisinden meydana geldiği için konvansiyonel biyolojik süreçlerle parçalanmaya karşı yüksek yapısal direnç göstermektedir. Kontrolsüz deşarjı durumunda lokal ekosistemlerde kalıcı kirlilik yükü oluşturan bu atıklar, günümüzde yeşil biyoteknoloji ve döngüsel biyofineri konseptlerinin odak noktası haline gelmiştir. Özellikle keratinolitik mikroorganizmalar tarafından sentezlenen spesifik keratinaz enzimlerinin kullanıldığı kontrollü biyoprosesler, disülfid bağlarının kopararak tüy biyo-kütlesinin yüksek sindirilebilirliğe sahip protein hidrolizatlarına, fonksiyonel yem katkı maddelerine ve biyo-bazlı polimerik malzemelere (biyoplastikler) dönüşümünü mümkün kılmaktadır (Brandelli vd., 2015; Moktip vd., 2025).

Tavukçuluk ve özellikle endüstriyel yumurta işleme (likit yumurta üretimi, pastörizasyon ve yumurta tozu) tesislerinde açığa çıkan katı atıklar arasında kütesel ve hacimsel açıdan en baskın paylardan birine sahip olan yumurta kabukları, ortalama 5–6 gramlık ağırlıklarıyla toplam yumurta kütesinin yaklaşık %9–12'sini oluşturmakta ve geleneksel depolama alanlarında kokuşma ile patojen üremesi gibi çevresel riskler barındırmaktadır. Ancak bu atık yükü, kimyasal yapısının %95–97 gibi çok büyük bir kısmını oluşturan biyo-yenilenebilir kalsiyum karbonat ve mikrobiyel bariyer görevi gören protein bazlı organik matrisi sayesinde, döngüsel ekonomi modeline doğrudan hizmet edebilecek yüksek katma değerli, sürdürülebilir bir ham madde potansiyeli taşımaktadır. Doğru yıkama, sterilizasyon ve mikronize öğütme işlemlerinin ardından bu fonksiyonel inorganik yapı; tarımsal uygulamalarda asidik toprakların pH dengesini düzenleyen ve bitki beslemede yavaş salınım gösteren doğal bir kalsiyum kaynağı olarak rol oynarken, endüstriyel boyutta polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi polimer matrislerin içerisine biyo-dolgu maddesi (bio-filler) olarak entegre edilerek ambalaj sanayisi için yeşil biyokompozit ve biyoplastiklerin geliştirilmesini sağlamakta, ayrıca yüksek biyoyararlanımıyla nutrasötik formülasyonlarda ve kemik doku mühendisliği için hidroksiapatit sentezi gibi ileri teknoloji malzeme uygulamalarında başarıyla değerlendirilmektedir. Ayrıca yumurta kabuğunun iç yüzeyini kaplayan ve inorganik kabuktan mekanik olarak ayrılabilen yumurta kabuğu zarı (egg Shell membrane, ESM), tavukçuluk endüstrisinin biyoteknolojik açıdan en değerli ve yüksek katma potansiyeline sahip organik atık gruplarından biridir. Toplam kabuk ağırlığının oldukça küçük bir kısmını oluşturmaya rağmen bu çift katmanlı fibröz yapı; doğası gereği Tip I, V ve X kolajen,

glukozamin, kondroitin sülfat, hiyalüronik asit ve sialik asit gibi biyoaktif bileşikler ile sülfür içeren amino asitlerce zengin fonksiyonel bir protein matrisinden meydana gelmektedir. Sentetik alternatiflerine kıyasla üstün biyo-uyumluluk, biyobozunurluk ve düşük immünojenite (alerjik reaksiyon riski) sergileyen bu doğal membran, özellikle kozmetik sanayisinde yaşlanma karşıtı ve cilt bariyerini güçlendirici formülasyonlarda sıklıkla tercih edilmektedir; bunun yanı sıra, biyotıp alanında yara örtücü materyallerin, yapay doku iskelelerinin (scaffold) ve eklem sağlığını destekleyici nutrasötiklerin geliştirilmesinde, çevre teknolojilerinde ise gözenekli yapısı sayesinde atıksulardan ağır metallerin ve boyar maddelerin uzaklaştırılmasını sağlayan sürdürülebilir bir biyosorbent olarak çok yönlü bir ticarileşme potansiyeli sunmaktadır (Yoo vd., 2009; Yüceer, 2021; Ngayakamo ve Onwualu, 2022).

Kesimhane süreçlerinde ortaya çıkan bir diğer atık grubu ise kan ve sakatattır. Kan, canlı ağırlığın yaklaşık %3'üne karşılık gelmekte ve yüksek protein içeriği nedeniyle atıksuların biyokimyasal oksijen ihtiyacını (BOİ) önemli ölçüde artırmaktadır. Sakatat ise baş, ayak ve iç organları kapsamakta olup toplam işlenmemiş etli gövdenin yaklaşık %7–8'ini oluşturmaktadır. Bu fraksiyonlar genellikle hayvansal atık geri dönüşüm tesislerinde işlenerek hayvansal un ve yağlara dönüştürülmekte, böylece ekonomik bir değer kazanmaktadır (Crawley vd., 1980; Dyosile vd., 2021).

Tavukçuluk endüstrisinde katı atık yönetimi (gübre, tüy vb.) ön planda görünse de, sıklıkla göz ardı edilen ancak ekolojik dengenin korunması açısından kritik öneme sahip olan asıl dinamik grup atıksulardır. Kesimhanelerde hijyen ve gıda güvenliği standartlarının sağlanabilmesi adına tüy yolma, haşlama, eviserasyon (iç organ çıkarma) ve karkas yıkama işlemleri sırasında yüksek miktarlarda su tüketilmektedir. Günümüz modern entegre tesislerinde bu tüketim hızı, karkas başına ortalama 26 litre/etlik piliç gibi çarpıcı bir düzeye ulaşmaktadır. Fatima vd. (2021) yaptıkları çalışmada, yalnızca eviserasyon aşamasında 7,6 litre/etlik piliç, yıkama aşamasında ise 4,3 litre/etlik piliç su tüketildiği bildirilmiştir. Bu yüksek hacimli su tüketimi, yalnızca kantitatif (miktersal) bir problem değil, aynı zamanda ciddi bir kalitatif (niteliksel) çevre kirliliği tehdididir. Söz konusu proseslerden açığa çıkan atıksular; yüksek miktarda kan, tüy parçacıkları, yağ, doku artıkları ve protein türevleri içermektedir. Bu organik yükün bir sonucu olarak atıksular; son derece yüksek Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ) ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) değerlerine sahip olurlar. Organik maddece zengin, yağlı ve protein yüklü bu atıksuların alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce uygun fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma proseslerinden geçirilmemesi, su kaynaklarında ötrofikasyona (aşırı alg çoğalması ve oksijensizleşme), toprak kirliliğine ve dolayısıyla küresel ölçekte akut çevresel risklerin tırmanmasına neden olmaktadır (Dyosile vd., 2021).

Tüm bu veriler birlikte değerlendirildiğinde, tavukçuluk endüstrisinde farklı kaynaklardan çok çeşitli atıkların ortaya çıktığı ve miktarlarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu atıkların çevresel yük olmaktan çıkarılıp ekonomik ve sürdürülebilir ürünlere dönüştürülmesi, sektörün geleceği açısından stratejik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Kelleher vd., 2002).

2. Derleme Çalışması

B Bu çalışma, tavukçuluk endüstrisinde farklı atık yönetim uygulamalarına ilişkin bilimsel literatürü inceleyen bir derleme çalışmasıdır ve PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) yönergeleri esas alınarak tasarlanmıştır (Page vd., 2021).

2.1. Literatür Tarama Stratejisi

Literatür taraması Scopus ve Web of Science veri tabanlarında gerçekleştirilmiştir. Tarama süreci 2026 yılına kadar yayımlanmış çalışmaları kapsayacak şekilde yürütülmüştür. Kullanılan anahtar kelimeler “egg industry”, “egg waste management”, “poultry by-products”, “eggshell waste valorization”, “anaerobic digestion”, “composting”, “waste-to-energy” ve “circular economy in poultry sector” şeklindedir. Arama, başlık, özet ve anahtar kelimeler alanlarında yapılmıştır.

2.2. Dahil Etme ve Dışlama Kriterleri

Çalışmalar aşağıdaki kriterlere göre seçilmiştir:

- Dahil etme kriterleri:
 - Yumurta endüstrisi ve/veya tavukçuluk atık yönetimi ile doğrudan ilişkili olması
 - Hakemli bilimsel dergilerde yayımlanmış olması
 - Deneyisel, uygulamalı veya derleme çalışması olması
 - İngilizce dilinde yayımlanmış olması
 - Tam metnine erişilebilir olması
- Dışlama kriterleri:
 - Konu ile doğrudan ilişkili olmayan çalışmalar
 - Yorum, editöryal not veya konferans özeti niteliğindeki yayınlar
 - Mükerrer kayıtlar
 - Tam metnine ulaşılamayan çalışmalar

2.3. Çalışma Seçimi (PRISMA süreci)

Literatür taraması sonucunda toplam N= 54 kayıt elde edilmiştir.

- Veri tabanlarından elde edilen kayıt sayısı: N = 54
- Nihai analize dahil edilen çalışmalar: N = 42

2.4. Veri Analizi

Seçilen çalışmalar içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Veriler; atık türleri, uygulanan yönetim teknolojileri (örneğin kompostlama, anaerobik fermentasyon, biyogaz üretimi), proses koşulları, elde edilen ürünler ve çevresel/ekonomik çıktılar açısından sınıflandırılmıştır. Ayrıca çalışmalar karşılaştırmalı olarak analiz edilerek mevcut eğilimler, teknolojik gelişmeler ve araştırma boşlukları belirlenmiştir.

