



Evaluation of Agricultural Wastes in Terms of Environmental Sustainability

Alper Erdem YILMAZ¹ 

¹Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye



Çevresel Sürdürülebilirlik Açısından Tarımsal Atıkların Değerlendirilmesi

ABSTRACT

The agricultural production process is vital for providing food and raw materials; however, it generates significant amounts of waste from an environmental perspective. Various types of agricultural wastes, such as post-harvest plant residues, animal manure, processing by-products, and agricultural packaging materials, can adversely affect soil, water, and air quality and contribute to greenhouse gas emissions when managed by traditional methods. Nevertheless, when these wastes are valorized using appropriate technologies, they can be transformed into valuable resources that help reduce environmental harm and increase economic added value. In this context, the aim of this study is to demonstrate how agricultural wastes can be sustainably managed in line with environmental sustainability principles. In the study, the main agricultural waste types defined in the literature were examined; the potential of these wastes to be evaluated by methods such as composting, biogas production by anaerobic digestion and conversion into new generation products such as biochar production by pyrolysis were analyzed. Additionally, the relationships between waste management and environmental, economic, and social sustainability are evaluated through best practice examples from different countries. The results indicate that agricultural waste should not be viewed merely as a disposal burden but rather as a strategic resource within the framework of circular economy principles. It is emphasized that with policy support, farmer education, and appropriate technological infrastructure, this transformation can significantly contribute to both rural development and global environmental goals.

Keywords: Agricultural waste, sustainability, recovery, composting, biogas

Öz

Tarımsal üretim süreci, gıda ve ham madde sağlama açısından yaşamsal öneme sahip olmakla birlikte, çevresel açıdan önemli miktarda atık üretmektedir. Hasat sonrası bitkisel artıklar, hayvansal dışkılar, işleme yan ürünleri ve tarımsal ambalaj atıkları gibi farklı türlerdeki tarımsal atıklar, geleneksel yöntemlerle yönetildiğinde toprak, su ve hava kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmakta, ayrıca sera gazı emisyonlarına katkıda bulunmaktadır. Ancak bu atıklar, uygun teknolojilerle değerlendirildiğinde hem çevresel zararların azaltılmasına hem de ekonomik katma değerin artırılmasına katkı sağlayabilecek nitelikli kaynaklara dönüşebilir. Bu bağlamda çalışmanın amacı, tarımsal atıkların çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda nasıl değerlendirilebileceğini ortaya koymaktır. Çalışmada, literatürde tanımlanmış başlıca tarımsal atık türleri incelenmiş; bu atıkların kompostlama, anaerobik çürütme ile biyogaz üretimi ve piroliz yoluyla biyokömür eldesi gibi yeni nesil ürünlere dönüştürülmesi gibi yöntemlerle değerlendirilme potansiyelleri analiz edilmiştir. Ayrıca farklı ülkelerde uygulanan iyi örnekler üzerinden, atık yönetimi ile çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tarımsal atıkların yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir yük değil, döngüsel ekonomi prensipleri çerçevesinde stratejik bir kaynak olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Politika desteği, çiftçi eğitimi ve uygun teknolojik altyapı ile bu dönüşümün hem kırsal kalkınmaya hem de küresel çevre hedeflerine önemli katkılar sağlayabileceği vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tarımsal atık, sürdürülebilirlik, geri kazanım, kompost, biyogaz

Geliş Tarihi/Received 20.05.2025
Revizyon Talebi/Revision 03.06.2025
Requested 17.06.2025
Son Revizyon/Last Revision 19.06.2025
Kabul Tarihi/Accepted 19.06.2025
Yayın Tarihi/Publication Date 30.06.2025

Sorumlu Yazar/Corresponding author: Alper Erdem YILMAZ

E-mail: saltunbas@akdeniz.edu.tr

Cite this article: Yılmaz, A.E. (2025).

Evaluation of Agricultural Wastes in Terms of Environmental Sustainability. *Journal of Ecological Harmony*, 1(1), 32-39.



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License.

Giriş

Küresel ölçekte artan nüfus, kentleşme ve gıda talebi, tarımsal üretimin hacmini ve çeşitliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Bu artış beraberinde büyük miktarda tarımsal atığın oluşumunu da getirmektedir. Tarımsal faaliyetler sonucu ortaya çıkan atıklar; hasat sonrası bitkisel kalıntılar, hayvansal dışkılar, işleme yan ürünleri ve tarımsal ambalaj atıkları gibi farklı kategorilerde sınıflandırılmaktadır (Bhupendra vd., 2022). Geleneksel uygulamalarda bu atıkların çoğu ya yakılmakta ya da çevreye kontrolsüz şekilde bırakılmakta; bu durum toprak ve su kirliliği ile sera gazı salımlarına neden olmakta, aynı zamanda biyolojik çeşitliliği tehdit etmektedir (FAO, 2019; UNEP, 2020).

Tarım kaynaklı atıkların çevresel etkileri yalnızca yerel düzeyde değil, küresel çevre sorunları bağlamında da ele alınmalıdır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde tarımsal atıkların etkin bir şekilde yönetilememesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin önünde önemli bir engel teşkil etmektedir (UNEP, 2020). Bununla birlikte, tarımsal atıklar uygun teknolojilerle değerlendirildiğinde, döngüsel ekonomiye katkı sağlayan değerli kaynaklara dönüşebilmektedir. Kompostlama, anaerobik çürütme, piroliz ve biyoplastik üretimi gibi yöntemlerle bu atıklardan enerji, gübre, toprak düzenleyici ve endüstriyel hammadde üretimi mümkün hale gelmiştir (Mohan vd., 2014; Paritosh vd., 2017).

Son yıllarda tarımsal atıkların değerlendirilmesine yönelik politikalar, özellikle Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA'lar) doğrultusunda yeniden şekillenmektedir. Söz konusu belgeler, atık yönetimini sürdürülebilir üretim ve tüketim modellerinin temel bir bileşeni olarak ele almakta; atıkların kaynağında azaltılması, geri dönüştürülmesi ve enerjiye dönüştürülmesini teşvik etmektedir. Bu çerçevede, tarımsal atıkların yönetimi yalnızca çevresel sorunların önlenmesi açısından değil, aynı zamanda enerji güvenliği, toprak sağlığı ve kırsal kalkınma açısından da çok boyutlu faydalar sağlamaktadır (Wael vd., 2019; Awasthi vd., 2014).

Bu çalışma, tarımsal atıkların çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden değerlendirilmesini amaçlamakta; farklı atık türlerinin çevreye etkileri, geri kazanım teknolojileri ve başarılı uygulama örnekleri üzerinden bütüncül bir analiz sunmaktadır.

Yöntem

Bu çalışma, nitel bir araştırma yaklaşımı temelinde

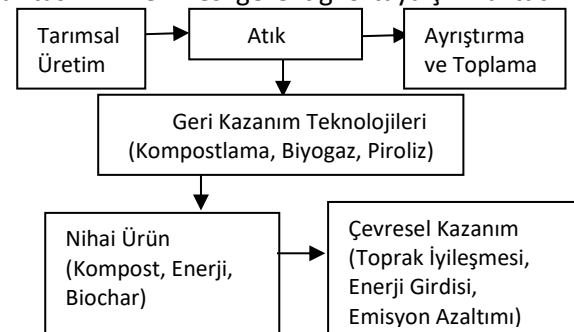
yürütülmüş olup, tarımsal atıkların çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesini amaçlayan sistematik bir literatür taraması ve karşılaştırmalı analiz yöntemine dayanmaktadır. Çalışmada, tarımsal atık türlerinin sınıflandırılması, bu atıkların çevresel etkileri ve değerlendirme teknolojileri üzerine uluslararası düzeyde yayımlanmış bilimsel makaleler, raporlar ve politika belgeleri incelenmiştir.