Bu yaklaşım, yumurta endüstrisinde atık yönetimi uygulamalarına ilişkin bilimsel literatürün sistematik,

şeffaf ve tekrarlanabilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilir Atık Yönetimi Yaklaşımı

Geleneksel doğrusal ekonomi modeli “al-kullan-at” yaklaşımına dayanmaktadır. Bu modelde üretim sürecinde ortaya çıkan atıklar genellikle bertaraf edilmekte, bu durum ise çevresel sorunların artmasına neden olmaktadır. Buna karşın döngüsel ekonomi modeli, kaynakların mümkün olan en uzun süre değerli tutulmasını, atıkların yeniden kullanılarak katma değerli ürünlere dönüştürülmesini ve böylece hem çevresel hem de ekonomik fayda sağlanmasını amaçlamaktadır (Zinina vd., 2022). Tavukçuluk endüstrisi bağlamında bu yaklaşım ise, yan ürünlerin bertaraf edilmesi yerine hammadde olarak değerlendirilmesini ve sürdürülebilir atık yönetiminin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır (Bolan vd., 2010). Bu kapsamda, gübre döngüsel ekonomide öne çıkan en önemli kaynaklardan biridir. Doğrudan tarımsal alanlarda organik gübre olarak kullanılmasının yanı sıra, kompostlaştırma ve anaerobik çürütme (biyogaz üretimi) yöntemleriyle hem enerji üretimi hem de besin geri kazanımı sağlanabilmektedir. Anaerobik sindirim sonucu elde edilen sindirim çamuru ise özellikle fosfor geri kazanımı açısından değerli bir yan ürün niteliği taşımaktadır (Singh vd., 2018; Rahman vd., 2022; Zinina vd., 2022).

Tüý atıkları ise, yüksek keratin içeriği nedeniyle biyolojik olarak zor parçalanarak ancak önemli bir potansiyele sahip fraksiyondur. Son yıllarda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde ise, Brandelli vd. (2015) ile Moktip vd. (2025) keratinaz gibi enzimlerin kullanımıyla tüylerin protein hidrolizatlarına, yem katkılarına ve biyomalzemelere dönüştürülebileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, çeşitli çalışmalarda yumurta kabuklarının yüksek kalsiyum karbonat (CaCO_3) içerikleri sayesinde kağıt kaplama pigmentleri ile sürdürülebilir yapı ve inşaat malzemeleri gibi endüstriyel uygulamalarda hammadde olarak değerlendirilebildiği rapor edilmiştir (Yoo vd., 2009; Ngayakamo ve Onwualu, 2022).

Döngüsel ekonomi yaklaşımı ayrıca termokimyasal dönüşüm yöntemlerini piroliz, hidrotermal karbonizasyon ve yenilikçi çözücü teknolojilerini (iyonik sıvılar, derin ötektik çözücüler) de içermektedir. Bu yöntemlerde tavukçuluk atıklarından biyokömür, biyoyağ ve biyogaz gibi enerji ürünleri elde edilebilmekte, aynı zamanda toprak düzenleyici ve çevre dostu yeni materyaller geliştirilebilmektedir (Edwards ve Daniel, 1992; Zinina vd., 2022). Ayrıca literatürde Abbasi ve arkadaşlarının vurguladığı gibi, bütünsel sistemler (örneğin entegre tarım uygulamaları) sayesinde atıkları enerji, yem ve gübre kaynağına dönüştürülerek kırsal kalkınmaya da katkı sağlayabilmektedir (Abbasi vd., 2024).

Sonuç olarak, tavukçuluk endüstrisinde sürdürülebilir atık yönetimi yalnızca çevresel riskleri azaltmakla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda ekonomik değer yaratan ürünlerin geliştirilmesine de imkân tanımaktadır. Bu nedenle döngüsel ekonomi yaklaşımı, tavukçuluk atıklarının yönetiminde geleceğe yönelik en kritik stratejilerden biri olarak değerlendirilmektedir (Hemavarshini vd., 2025).

3.2. Tavukçuluk Atıklarının Sınıflandırılması

Tavukçuluk endüstrisi, yüksek üretim kapasitesi nedeniyle önemli miktarda yan ürün ve atık ortaya çıkarmaktadır. Bu atıklar ise, içerik ve fiziksel özelliklerine göre katı atıklar, sıvı atıklar ve gübre şeklinde üç ana grupta değerlendirilmektedir (Rahman vd., 2022; Zinina vd., 2022). Ayrıca her bir atık grubu, uygun şekilde değerlendirildiğinde ekonomik potansiyele sahip olmakla birlikte, kontrolsüz bırakıldığında ciddi çevresel ve sağlık sorunlarına yol açabilmektedir (Kelleher vd., 2002).

3.2.1. Katı atıklar

Katı atık grubu, tüy, yumurta kabuğu, sakatat ve ölü hayvanlardan oluşmaktadır.

- Agro-endüstriyel atık yönetimi perspektifinden bakıldığında, kanatlı işleme tesislerinin en sorunlu katı atık fraksiyonunu tüy biyokütlesi oluşturmaktadır. Toplam canlı kütleinin yaklaşık %8'ine tekabül eden kümes hayvanı tüylerinin küresel çaptaki yıllık üretim hacminin 4,7 milyon tonu aştığı rapor edilmektedir (Safaric vd., 2020). Bu tüylerin yapısal matrisini oluşturan yüksek keratin içeriği (%85–90), yoğun disülfid köprüleri (S–S), hidrofobik etkileşimler ve yüksek orandaki çapraz bağlanmalar sebebiyle kararlı ve kristalin bir morfolojiye sahiptir. Bu rekalsitrant (dirençli) moleküler organizasyon, tüylerin konvansiyonel mikrobiyal ekosistemler tarafından biyolojik olarak parçalanmasını zorlaştırmakta ve depolama sahalarında kalıcı, kümülatif bir çevresel yük ve ekotoksikolojik risk meydana getirmektedir. Bununla birlikte, son yıllarda yapılan biyoteknolojik araştırmalar, keratinaz enzimlerinin kullanımıyla tüylerin protein hidrolizatları, yem katkı maddeleri ve biyomalzemelere dönüştürülebileceğini ortaya koymuştur (Brandelli vd., 2015; Moktip vd., 2025).
- Yumurta kabukları, esas olarak kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren yapıları sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalarda değerlendirilebilen önemli bir yan ürün olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, yumurta kabuğu atıklarından elde edilen kalsiyum karbonat partiküllerinin ink-jet baskı kağıtlarında kaplama pigmenti olarak kullanılabilirdiği ve bu sayede geleneksel mineral kaynaklara alternatif oluşturduğu bildirilmektedir (Yoo vd., 2009). Bununla birlikte, yumurta kabuklarının yeşil işleme teknolojileri kullanılarak sürdürülebilir yapı ve inşaat malzemelerinde dolgu veya katkı maddesi olarak değerlendirilebildiği, böylece atıkların katma değerli

ürünlere dönüştürülmesine olanak sağladığı da rapor edilmiştir (Ngayakamo ve Onwualu, 2022).

- Sakatatlar (baş, ayak ve iç organlar), toplam işlenmemiş etli gövdenin yaklaşık %7–8'ine karşılık gelmektedir. Yüksek protein ve yağ içerikleri nedeniyle hayvansal atık geri dönüşüm tesislerinde işlenerek hayvansal un ve yağlara dönüştürülmekte ve ekonomik bir değer kazandırılmaktadır (Crawley vd., 1980; Zinina vd., 2022).
- Ölü hayvanlar, biyogüvenlik açısından en kritik katı atıklardan biridir. Uygun bertaraf edilmediklerinde zoonotik hastalıkların yayılımı için risk oluşturmaktadırlar. Bu nedenle kompostlaştırma veya rendering tesislerinde işlenmeleri önerilmektedir (Edwards ve Daniel, 1992).

3.2.2. Sıvı atıklar

Sıvı atıklar; kan, kesimhane kaynaklı atık sular ve yıkama sularından oluşmaktadır.

- Kan, canlı ağırlığın yaklaşık %3'üne karşılık gelmektedir ve yüksek protein içeriği nedeniyle biyokimyasal oksijen ihtiyacını (BOİ) büyük ölçüde artırarak atıksuların kirlilik yükünü yükseltmektedir (Crawley vd., 1980; Yordanov, 2010; Fatima vd., 2021).
- Kesimhane kaynaklı sıvı atıklar, özellikle eviserasyon, haşlama ve tüy yolma aşamalarında ortaya çıkmaktadır. Literatürdeki güncel çalışmalar ise, modern tesislerde işlenen her bir etlik piliç için ortalama 26 litre su tüketildiğini; yalnızca eviserasyon aşamasında ise 7,6 litre/etlik piliç su harcadığını bildirmektedir (Dyosile vd., 2021; Fatima vd., 2021). Ayrıca organik madde, yağ ve protein bakımından zengin olan bu suların arıtılmadan alıcı ortamlara bırakılması ise ciddi çevresel riskler oluşturmaktadır.
- Yıkama suları, yüksek mikrobiyal yükleri ve deterjan kalıntıları nedeniyle hem çevre sağlığı hem de halk sağlığı açısından tehdit oluşturmaktadır (Edwards ve Daniel, 1992; Singh vd., 2018).