Araştırma kapsamında, Scopus, Web of Science, Science Direct ve Google Scholar gibi akademik veri tabanlarında 2000–2024 yılları arasında yayımlanmış 60'tan fazla bilimsel çalışma taranmış; bunlardan çevresel sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi, atık yönetimi ve tarımsal biyoteknoloji konularında kapsamlı veri sunan 30 çalışma detaylı analize tabi tutulmuştur. Ayrıca FAO, UNEP ve Avrupa Komisyonu gibi kuruluşların yayımladığı raporlar, politika belgeleri ve kılavuzlar da ikincil veri kaynakları olarak kullanılmıştır (FAO, 2019; UNEP, 2020; European Commission, 2020).

Veri analizi sürecinde, nitel içerik analizi yöntemi uygulanmış; belirlenen literatür belgelerinde “atık türleri”, “geri kazanım teknolojileri”, “çevresel etkiler” ve “iyi uygulama örnekleri” gibi ana temalar etrafında kodlama yapılmıştır. Ayrıca değerlendirme teknolojilerinin çevresel faydaları ve sürdürülebilirlik göstergeleri (sera gazı azaltımı, toprak kalitesi iyileştirmesi, enerji üretimi vb.) açısından karşılaştırılması için tematik tablo yöntemi kullanılmıştır (Awasthi vd., 2016; Wael vd., 2019).

Çalışma kapsamında ele alınan başlıca değerlendirme yöntemleri; kompostlama, anaerobik çürütme ile biyogaz üretimi, pirolizle biyokömür üretimi ve biyoplastik eldesi gibi çevre dostu teknolojilerdir. Bu teknolojilerin her biri, literatürde raporlanmış çevresel kazanımları temel alınarak yaşam döngüsü perspektifinden incelenmiştir (Zhu vd., 2004; Mohan vd., 2014). Ayrıca bazı ülkelerde uygulanan başarılı yerel projeler üzerinden karşılaştırmalı analiz yapılmış ve politika önerileri geliştirilmiştir.

Tarım sektöründen kaynaklı atıkların çevresel sürdürülebilirlik temelinde ele alınması için aşağıdaki yol haritasının izlenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.

Tarımsal atık yönetimi süreci ve çevresel kazanımlar

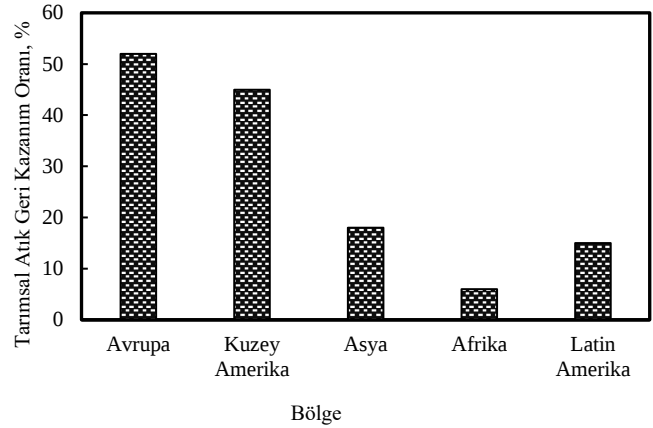
Bulgular

Literatür analizleri sonucunda tarımsal atıkların çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir kaynak potansiyeline sahip olduğu, ancak bu potansiyelin büyük ölçüde yeterince değerlendirilemediği belirlenmiştir. İncelenen çalışmalarda tarımsal atıklar; bitkisel atıklar (saman, sap, kabuk, yaprak), hayvansal atıklar (gübre ve dışkı), gıda işleme atıkları ve tarımsal ambalaj atıkları olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılmıştır (Bhupendra vd., 2022; FAO, 2019).