3.2.3. Gübre

Gübre (litter), tavukçulukta en büyük atık grubunu oluşturmaktadır. Dışkının talaş, pirinç kabuğu veya saman gibi yataklık materyallerle karışmasıyla oluşan gübre, yüksek miktarda azot, fosfor ve potasyum içermektedir (Edwards ve Daniel, 1992; Gbotosho ve Burt, 2013). Bu nedenle tarımda organik gübre olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak kontrolsüz uygulamalar, amonyak emisyonları, sera gazı salımları ve nitrat sızıntısı gibi çevresel sorunlara yol açabilmektedir (Rahman vd., 2022). Nitekim Singh vd. (2018) yaptığı bir çalışmada, gübrenin kompostlaştırma, biyogaz üretimi ve vermikompost gibi yöntemlerle işlenmesi sayesinde hem çevresel risklerin azaltılabileceği hem de ekonomik fayda sağlanabileceği vurgulanmıştır. Çalışma kapsamında analizi gerçekleştirilen tavukçuluk atıkları, yapısal olarak farklı nitelikler sergilemekle birlikte hem yüksek bir ekonomik potansiyele barındırmakta hem de kontrol edilmediğinde ciddi çevresel riskler teşkil etmektedir; bu

doğrultuda atıkların karakterizasyonuna göre sınıflandırılması, doğru yönetim ve geri kazanım stratejilerinin belirlenmesi açısından kritik bir önem taşımaktadır. Elde edilen tüm bu teknik değerlendirmeler ve Şekil 1'de şematik gösterimi sunulan başlıca atık türlerinin sınıflandırılması, çalışmanın yürütüldüğü spesifik operasyonel koşullar, incelenen parametreler ve belirlenen metodolojik sınırlılıklar dahilinde genellenebilir niteliktedir. (Hemavarshini vd., 2025).



Şekil 1. Tavukçuluk endüstrisinde ortaya çıkan başlıca atık türlerinin şematik gösterimi (Hemavarshini vd., 2025).

3.2. Çevresel ve Sağlık Riskleri

Tavukçuluk endüstrisinde üretim süreçleri sonucunda oluşan yüksek miktardaki atıklar, doğru ve kontrollü yönetilmediği takdirde hem ekolojik denge hem de halk sağlığı üzerinde çok boyutlu ve ciddi tehditler oluşturmaktadır. Mevcut literatür ve sektörel veriler ışığında bu çevresel ve biyolojik riskler genel hatlarıyla dört ana grupta toplanmaktadır: amonyak ve sera gazı emisyonlarının tetiklediği hava kirliliği, su ve toprak matrislerinin bozulması, patojen mikroorganizmaların kontrolsüz yayılımı ve son olarak atıklarda biriken antibiyotik ile ağır metal kalıntıları (Himu ve Raihan, 2023).

3.3.1. Amonyak ve sera gazı emisyonları

Tavukçuluk atıkları, özellikle tavuk gübresinin yüksek azot içeriği nedeniyle amonyak (NH_3), diazot monoksit (N_2O) ve metan (CH_4) emisyonlarının önemli kaynaklarından biridir. Amonyak emisyonları, atmosferde asidifikasyona ve ince partikül oluşumuna yol açarak hem çevresel hem de insan sağlığı açısından olumsuz etkiler yaratmaktadır. Ayrıca amonyakın solunması; astım, bronşit ve diğer solunum yolu rahatsızlıklarını tetikleyebilmektedir (Edwards ve Daniel, 1992; Rahman vd., 2022). Öte yandan, diazot monoksit ve metan küresel ısınma potansiyeli yüksek sera gazları olup iklim değişikliğine doğrudan katkı sağlamaktadır. Tavuk gübresi kaynaklı amonyak emisyonlarının ise hava

kalitesi, ekosistemler ve çevresel sürdürülebilirlik üzerinde önemli baskı oluşturduğu; bu nedenle döngüsel ekonomi temelli atık yönetim yaklaşımlarının önerildiği bildirilmektedir (Kacorzkyk vd., 2025). Bu nedenle tavukçuluk atıklarının uygun şekilde işlenmemesi, yalnızca yerel ölçekte değil, küresel ölçekte de iklimsel riskler doğurmaktadır.

3.3.2 Su ve Toprak Kirliliği

Tavuk gübresinin kontrolsüz biçimde tarım arazilerine uygulanması, içerdiği yüksek azot (N) ve fosfor (P) nedeniyle hem su hem de toprak kalitesini olumsuz etkilemektedir. Fazla fosforun yüzeysel akış yoluyla göl ve nehirlerde birikmesi, ötrofikasyona neden olmakta; bu süreç alg patlamaları ve oksijen azalması sonucunda ekosistemlerin çökmesine yol açabilmektedir (Edwards ve Daniel, 1992; Singh vd., 2018). Yeraltı sularında görülen aşırı nitrat birikimi ise özellikle kırsal alanlarda içme suyu güvenliği açısından ciddi risk oluşturmaktadır. Nitekim nitrat kontaminasyonu, mavi bebek sendromu ve çeşitli kanser türleriyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca gübreyle birlikte toprağa taşınan yüksek miktarda organik madde, toprak mikrobiyotasını bozmakta, asidifikasyona yol açmakta ve uzun vadede tarımsal verimliliği düşürmektedir. Bu nedenle gübre ve sıvı atıkların uygun arıtma veya işleme yöntemleri olmaksızın doğrudan uygulanması, sürdürülebilir tarım açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Rahman vd., 2022).

3.3.3. Patojen mikroorganizmalar

Tavukçuluk atıkları, özellikle *Salmonella* Spp., *Campylobacter* spp. ve *Escherichia coli* gibi patojen mikroorganizmaların çevreye yayılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde ise tavuk gübresiyle kirlenmiş su ve toprakların zoonotik hastalıkların bulaşmasında kritik bir bulaşma aracı olduğunu ortaya koymaktadır (Edwards ve Daniel, 1992; Singh vd., 2018). Özellikle *Salmonella* Spp. ve *Campylobacter* kaynaklı gıda zehirlenmeleri dünya genelinde milyonlarca insanı etkilemekte ve ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu patojenler aynı zamanda sulama suları aracılığıyla tarımsal ürünlere bulaşarak gıda güvenliği zincirinde ek riskler yaratmaktadır. Sonuç olarak, hijyen standartlarının düşük olduğu bölgelerde dışkı kaynaklı kirliliğin yaygın olması halk sağlığı açısından önemli tehditler doğurmaktadır.

3.3.4. Antibiyotik ve ağır metal kalıntıları

Modern tavukçulukta antibiyotikler, büyüme destekleyici ve hastalık önleyici amaçlarla yaygın olarak yemlere katılmaktadır. Ancak bu antibiyotiklerin bir bölümü sindirilmeden dışkıyla atılmakta ve gübre aracılığıyla çevreye yayılmaktadır. Bu durum, antimikrobiyal direnç (AMR) gelişimini hızlandırmakta ve direnç genlerinin hem çevresel mikrobiyota hem de patojenlere taşınmasına zemin hazırlamaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ise, çevresel AMR'yi küresel sağlık için en kritik tehditlerden biri olarak tanımlamaktadır. Bunun yanında, tavuk yemlerinde kullanılan çinko, bakır ve arsenik gibi

ağır metaller gübre ve atıklarda birikmekte; toprakta uzun vadede toksisite oluşturarak tarımsal üretim kapasitesini düşürmekte hatta gıda zincirine taşınarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Özellikle arsenik kalıntıların içme sularına sızması, kanserojen etki potansiyeli nedeniyle ciddi bir çevresel risk oluşturmaktadır (Smedley ve Kinniburgh, 2002; Faridullah vd., 2014; Berendonk vd., 2015; Rahman vd., 2022; Anonim, 2025d). Tavukçuluk atıkları, yalnızca üretime bağlı kantitatif (miktersal) hacimleriyle değil; bileşimlerinde barındırdıkları toksik gazlar, agro-kimyasal kalıntılar, patojen mikroorganizmalar ve yoğun besin elementleri nedeniyle hem ekolojik sürdürülebilirlik hem de biyogüvenlik açısından akut tehditler barındırmaktadır. Bu heterojen ve karmaşık risk matrisi, çevre ve halk sağlığının korunmasını hedefleyen sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin ancak tüm bu parametreleri eş zamanlı olarak ele alan bütüncül ve entegre bir yaklaşımla kurgulanmasını zorunlu kılmaktadır.

3.3. Değerlendirme Yöntemleri

Tavukçuluk endüstrisinde ortaya çıkan atıkların yalnızca bertaraf edilmesi değil, aynı zamanda çevresel riskleri en aza indirecek şekilde dönüştürülerek ekonomik faydaya kazandırılması gerekmektedir. Bu bağlamda, son yıllarda döngüsel ekonomi yaklaşımı doğrultusunda geliştirilen değerlendirme yöntemleri giderek önem kazanmaktadır. Atıkların değerlendirilmesinde başlıca yöntemler arasında gübreleme ve kompostlaştırma, anaerobik çürütme (biyogaz üretimi), mikrobiyal ve enzimatik biyodönüşüm, termokimyasal yöntemler, tüylerden keratin geri kazanımı, yumurta kabuğu ve zarının farklı uygulamaları ile kan ve sakatat atıklarının işlenmesi öne çıkmaktadır (Brandelli vd., 2015; Singh vd., 2018; Rahman vd., 2022).

3.4.1. Gübreleme, kompost ve vermikompost

Tavuk gübresi, içerdiği yüksek azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) nedeniyle tarımsal gübre olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Edwards ve Daniel, 1992). Ancak gübrenin kontrolsüz ya da doğrudan tarım arazilerine uygulanması; amonyak emisyonları, sera gazı salımları, nitrat kirliliği ve patojen yayılımı gibi ciddi çevresel riskler oluşturmaktadır (Rahman vd., 2022). Bu nedenle gübrenin daha sürdürülebilir yöntemlerle işlenmesi gerekmektedir. Bu yöntemlerden biri olan kompostlaştırma, tavuk gübresinin organik maddece stabilize edilmesini ve patojen yükünün azaltılmasını sağlayarak tarımda daha güvenli bir ürün elde edilmesine imkân tanır. Kompost süreci sırasında uygun karbon/azot (C/N) oranı (25–30), sıcaklık (55–65 °C) ve pH (6,5–8,0) koşullarının sağlanması kritik öneme sahiptir (Bernal vd., 2009). Vermikompost ise solucanların biyolojik aktivitesiyle gerçekleşir ve toprakta biyoyararlanımı yüksek humus benzeri ürünlerin oluşumunu sağlar (Singh vd., 2018). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde kompost ve vermikompost uygulamalarının hem tarımsal verimliliği artırdığını hem de patojenleri baskılayarak çevresel

riskleri azalttığını göstermektedir (Rahman vd., 2022). Şekil 2’de ise tavuk gübresinin kompostlaştırma süreci şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. Tavuk gübresinin kompostlaştırma ve gübreleme süreci (Anonim, 2025e).