Tarımsal Atıkların Miktarı ve Yönetim Biçimi

Tarımsal üretim süreci, hem bitkisel hem de hayvansal kaynaklı yüksek miktarda atık üretmektedir. Bu atıklar, tarla artıkları (sap, saman, mısır koçanı, yapraklar), hayvan gübresi, işleme yan ürünleri (meyve-sebze posaları, kabuklar) ve ambalaj atıkları gibi çeşitli kategorilere ayrılmaktadır (Paritosh vd., 2017). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO, 2019) verilerine göre, dünya genelinde yılda yaklaşık 4.6 milyar ton tarımsal atık oluşmakta, ancak bu miktarın yalnızca %13'ü geri dönüştürülmekte veya yeniden değerlendirilmektedir. Geri kalan büyük kısmı ya açıkta bırakılmakta ya da yakma ve gömme gibi geleneksel yöntemlerle bertaraf edilmektedir (UNEP, 2020).

Geri kazanım oranları ülkeler arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Gelişmiş ülkelerde bu oran ortalama %30 civarındayken, düşük ve orta gelirli ülkelerde %5'in altına kadar düşmektedir (European Commission, 2020). Bu durum, teknolojik altyapı eksikliği, finansal yetersizlikler ve politika düzeyinde uygulama boşluklarıyla ilişkilidir (Bhupendra vd., 2022). Özellikle Güney Asya, Sahra Altı Afrika ve bazı Latin Amerika ülkelerinde tarımsal atıkların doğrudan yakılması yaygın bir uygulamadır. Bu uygulama, yalnızca değerli organik maddelerin kaybına yol açmakla kalmamakta, aynı zamanda önemli ölçüde sera gazı (GHG) salımına neden olmaktadır. Yapılan bir çalışmada, bu tür uygulamaların atmosfere yüksek miktarda karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) saldırdığı, bunun da iklim değişikliği üzerindeki etkileri artırdığı rapor edilmiştir. Şekil 2'de dünya genelinde farklı bölgelerde tarımsal atıkların geri kazanım oranları görülmektedir (Wael et al. 2019).



Şekil 2.

Dünya genelinde tarımsal atık geri kazanım oranları

Ayrıca, kontrolsüz biçimde doğaya bırakılan organik atıklar su ve toprak kirliliğine neden olmakta, patojenlerin yayılmasını kolaylaştırmakta ve ekosistem sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle, atıkların uygun biçimde toplanması, sınıflandırılması ve çevre dostu yöntemlerle işlenmesi hem çevresel sürdürülebilirlik açısından hem de kaynakların döngüsel ekonomiye kazandırılması açısından kritik öneme sahiptir (Awasthi vd., 2014).

Sonuç olarak, tarımsal atık yönetimi konusunda küresel düzeyde ciddi bir verimlilik açığı bulunmaktadır. Geri kazanım teknolojilerine erişim, çiftçilere yönelik farkındalık kampanyaları ve ulusal atık politikalarının entegrasyonu gibi çok boyutlu stratejiler geliştirilmeden bu sorunun çözülmesi mümkün görünmemektedir.

Kompostlama ve Toprak Verimliliği

Kompostlama, tarımsal atıkların sürdürülebilir yönetiminde hem ekonomik hem de çevresel açıdan en yaygın ve etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bitkisel ve hayvansal kaynaklı organik atıkların aerobik koşullarda mikrobiyal ayrışma süreçleriyle stabilize edilmesi yoluyla elde edilen kompost, toprak yapısını iyileştiren ve biyolojik aktiviteyi artıran yüksek organik madde içerikli bir toprak düzenleyici olarak kullanılmaktadır (Bernal vd., 2009). Kompostun tarım topraklarına uygulanması, hem makro hem de mikro besin maddelerinin geri kazanımını sağlar; toprağın su tutma kapasitesini ve havalanmasını iyileştirerek uzun vadeli verimlilik artışı yaratır (Awasthi vd., 2014; Mohan vd., 2014).