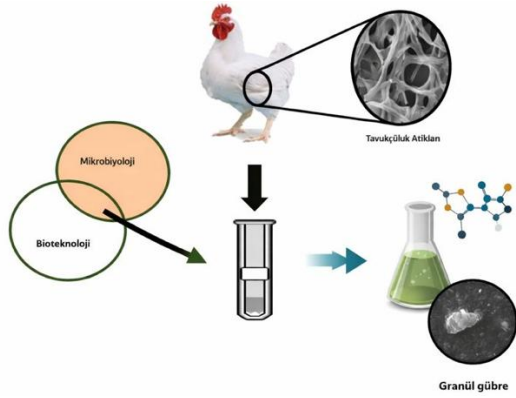
3.4.2. Anaerobik çürütme (biyogaz üretimi)

Anaerobik çürütme, özellikle gübre ve kesimhane atıklarının oksijensiz ortamda mikroorganizmalar tarafından parçalanarak biyogaz (metan ve karbondioksit karışımı) üretimini sağlayan önemli bir yöntemdir. Bu süreç yalnızca yenilenebilir enerji üretimine katkı sunmakla kalmamakta, aynı zamanda ortaya çıkan sindirim çamurunun fosfor ve organik madde bakımından zengin içeriği sayesinde tarımsal gübre olarak değerlendirilebilmesine de olanak tanımaktadır. Dahası, sindirim çamurundan çöktürme yöntemiyle fosfor geri kazanımı yapılabilmekte ve böylece hem atık yönetimine hem de döngüsel ekonomiye katkı sağlanmaktadır (Singh vd., 2018; Rahman vd., 2022). Son yıllarda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde ise Zinina vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, tavuk gübresinin biyogaz tesislerinde enerji kaynağı olarak kullanılmasının karbon ayak izini azalttığını ve tarımsal bölgelerde ekonomik fayda yarattığını ortaya koymuştur.

3.4.3. Mikrobiyal ve enzimatik biyodönüşüm

Tavukçuluk atıkları içerisinde yer alan protein açısından zengin fraksiyonlar, mikrobiyal ve enzimatik biyodönüşüm yaklaşımlarıyla katma değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir. Bu kapsamda özellikle mikroorganizmalar tarafından üretilen keratinaz, proteaz ve lipaz gibi enzimler, kompleks protein yapılarının daha basit ve kullanılabilir bileşenlere parçalanmasında önemli rol oynamaktadır (Brandelli vd., 2015). Tüyler, yüksek oranda keratin içermeleri nedeniyle biyolojik olarak zor parçalanan bir yapı sergilemekte olup, keratinaz enzimleri bu dirençli yapının hidrolizinde etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, mikrobiyal kaynaklı keratinazların tüy proteinlerini hidrolize ederek protein hidrolizatları ve peptitler elde edilmesine olanak sağladığı; bu ürünlerin başta yem katkı maddeleri olmak üzere çeşitli biyoteknolojik uygulamalarda değerlendirilebildiği bildirilmektedir (Brandelli vd., 2015; Moktip vd., 2025).

Kan ve sakatat gibi diğer protein esaslı tavukçuluk atıkları ise proteolitik enzimler kullanılarak biyolojik hidrolize tabi tutulabilmekte ve bu süreç sonucunda düşük molekül ağırlıklı protein fraksiyonları ile biyoaktif peptitler elde edilebilmektedir. Bu tür ürünlerin özellikle hayvan besleme uygulamalarında protein kaynağı olarak ve bazı endüstriyel proseslerde fonksiyonel bileşenler şeklinde kullanılabildiği ifade edilmektedir (Inamuddin ve Khan, 2021). Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından yayımlanan sektörel değerlendirmelerde de, tavukçuluk atıklarının enzimatik ve biyoteknolojik yöntemlerle değerlendirilmesinin hem atık yükünün azaltılması hem de ekonomik değer yaratılması açısından önemli bir potansiyel sunduğu vurgulanmaktadır (Anonim, 2022). Bu doğrultuda, mikrobiyal ve enzimatik biyodönüşüm yaklaşımları; tavukçuluk atıklarının çevresel bir yük olmaktan çıkarılarak döngüsel ekonomi çerçevesinde katma değerli ürünlere dönüştürülmesine olanak sağlayan sürdürülebilir teknolojiler arasında yer almaktadır. Şekil 3'te, tavukçuluk atıklarının mikrobiyal biyodönüşüme yönelik genel proses akışı şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 3. Tavukçuluk atıklarının mikrobiyal biyodönüşüm süreci (Laba vd., 2018).

3.4.4. Termokimyasal yöntemler

Piroliz ve hidrotermal karbonizasyon gibi termokimyasal dönüşüm yöntemleri, tavukçuluk atıklarının enerji üretiminde değerlendirilmesi için öne çıkan yaklaşımlar arasındadır. Bu yöntemler sayesinde tüy, gübre ve diğer organik fraksiyonlar; biyokömür (biochar), biyoyağ ve sentez gazı (syngas) gibi değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir. Biyokömür, karbonca zengin yapısı sayesinde tarımsal alanlarda toprak düzenleyici olarak kullanılmakta, toprağın su tutma kapasitesini ve besin elementleri döngüsünü iyileştirmektedir. Biyoyağ ve gaz ürünleri ise enerji sektöründe yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Zhang vd., 2023). Bu yöntemlerin en önemli avantajları arasında atık hacminin ciddi şekilde azaltılması, enerji geri kazanımının sağlanması ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesi yer almaktadır. Ancak yüksek sıcaklık ve basınç koşulları nedeniyle enerji maliyetlerinin yüksek oluşu ve yatırım altyapısı gereksinimleri, uygulamanın

yaygınlaşmasını sınırlayan en önemli faktörlerdir (Abbasi vd., 2024).

3.4.5. Tüylerden keratin geri kazanımı

Tavuk tüyleri, küresel ölçekte yılda yaklaşık 4,7 milyon ton üretim hacmine ulaşan en büyük tavukçuluk atıklarından biridir (Moktip vd., 2025). Tüylerin %85–90'ı keratin proteininden oluşmaktadır ve bu protein, yüksek oranda disülfid bağları içermesi nedeniyle biyolojik olarak parçalanması oldukça zor bir yapıya sahiptir. Bu nedenle uzun yıllar boyunca tüy atıkları çevresel açıdan ciddi sorunlar yaratmıştır. Ancak son yıllarda geliştirilen yeşil çözücü teknolojileri sayesinde keratin geri kazanımında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle subkritik su ekstraksiyonu, iyonik sıvılar ve derin ötektik çözücüler kullanılarak keratin yüksek verimle izole edilebilmekte ve bu yöntemler çevre dostu alternatifler olarak öne çıkmaktadır (Moktip vd., 2025). Elde edilen keratin, biyomedikal uygulamalarda (örneğin yara iyileştirme materyalleri, doku mühendisliği iskeleleri, kontrollü ilaç salım sistemleri) umut vadeden bir biyopolimer olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca tekstil, kozmetik ve paketlenme endüstrilerinde de keratin bazlı biyomalzemelerin kullanımına yönelik araştırmalar hız kazanmıştır.

3.4.6. Yumurta kabuğu ve zarı

Yumurta kabukları, yapılarının yaklaşık %95'ini oluşturan kalsiyum karbonat (CaCO_3) sayesinde hem tarımda hem de endüstride önemli bir hammadde potansiyeline sahiptir. Ortalama 5–6 gram ağırlığındaki kabuklar, tarımsal uygulamalarda kalsiyum kaynağı olarak doğrudan kullanılabilmekte veya yem katkısı olarak değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte, literatürde yumurta kabuklarının yalnızca tarımsal değil; aynı zamanda biyomalzeme üretiminde de önemli bir kaynak olduğu belirtilmektedir (Yüceer, 2019). Çalışmalar, yumurta kabuklarının biyoplastik, biyokompozit ve adsorban malzeme üretiminde etkin şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Yoo vd., 2009; Ngayakamo ve Onwualu, 2022). Ayrıca yumurta zarında bulunan kolajen ve proteinler, biyomedikal araştırmalarda doku mühendisliği ve rejeneratif tıp uygulamaları için potansiyel biyopolimer kaynakları olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla yumurta kabuğu ve zarı, döngüsel ekonomi kapsamında hem tarımsal hem de endüstriyel açıdan yüksek katma değer sunan ikincil ürünlerdir.

3.4.7. Kan ve sakatat atıkları

Kesimhanelerde ortaya çıkan kan ve sakatat atıkları, tavukçuluk endüstrisinin en protein açısından zengin yan ürünleri arasında yer almaktadır. Kan, canlı ağırlığın yaklaşık %3'ünü, sakatat (baş, ayak ve iç organlar) ise toplam gövdenin %7–8'ini oluşturmaktadır (Crawley vd., 1980; Zinina vd., 2022). Geleneksel olarak bu fraksiyonlar hayvansal atık geri dönüşüm tesislerinde işlenerek hayvansal un ve yağ üretiminde kullanılmaktadır. Böylece hem çevresel yük azaltılmakta hem de ekonomik fayda sağlanmaktadır. Bununla

birlikte, son yıllarda mikrobiyal enzimler yardımıyla bu atıkların biyolojik hidrolizi üzerine yapılan çalışmalar, daha yüksek katma değerli ürünlerin elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle proteolitik enzimlerle gerçekleştirilen hidroliz sonucunda protein hidrolizatları ve biyoaktif peptitler üretilmektedir; bu ürünler yem katkıları, fonksiyonel gıda bileşenleri ve hatta farmasötik uygulamalar için değerlendirilmektedir (Brandelli vd., 2015). Böylece kesimhane atıkları yalnızca bertaraf edilmesi gereken yan ürünler olmaktan çıkmakta, aynı zamanda biyoteknolojik süreçler aracılığıyla ekonomik katma değer yaratan kaynaklara dönüştürülmektedir.

Sonuç olarak, tavukçuluk endüstrisinde ortaya çıkan atıkların değerlendirilmesi yalnızca çevresel risklerin azaltılması açısından değil, aynı zamanda ekonomik katma değer yaratılması bakımından da kritik bir öneme sahiptir. Gübre, tüy, yumurta kabuğu, kan ve sakatat gibi

farklı atık fraksiyonları; kompost üretiminden biyogaz üretimine, mikrobiyal biyodönüşümden keratin geri kazanımına ve biyomalzeme geliştirmeye kadar geniş bir yelpazede değerlendirilebilmektedir. Bu yöntemler sayesinde hem sürdürülebilir atık yönetimi sağlanmakta hem de döngüsel ekonomi kapsamında enerji, gübre, yem katkıları ve biyomedikal ürünler gibi çeşitli çıktılar elde edilmektedir. Ancak her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları bulunmakta; dolayısıyla uygulanabilirlik, ekonomik maliyet, teknolojik altyapı ve çevresel etkiler birlikte değerlendirilmelidir (Anonim, 2022; Kacorzzyk vd., 2025).

Tablo 1’de ise tavukçuluk atıklarının değerlendirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler; bu yöntemlerde işlenen atık türleri, elde edilen ürünler, sağladıkları avantajlar ve karşılaşılan sınırlılıklar ile birlikte özetlenmiştir.

Tablo 1. Tavukçuluk atıklarının değerlendirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler

Yöntem	Kullanılan Atık Türleri	Ürünler/Çıktılar	Avantajlar	Sınırlılıklar / Zorluklar
Kompost	Gübre, ölü hayvanlar, sakatat	Kompost, (organik gübre)	Patojen azalması, tarımsal verim artışı, düşük maliyet	Nitrat sızıntısı riski, süreç süresi uzun
Anaerobik Çürütme (Biyogaz)	Gübre, kesimhane sıvı atıkları	Biyogaz ($CH_4 + CO_2$), sindirim çamuru	Yenilenebilir enerji, fosfor geri kazanımı	Yatırım maliyeti yüksek, proses optimizasyonu gerek
Mikrobiyal Enzimatik	/ Tüy, kan, sakatat	Protein hidrolizatları, biyoaktif peptitler	Katma değerli ürünler, yem ve gıda katkıları	Enzim üretim maliyeti, ölçeklenebilirlik
Termokimyasal (Piroliz, HTC)	Gübre, tüy, organik atıklar	Biyokömür, biyoyağ, sentez gazı	Atık hacmi azalır, enerji verimliliği artar	Yüksek enerji ihtiyacı, yatırım maliyeti
Keratin Geri Kazanımı	Tüy	Yüksek saf keratin, biyomalzemeler	Yeşil çözücülerle çevre dostu yöntemler	Teknoloji yeni, maliyetli süreçler
Yumurta Kabuğu ve Zarı	Yumurta kabuğu, zar	$CaCO_3$ gübre katkısı, biyokompozit, biyoplastik, kolajen	Çok yönlü kullanım, biyomedikal uygulamalar	Toplama ve ayrıştırma zorluğu
Kan ve Sakatat	Kan, baş, ayak, iç organlar	Hayvansal un, yağ, biyoaktif peptitler	Protein ve yağ geri kazanımı, yem sektörü katkısı	Patojen riski, işleme maliyetleri

3.4.8. Endüstriyel ölçek ve pazar potansiyeli

Tavukçuluk endüstrisinde ortaya çıkan atıkların yönetimi, yalnızca çevresel risklerin azaltılması değil, aynı zamanda ekonomik katma değer yaratılması açısından da stratejik öneme sahiptir. Dünya genelinde tavukçuluk endüstrisinden kaynaklanan yan ürünlerin miktarı her geçen yıl artarken, bu atıkların rendering tesisleri, gübre fabrikaları ve biyogaz santralleri gibi endüstriyel ölçekli işletmelerde değerlendirilmesi, döngüsel ekonomi perspektifiyle sürdürülebilir çözümler sunmaktadır (Rahman vd., 2022; Zinina vd., 2022). Bu bağlamda, tavukçuluk atıklarının işlenmesiyle elde edilen hayvansal un, organomineral gübre, biyogaz, biyometan,

biyokömür ve fonksiyonel protein ürünleri hem iç pazarda hem de küresel ölçekte önemli bir pazar potansiyeli yaratmaktadır.

Tekno-ekonomik ve sektörel projeksiyonlar incelendiğinde, agro-endüstriyel ürünlerin geri kazanım potansiyeli finansal piyasalarda da karşılık bulmaktadır. Son yıllarda gerçekleştirilen küresel piyasa analizlerine göre, rendering ürünleri pazarı, 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 23 milyar USD’lik makroekonomik bir hacme ulaşmıştır. Sürdürülebilir atık yönetimi regülasyonlarının sıkılaşması ve döngüsel ekonomi modellerinin endüstriyel tabana yayılmasıyla birlikte, söz konusu pazarın önümüzdeki projeksiyon döneminde yıllık

ortalama %3 bileşik büyüme oranı (CAGR) sergileyerek istikrarlı yükselişini sürdürmesi öngörülmektedir. Bu trend, hayvansal yan ürünlerin marjinal bir atık olmaktan çıkıp, küresel tedarik zincirinde stratejik birer hammaddeye dönüştüğünü açıkça ortaya koymaktadır (Anonim, 2025a). Benzer şekilde, biyogaz sektörü özellikle Avrupa ve Asya'da hızla büyüyen yenilenebilir enerji yatırımları arasında yer almakta; tavuk gübresinin bu alanda kullanımı enerji arz güvenliği açısından stratejik bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Abbasi vd., 2024). Türkiye'de de hem enerji üretimi hem de organomineral gübre uygulamalarında tavukçuluk atıklarının endüstriyel ölçekte değerlendirilmesi, kırsal kalkınma ve ihracat potansiyeli açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

3.4.9. Dünya ve Türkiye'de mevcut örnek uygulamalar

Dünya genelinde tavukçuluk yan ürünleri ve atıklarının endüstriyel ölçekte değerlendirilmesi; rendering (hayvansal yan ürün işleme), organomineral/organik gübre üretimi, biyogaz ve enerji geri kazanımı ile yüksek katma değerli biyo-ürünlerin (ör. keratin, peptitler, biyokömür) elde edilmesi ekseninde giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da büyük ölçekli rendering şirketleri, artan talep doğrultusunda kapasitelerini genişletmekte ve yeni yatırımlara yönelmektedir. Örneğin, dünyanın en büyük rendering firmalarından biri olan Darling Ingredients, 2023 yılında ABD'de Butterball LLC ile ortak bir rendering tesisi kurma kararı almıştır. Tesisin haftalık yaklaşık 18 milyon libre (8.165 ton) hammadde işleme kapasitesine sahip olacağı, 2024 yılında inşaatına başlanıp 2025 yılında tamamlanmasının öngörüldüğü bildirilmiştir (Anonim, 2023b). Bu tür yatırımlar, yalnızca atık yönetimi açısından değil; aynı zamanda hayvansal protein ve teknik yağ üretimi yoluyla küresel pazarda ekonomik değer yaratılması bakımından da stratejik görülmektedir.

Türkiye'de ise tavukçuluk yan ürünlerinin değerlendirilmesine yönelik endüstriyel uygulamalar, özellikle Marmara ve Batı Karadeniz hattında (Sakarya, Bolu, Düzce) yoğunlaşmıştır. Bu bölgede entegre beyaz et üreticilerinin faaliyet göstermesi, rendering tesislerinin, biyogaz santrallerinin ve kompost/organomineral gübre fabrikalarının yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Örneğin, Türkiye'nin en büyük entegre üreticilerinden biri olan Şenpiliç Gıda Sanayi A.Ş., Sakarya ve çevresinde artan üretim kapasitesiyle rendering ve gübre geri dönüşüm uygulamalarını yaygınlaştırmış; ayrıca yeni tesis modernizasyon yatırımlarıyla süreçlerini güçlendirmiştir (Anonim, 2023a, 2023c). Bu örnekler, Türkiye'de tavukçuluk atıklarının endüstriyel ölçekte değerlendirilmeye başlandığını ve söz konusu uygulamaların gerek enerji gerekse gübre üretimi yoluyla döngüsel ekonomiye katkı sağladığını göstermektedir.

3.4.10. Rendering, gübre fabrikaları ve biyogaz uygulamaları

Tavukçuluk endüstrisinde ortaya çıkan kesimhane ve gübre atıklarının endüstriyel ölçekte değerlendirilmesi üç ana uygulama alanında öne çıkmaktadır. Bu alanlar; hayvansal yan ürün işleme tesisleri (rendering tesisleri), gübre fabrikaları ve biyogaz santralleridir.

İlk olarak, rendering tesisleri kesimhane kaynaklı kan, sakatat, kemik ve yağlı dokuların yüksek sıcaklık ve basınç altında işlenerek hayvansal un ve yağlara dönüştürülmesini kapsamaktadır. Bu ürünler, özellikle yem, evcil hayvan maması ve teknik yağ endüstrileri için önemli bir hammadde arzı sağlamaktadır. Nitekim küresel ölçekte Darling Ingredients, 2022 yılında Valley Proteins'in 18 hayvansal yan ürün işleme (rendering) tesisini satın alarak kapasitesini artırmış ve düşük karbon yoğunluklu hammadde tedarikinde lider konuma gelmiştir (Anonim, 2023b). Türkiye'de ise entegre beyaz et üreticilerinden Şenpiliç Gıda Sanayi A.Ş., Kadirli Rendering Tesisini ile resmi olarak kayıtlı bir işletmeye sahiptir. Bu durum, rendering teknolojisinin ulusal ölçekte de etkin şekilde uygulandığını göstermektedir.

İkinci olarak, gübre fabrikaları, tavuk gübresinin doğrudan tarımsal kullanımına kıyasla daha kontrollü ve standardize edilmiş ürünler sunmaktadır. Bu tesislerde tavuk gübresi, kompostlaştırma veya organomineral gübre üretim hatlarında işlenmekte; böylece hem patojen yükü azaltılmakta hem de besin elementleri daha dengeli bir forma dönüştürülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, organomineral gübrelerin azot ve fosfor dengesini düzenleyerek tarımsal verimliliği artırdığını ve pazarlanabilir standart bir ürün sunduğunu ortaya koymaktadır (Singh vd., 2018). Türkiye'de ise KAYÇEV gibi tesisler, tavuk gübresini kompostlaştırarak tarımsal kullanıma sunmakta; ayrıca granül formda organomineral gübre hatlarına yaptıkları yatırımlarla hem iç pazarda hem de ihracatta rekabet avantajı sağlamaktadır.

Üçüncü olarak, biyogaz santralleri tavuk gübresi ve kesimhane sıvı atıklarını anaerobik çürütme yoluyla değerlendirerek hem enerji üretiminde hem de tarımsal gübre temininde kritik bir rol üstlenmektedir. Bu süreçte elde edilen biyogaz elektrik ve ısı üretiminde kullanılmakta, ayrıca sindirim çamuru fosfor açısından zengin bir gübre olarak değerlendirilmektedir. Türkiye'de Efeler Biyogaz, yalnızca tavuk gübresi kullanılarak 4,8 MWe kurulu güç kapasitesine ulaşmıştır. Benzer şekilde, Bolu Mudurnu ve Balıkesir BES tesisleri hem çevresel riskleri azaltmış hem de bölgesel kalkınmaya katkı sağlamıştır. Uluslararası ölçekte ise EnviTec Biogas, tavuk gübresinden biyogaz üretimini biyometan (RNG, bio-LNG) dönüşümüne entegre ederek karbon ayak izini daha da azaltmayı hedeflemektedir (Glatz vd., 2011; Anonim, 2025b, 2025c; Oyedun vd., 2025; X. Wang vd., 2025).

3.4.11. Ekonomik potansiyel ve yaşam döngüsü analizleri

Tavukçuluk atıklarının endüstriyel ölçekte değerlendirilmesi yalnızca çevresel risklerin azaltılması açısından değil, aynı zamanda ekonomik uygulanabilirlik bakımından da giderek önem kazanmaktadır. Küresel agro-endüstriyel ürün yönetimi ve biyorafineri stratejilerinin makroekonomik boyutu, finansal piyasa projeksiyonlarında net bir şekilde gözlenmektedir. Nitekim güncel tekno-ekonomik analizler, küresel rendered (eritme yöntemiyle ileri işlenmiş) ürünler pazarının 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 23,5 milyar USD değerinde bir ekonomik hacme ulaştığını göstermektedir. Sürdürülebilir protein kaynaklarına olan talebin artması ve sıfır-atık biyoekonomi politikalarının küresel ölçekte tabana yayılmasıyla birlikte, bu pazarın 2030 yılına kadar yıllık ortalama %3-4 bileşik büyüme oranı (CAGR) sergileyerek istikrarlı bir ekspansiyon (genişleme) periyoduna girmesi öngörülmektedir. Bu finansal büyüme trendi, konvansiyonel hayvansal yan ürünlerin marjinal birer kirlilik unsuru olmaktan çıkıp, endüstriyel tedarik zincirinde yüksek katma değerli ve stratejik hammaddeler haline geldiğinin somut bir göstergesidir (Anonim, 2025a). Bu büyüme, özellikle hayvansal un ve yağların yem ve evcil hayvan maması endüstrilerinde artan talebi ile desteklenmektedir. Türkiye’de ise, tavuk gübresinin biyogaz tesislerinde enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi, hem elektrik üretimi hem de karbon ayak izinin azaltılması açısından ekonomik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Zinina vd., 2022).

Ekonomik fizibiliteye ek olarak, yaşam döngüsü analizleri, farklı atık işleme yöntemlerinin çevresel etkilerini karşılaştırmak için kritik bir araçtır. Literatürde yapılan çalışmalara göre ise tavuk gübresinin açıkta depolanması veya doğrudan tarım arazilerine uygulanması, ciddi sera gazı emisyonları ve ötrofikasyon riskleri yaratmaktadır. Buna karşılık, anaerobik çürütme ve piroliz gibi teknolojiler, toplam sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmakta ve enerji geri kazanımı yoluyla çevresel fayda sağlamaktadır (Edwards ve Daniel, 1992; Abbasi vd., 2024; Kacoryk vd., 2025). Ancak yaşam döngüsü analizlerinin sonuçları; lojistik mesafe, tesis ölçeği, sistem sınırları ve ürün ikame senaryolarına oldukça duyarlıdır. Bu nedenle, tavukçuluk atıklarının yönetiminde en uygun teknolojinin seçimi, bölgesel bağlama özgü yaşam döngüsü analiz çalışmaları ile desteklenmelidir.

3.4.12. Gelecek perspektifler ve araştırma ihtiyaçları

Tavukçuluk endüstrisinden kaynaklanan atıkların yönetimi, yalnızca çevresel risklerin azaltılması açısından değil, aynı zamanda kaynak geri kazanımı ve ekonomik katma değer yaratılması bakımından da stratejik bir öneme sahiptir. Mevcut uygulamalar her ne kadar çevresel etkileri azaltmaya yönelik bazı faydalar sağlasa da, geleceğe dönük araştırmaların daha düşük maliyetli, enerji etkin ve ölçeklenebilir teknolojilerin geliştirilmesine odaklanması gerekmektedir (Singh vd., 2018; Rahman vd., 2022).

İlk olarak, biyogaz ve anaerobik çürütme süreçlerinin optimizasyonu, araştırma gündeminde önemli bir yer tutmaktadır. Tavuk gübresinin düşük karbon/azot (C/N) oranı ve yüksek amonyak içeriği, metanojenik aktiviteyi baskılamakta ve biyogaz verimini sınırlamaktadır. Bu nedenle, farklı organik atıklarla birlikte anaerobik çürütme, ön arıtma teknikleri ve pH tamponlama gibi stratejilerin saha koşullarına uyarlanmasına yönelik araştırmalar giderek artmaktadır. Ayrıca, sindirim çamurlarından çöktürme ve amonyak sıyırma yöntemleriyle besin geri kazanımı yapılabilmektedir. Ancak bu teknolojilerin enerji tüketimi ve maliyet açısından daha etkin hale getirilmesi için ileri düzey çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Zinina vd., 2022; Abbasi vd., 2024).

İkinci olarak, termokimyasal dönüşüm yöntemleri (piroliz ve hidrotermal karbonizasyon), atıkların enerjiye ve katma değerli ürünlere dönüştürülmesinde potansiyel vaat etmektedir. Ancak bu süreçlerde elde edilen ürünlerin (biyokömür, biyoyağ, sentez gazı) kalitesi, sıcaklık, basınç ve hammadde özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, özellikle biyokömürün toprakta uzun dönem etkileri (pH düzenleme, ağır metal bağlama, karbon sekestrasyonu) üzerine daha fazla saha çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Edwards ve Daniel, 1992; Zhang vd., 2023).

Üçüncü olarak, enzimatik ve mikrobiyal biyodönüşüm teknolojileri, gelecek araştırmalar için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Keratinaz, proteaz ve lipaz gibi enzimlerin kullanımıyla tüy, kan ve sakatat gibi protein açısından zengin fraksiyonlardan protein hidrolizatları ve biyoaktif peptitler üretilmekte; bu ürünler yem katkısı, biyomalzeme ve farmasötik uygulamalarda değerlendirilebilmektedir (Brandelli vd., 2015; Moktip vd., 2025). Ancak bu süreçlerin laboratuvar ölçeğinden pilot ve endüstriyel ölçeğe taşınması, enzimlerin stabilitesi, sürekli reaktör tasarımları ve ürün standardizasyonu konularında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Laba vd., 2018; Moktip vd., 2025).

Dördüncü olarak, AMR ve patojen kontrolü, küresel sağlık açısından öncelikli bir araştırma alanıdır. Tavuk gübresinden çevreye yayılan antibiyotik kalıntıları ve direnç genlerinin biyogaz, kompost ve piroliz gibi işlemler sırasında ne ölçüde parçalandığı veya dönüştüğü henüz net değildir. Bu nedenle, farklı atık işleme teknolojilerinin AMR üzerindeki etkilerinin çok merkezli ve uzun dönemli araştırmalarla incelenmesi gerekmektedir. Benzer şekilde, patojen mikroorganizmaların (*Salmonella Spp.*, *E. coli*, *Campylobacter*) çevresel dolaşımdaki kaderi ve arıtma süreçlerinin etkinliği de ayrıntılı şekilde araştırılmalıdır (Singh vd., 2018; Rahman vd., 2022; C. Wang vd., 2025).

Beşinci olarak, ekonomik fizibilite ve yaşam döngüsü analizleri (YDA), tavukçuluk atıklarının değerlendirilmesinde uygun teknolojilerin seçimi için kritik rol oynamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, tavuk gübresinin doğrudan tarıma uygulanmasının

yüksek sera gazı emisyonları ve ötrofikasyon riskleri yarattığını, buna karşılık anaerobik çürütme ve piroliz gibi teknolojilerin çevresel etkileri önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır (Zinina vd., 2022; Abbasi vd., 2024). Ancak YDA sonuçlarının lojistik mesafe, tesis ölçeği ve ürün ikame senaryolarına duyarlı olması nedeniyle, her ülke ve bölge için yerelleştirilmiş çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Son olarak, sosyo-ekonomik boyutlar ve dijitalleşme gelecek perspektifleri açısından önem arz etmektedir. Çiftlik ölçeğinde uygulamaların yaygınlaştırılması için düşük maliyetli teknolojilerin yanı sıra, kooperatif modelleri ve finansman desteklerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, biyogaz reaktörleri ve kompost yığınlarında IoT tabanlı sensör ağları ile amonyak, metan ve sıcaklık gibi parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesi, süreçlerin verimliliğini artıracak yenilikçi bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Edwards ve Daniel, 1992; Singh vd., 2018; Li vd., 2025).

Gelecek araştırmaların odak noktası; düşük emisyonlu ve enerji etkin proseslerin geliştirilmesi, ürün kalite standartlarının oluşturulması, enzimatik ve mikrobiyal platformların ölçeklenebilir hale getirilmesi ve çevresel risklerin (sera gazı, patojen, AMR) bütüncül bir yaklaşımla yönetilmesi olmalıdır. Böylece tavukçuluk atıkları, yalnızca çevresel yük oluşturan bir sorun olmaktan çıkarak, döngüsel ekonomi içinde sürdürülebilir ve yüksek katma değerli bir kaynak haline gelecektir (Singh vd., 2025).

Günümüzde tavukçuluk atıklarının yönetimi, yalnızca çevresel bir zorunluluk olmaktan çıkıp enerji, tarım ve biyoteknoloji ekseninde stratejik birer ekonomik kaynağa dönüşmüştür. Bu çalışmada tavuk gübresi ve kesimhane yan ürünlerinin uygun teknolojilerle işlendiğinde çevresel riskleri önemli ölçüde azalttığını ve eş zamanlı olarak katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebildiğini ortaya koyarak, geleneksel doğrusal "atık bertarafı" yerine döngüsel ekonomi temelli entegre sistemlerin gerekliliğini doğrulamaktadır. Elde edilen veriler, tek bir arıtma veya geri kazanım teknolojisinin tüm süreçlere çözüm sunamayacağını; aksine atık bileşimine, bölgesel dinamiklere ve ekonomik fizibiliteye göre şekillenen hibrit ve esnek sistemlerin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda; kompostlaştırma, anaerobik çürütme, biyolojik ve termokimyasal dönüşüm gibi yöntemler birbirini tamamlayıcı şekilde kurgulanmalı ve teknoloji seçimi yalnızca teknik verimliliğe göre değil; çevresel etki, lojistik altyapı ve pazar entegrasyonu gibi çok boyutlu kriterler dikkate alınarak yapılmalıdır (Muduli vd., 2019; Mozhiarasi ve Natarajan, 2022).

Geleceğe yönelik olarak, tavukçuluk atıklarının sürdürülebilir yönetiminde dört temel öncelik öne çıkmaktadır. Bunlar; (i) çevresel duyarlılığı teşvik eden politika ve mevzuat mekanizmalarının güçlendirilmesi, (ii) enzimatik biyodönüşüm, yeşil çözümler ve yaşam döngüsü analizleri gibi yenilikçi araştırma alanlarının desteklenmesi, (iii) rendering tesisleri, biyogaz

santralleri ve organomineral gübre fabrikaları gibi endüstriyel yatırımların yaygınlaştırılması ve (iv) patojenler, antibiyotik direnç genleri ve ağır metal kalıntılarının kontrolüne yönelik ileri arıtma teknolojilerinin entegrasyonudur. Buna ek olarak, dijitalleşme ve akıllı izleme sistemleri, tavukçuluk atıklarının yönetiminde yeni bir paradigma sunmaktadır. IoT tabanlı sensör ağları ve yapay zekâ destekli süreç optimizasyonu sayesinde biyogaz ve kompostlaştırma süreçlerinde operasyonel verimliliğin artırılması, çevresel risklerin erken tespiti ve sistem performansının sürekli iyileştirilmesi mümkün hâle gelmektedir. Bu yaklaşımlar, özellikle endüstriyel ölçekli uygulamalarda karar destek mekanizmalarının güçlendirilmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Tavukçuluk atıklarının sürdürülebilir yönetimi; çevresel koruma, enerji üretimi ve ekonomik katma değer yaratımı arasında denge kuran çok boyutlu bir dönüşüm alanı olarak değerlendirilmelidir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, düşük emisyonlu, enerji etkin ve ölçeklenebilir teknolojilerin geliştirilmesine odaklanması; sektör, akademi ve politika yapımcılar arasındaki iş birliğinin güçlendirilmesiyle bütüncül ve sürdürülebilir bir atık yönetim sisteminin hayata geçirilmesi, döngüsel ekonomiye geçiş sürecinde kritik bir rol oynayacaktır.

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, tavuk gübresi ve kesimhane yan ürünlerinin uygun geri kazanım teknolojileriyle işlendiğinde çevresel risklerin önemli ölçüde azaltılabileceğini ve bu atıkların katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ele alınan analitik ve teknik veriler, doğrusal bir "atık bertarafı" yaklaşımı yerine, döngüsel ekonomi temelli entegre sistemlerin uygulanabilirliğine işaret etmektedir. Çalışmada incelenen gübreleme, kompostlaştırma, anaerobik çürütme, biyolojik ve termokimyasal dönüşüm yöntemlerinin performans çıktıları, tek bir teknolojinin tüm atık bileşenlerine çözüm sunamayacağını; aksine atık kompozisyonuna ve teknik verimliliğe bağlı hibrit sistemlerin ön plana çıktığını göstermektedir. Bu doğrultuda, çalışmanın sunduğu teknolojik çıkarımların ve hibrit sistem optimizasyonlarının, benzer bölgesel özelliklere ve benzer kimyasal/fiziksel atık bileşimine sahip endüstriyel ölçekteki tavukçuluk işletmeleri için ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir atık yönetim modeli oluşturmada rehberlik edebileceği belirlenmiştir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	M.Y.	E.I.
K	90	10
T	80	20
Y	90	10
VTI	70	30
VAY	80	20
KT	70	30
YZ	70	30
KI	70	30
GR	90	10

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- Abbasi, I. A., Shamim, A., Shad, M. K., Ashari, H., & Yusuf, I. (2024). Circular economy-based integrated farming system for indigenous chicken: Fostering food security and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 436, Article 140368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140368>
- Anonim, (2022). *FAO Animal Production and Health - Annual Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Anonim, (2023a). *Türkiye beyaz et sektörü raporu*. Beyaz Et Sanayicileri ve Damızlıkçıları Birliği Derneği (BESD-BİR). <https://hsgm.saglik.gov.tr/media/attachments/2025/08/06/ulusal-beslenme-konseyi-beyaz-et---tavuk-bilim-komisyonu-raporu.pdf>
- Anonim, (2023b). *Darling Ingredients announces agreement with Butterball, LLC to explore new greenfield poultry rendering plant in Mt. Olive, North Carolina*. Darling Ingredients Inc. <https://www.prnewswire.com/news-releases/darling-ingredients-announces-agreement-with-butterball-llc-to-explore-new-greenfield-poultry-rendering-plant-in-mt-olive-north-carolina-301840504.html>
- Anonim, (2023c). *Sürdürülebilirlik ve çevre yönetimi uygulamaları*. Şenpiliç Gıda Sanayi A.Ş. <https://www.senpili.com.tr/surdurulebilirlik>
- Anonim, (2024). *Kümes hayvancılığı üretimi*. TÜİK Veri Portalı. <https://veriportalı.tuik.gov.tr/tr/press/53951>
- Anonim, (2025a). *Rendered products market size, share & demand report: Forecast 2025–2030*. Deep Market Insights. <https://deepmarketinsights.com/report/rendered-products-market-research-report>
- Anonim, (2025b). *Firma web sitesi*. Efeler Biyogaz Elektrik Üretim A.Ş. <https://www.efelerbiyogaz.com>
- Anonim, (2025c). *Company reports and sustainability strategy*. EnviTec Biogas AG. <https://www.envitec-biogas.com/>
- Anonim, (2025d). *Top 5 inquiries of fertilizer manufacturing in Indonesia*. Fertilizer Business Plan. <https://www.fertilizerbusinessplan.com/2025/03/27/top-5-inquiries-of-fertilizer-manufacturing-in-indonesia/#>

- Anonim, (2025e). *Global antibiotic resistance surveillance report 2025*. WHO Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS), World Health Organization.
- Berendonk, T. U., Manaia, C. M., Merlin, C., Fatta-Kassinos, D., Cytryn, E., Walsh, F., Burgmann, H., Sorum, H., Norstrom, M., Pons, M. N., Kreuzinger, N., Huovinen, P., Stefani, S., Schwartz, T., Kisand, V., Baquero, F., & Martinez, J. L. (2015). Tackling antibiotic resistance: The environmental framework. *Nature Reviews Microbiology*, 13(5), 310–317. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3439>
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Bolan, N. S., Szogi, A. A., Chuasavathi, T., Seshadri, B., Rothrock, M. J., & Panneerselvam, P. (2010). Uses and management of poultry litter. *World's Poultry Science Journal*, 66(4), 673–698. <https://doi.org/10.1017/s0043933910000656>
- Brandelli, A., Sala, L., & Kalil, S. J. (2015). Microbial enzymes for bioconversion of poultry waste into added-value products. *Food Research International*, 73, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.015>
- Crawley, S. W., Sloan, D. R., & Hale, K. K. (1980). Yields and composition of edible and inedible by-products of broilers processed at 6, 7, and 8 weeks of age. *Poultry Science*, 59(10), 2243–2246. <https://doi.org/10.3382/ps.0592243>
- Dalkılıç, K., & Uğurlu, A. (2013). Tavuk gübresinden biyogaz üretimi. *Tavukçuluk Araştırma Dergisi*, 10, 14–19.
- Dyosile, P. A., Mdladla, C., Njoya, M., Basitere, M., Ntwampe, S. K. O., & Kaskote, E. (2021). Assessment of an integrated and sustainable multistage system for the treatment of poultry slaughterhouse wastewater. *Membranes*, 11(8), Article 582. <https://doi.org/10.3390/membranes11080582>
- Edwards, D. R., & Daniel, T. C. (1992). Environmental impacts of on-farm poultry waste - A review. *Bioresource Technology*, 41(9), 9–33.
- Faridullah, Pervaiz, A., Irshad, M., Alam, A., Mahmood, Q., & M., A. (2014). Trace elements characterization in fresh and composted livestock manures. *Austin Journal of Hydrology*, 1(1), Article 6.
- Fatima, F., Du, H., & Kommalapati, R. R. (2021). Treatment of poultry slaughterhouse wastewater with membrane technologies: A review. *Water*, 13(14), Article 1905. <https://doi.org/10.3390/w13141905>
- Gbotosho, O., & Burt, P. J. A. (2013). Environmental and health impacts of poultry manure disposal methods: A case study of Lagelu and Egbeda local government areas in Oyo State, Nigeria. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 11(1), 38–51. <https://doi.org/10.1080/14735903.2012.700100>
- Ghaffari-Bohlouli, P., Jafari, H., Taebnia, N., Abedi, A., Amirsadeghi, A., Niknezhad, S. V., Alimoradi, H., Jafarzadeh, S., Mirzaei, M., Nie, L., Zhang, J., Varma, R. S., & Shavandi, A. (2023). Protein by-products: Composition, extraction, and biomedical applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(28), 9436–9481. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2067829>
- Glatz, P., Miao, Z., & Rodda, B. (2011). Handling and treatment of poultry hatchery waste: A review. *Sustainability*, 3(1), 216–237. <https://doi.org/10.3390/su3010216>
- Hemavarshini, M. P., Thiyareshwari, S., Selvi, D., Anandham, R., Thirunavukkarasu, M., Sivasubramanian, K., & Jegadeeswari, D. (2025). Sustainable management of chicken waste: Exploring conversion technologies for environmental benefits.

- Frontiers in Bioscience (Elite Edition)*, 17(2), Article 25930. <https://doi.org/10.31083/FBE25930>
- Himu, H. A., & Raihan, A. (2023). A review of the effects of intensive poultry production on the environment and human health. *International Journal of Veterinary Research*, 3(2), 55–106.
- Inamuddin, & Khan, A. (2021). *Sustainable bioconversion of waste to value added products*. Springer.
- Kacorzyk, P., Strojny, J., Niewiadomski, M., Supel, P., Kaszycki, P., Brishty, I.-E. A., Józefowska, A., Wrześniewska-Tosik, K., Kowalewski, T., Pałczyńska, M., & Walisiak, D. (2025). The circular economy approach to dealing with burdensome waste from poultry industry. *Sustainability*, 17(13), Article 5997. <https://doi.org/10.3390/su17135997>
- Karuppannan, S. K., Dowlath, M. J. H., Raiyaan, G. I. D., Rajadesingu, S., & Arunachalam, K. D. (2021). Application of poultry industry waste in producing value-added products—A review. In C. M. Hussain (Ed.), *Concepts of advanced zero waste tools* (pp. 91–121). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822183-9.00005-2>
- Kelleher, B. P., Leahy, J. J., Henihan, A. M., O'Dwyer, T. F., Sutton, D., & Leahy, M. J. (2002). Advances in poultry litter disposal technology a review. *Bioresource Technology*, 83, 27–36.
- Konkol, I., Świerczek, L., & Cenian, A. (2023). Chicken manure pretreatment for enhancing biogas and methane production. *Energies*, 16(14), Article 5442. <https://doi.org/10.3390/en16145442>
- Laba, W., Zarowska, B., Chorazyk, D., Pudlo, A., Piegza, M., Kancelista, A., & Kopec, W. (2018). New keratinolytic bacteria in valorization of chicken feather waste. *AMB Express*, 8(1), Article 9. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0538-y>
- Li, A., Pandey, A., & Pandey, P. (2025). Application of IoT in monitoring greenhouse gas emissions in anaerobic reactors. *Energies*, 18(23), Article 6191. <https://doi.org/10.3390/en18236191>
- Moktip, T., Salaipeth, L., Cope, A. E., Taherzadeh, M. J., Watanabe, T., & Phitsuwan, P. (2025). Current understanding of feather keratin and keratinase and their applications in biotechnology. *Biochemistry Research International*, 2025, Article 6619273. <https://doi.org/10.1155/bri/6619273>
- Mottet, A., & Tempio, G. (2017). Global poultry production: Current state and future outlook and challenges. *World's Poultry Science Journal*, 73(2), 245–256. <https://doi.org/10.1017/s0043933917000071>
- Mozhiarasi, V., & Natarajan, T. S. (2022). Slaughterhouse and poultry wastes: Management practices, feedstocks for renewable energy production, and recovery of value added products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–24. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02352-0>
- Muduli, S., Champati, A., Popalghat, H. K., Patel, P., & Sneha, K. (2019). Poultry waste management: An approach for sustainable development. *International Journal of Advanced Scientific Research*, 4(1), 8–14.
- Ngayakamo, B., & Onwualu, A. P. (2022). Recent advances in green processing technologies for valorisation of eggshell waste for sustainable construction materials. *Heliyon*, 8(6), Article e09649. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09649>
- Okur, N., & Eratarlar, S. A. (2019). Litter materials in poultry industry. *Uluslararası Anadolu Ziraat Mühendisliği Bilimleri Dergisi*, 1(1), 24–29. <https://dergipark.org.tr/pub/uazimder/article/561060>
- Oyedun, A. O., Salami, H. A., Odewole, M. M., Lawal, L. O., Akpenpuun, T. D., & Adebayo, H. O. (2025). A review of emerging trends in circular manure management and the role of digital solutions. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 24(4). <https://doi.org/10.1007/s44447-025-00029-4>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Raclavská, H., Růžicková, J., Švédová, B., Kucbel, M., Šafář, M., Raclavský, K., & Abel, E. L. D. S. (2022). Biodegradable waste streams. In *Biodegradable waste management in the circular economy* (pp. 69–153). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119679523.ch5>
- Rahman, M. M., Hassan, A., Hossain, I., Jahangir, M. M. R., Chowdhury, E. H., & Parvin, R. (2022). Current state of poultry waste management practices in Bangladesh, environmental concerns, and future recommendations. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 9(3), 490–500. <https://doi.org/10.5455/javar.2022.i618>
- Safaric, R., Fras Zemljic, L., Novak, M., Dugonik, B., Bratina, B., Gubelj, N., Bolka, S., & Strnad, S. (2020). Preparation and characterisation of waste poultry feathers composite fibreboards. *Materials*, 13(21), Article 4964. <https://doi.org/10.3390/ma13214964>
- Singh, N. K., Chandrakar, P., Taye, T., Singh, I. P., Singh, V. P., Bara, S., & Vithalrao, U. S. (2025). Environmental impact and mitigation approaches in livestock production systems: A review. *Archives of Current Research International*, 25(8), 351–364.
- Singh, P., Mondal, T., Sharma, R., Mahalakshmi, N., & Gupta, M. (2018). Poultry waste management. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(8), 701–712. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.708.077>
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Tawfik, A., Eraky, M., Osman, A. I., Ai, P., Zhou, Z., Meng, F., & Rooney, D. W. (2023). Bioenergy production from chicken manure: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(5), 2707–2727. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01618-x>
- Wang, C., Yin, X., Xu, X., Wang, D., Wang, Y., & Zhang, T. (2025). Antibiotic resistance genes in anaerobic digestion: Unresolved challenges and potential solutions. *Bioresource Technology*, 419, Article 132075. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132075>
- Wang, X., Wang, J., Duan, C., Wang, X., & Liang, D. (2025). Systematic review on the life cycle assessment of manure-based anaerobic digestion system. *Sustainability*, 17(19), Article 8926. <https://doi.org/10.3390/su17198926>
- Yenilmez, F. (2015). Tavukçuluk atıklarından biyogaz üretimi. *Fırat Üniversitesi Sağlık Bilimleri Veteriner Dergisi*, 29(3), 205–212. https://veteriner.fusabil.org/pdf/pdf_FUSABIL_1063.pdf
- Yoo, S., Hsieh, J. S., Zou, P., & Kokoszka, J. (2009). Utilization of calcium carbonate particles from eggshell waste as coating pigments for ink-jet printing paper. *Bioresource Technology*, 100(24), 6416–6421. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.112>
- Yordanov, D. (2010). Preliminary study of the efficiency of ultrafiltration treatment of poultry slaughterhouse

- wastewater. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 16(6), 700–704.
- Yüceer, M. (2019). *Yumurta ve yumurta ürünleri işleme teknolojisi ve uygulamaları*. Sidas Medya A.Ş.
- Yüceer, M. (2021). Çöpten gelen katma değer - Yumurta kabuğu zarı. *Yumurta Üreticileri Merkez Birliği Dergisi*, 55, 42–45.
- Zhang, L., Ren, J., & Bai, W. (2023). A review of poultry waste-to-wealth: Technological progress, modeling and simulation studies, and economic- environmental and social sustainability. *Sustainability*, 15(7), Article 5620. <https://doi.org/10.3390/su15075620>
- Zinina, O., Merenkova, S., & Rebezov, M. (2022). Analysis of modern approaches to the processing of poultry waste and by-products: Prospects for use in industrial sectors. *Food Science and Technology*, 42, Article e03222. <https://doi.org/10.1590/fst.03222>