Awasthi ve vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, domuz gübresi ve mısır saplarının birlikte kompostlanması sonucunda elde edilen kompostun toprağın organik karbon içeriğini ve toplam azot düzeyini

önemli oranında artırdığı rapor edilmiştir. Bu artış, özellikle organik maddece fakir ve yoğun işlenmiş tarım alanlarında önemli bir toprak iyileştirici etki yaratmaktadır. Benzer şekilde, Zhu vd. (2004) tarafından yapılan bir saha çalışmasında, kompostlanmış hayvan gübresi uygulamasının tahıl mahsullerinin veriminde %10 ila %15 arasında bir artış sağladığı, bu etkinin özellikle uzun dönemli uygulamalarda daha belirgin hale geldiği vurgulanmıştır.

Kompostun mikrobiyal içerik açısından zengin olması, toprak biyotasını destekleyerek bitki gelişimi üzerinde dolaylı olumlu etkiler oluşturmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, kompost uygulamasının toprakta nitrifikasyon ve fosfat çözünürlüğünü artıran mikrobiyal aktiviteleri güçlendirdiğini göstermektedir (Wael vd., 2019). Ayrıca, kompostun düzenli uygulanması erozyon riskini azaltmakta, toprağın pH dengesini korumakta ve tarımsal sürdürülebilirliği uzun vadeli olarak desteklemektedir (Bernal vd., 2009).

Öte yandan, kompostlama süreci uygun yönetilmediğinde kötü koku, patojen riski ve sera gazı salımı gibi çevresel riskler de oluşturabilir. Bu nedenle, kompost üretiminde karbon/azot (C/N) oranı, nem, sıcaklık ve havalandırma gibi parametrelerin bilimsel esaslara göre kontrol edilmesi gerekmektedir (Paritosh vd., 2017). Ayrıca, kompost kalitesinin standardize edilmesi ve tarım sektörüne güvenilir ürünlerin sunulması amacıyla mevzuatsal düzenlemeler ve teşvik edici politikalar geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, kompostlama, tarımsal atıkların toprak verimliliğini artıran bir araç olarak değerlendirilmesinde önemli bir strateji olup, hem çevresel hem de ekonomik kazanımlar sunan düşük maliyetli ve uygulanabilir bir yöntemdir. Ancak bu potansiyelin gerçekleştirilmesi, teknik altyapı, çiftçi eğitimi ve mevzuat desteği ile mümkün olabilmektedir.

Biyogaz Üretimi ve Enerji Potansiyeli

Hayvansal atıkların anaerobik çürütme yöntemiyle biyogaz üretiminde kullanımı, tarımsal atıkların hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji verimliliği açısından değerlendirilmesinde en stratejik yaklaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Anaerobik çürütme, organik materyalin oksijensiz ortamda mikrobiyal ayrışmaya uğramasıyla başta metan (CH₄) ve karbondioksit (CO₂) olmak üzere çeşitli biyogaz bileşenlerinin açığa çıkmasına olanak tanır. Elde edilen biyogaz, elektrik ve ısı enerjisi üretiminde doğrudan kullanılabilirken, kalan sindirim artıkları da tarımda organik gübre olarak değerlendirilebilir (Mata-Alvarez vd., 2014).

Zhao vd., (2018) tarafından yapılan çalışmada, Çin'in 2018 yılındaki tarımsal atık üretimi 4 milyar tonu aştı; bunun yaklaşık %20'sini bitkisel saman, %70'ini ise hayvan gübresi oluşturmaktadır. Bu değerler, özellikle enerjiye erişimin kısıtlı olduğu kırsal alanlar için önemli bir alternatif enerji kaynağına işaret etmektedir. Biyogaz sistemlerinin aynı zamanda organik atıkların hijyenik bertarafını sağladığı, kötü koku oluşumunu önlediği ve zararlı mikroorganizmaların inaktivasyonuna katkıda bulunduğu da vurgulanmaktadır (Weiland, 2010).

Paritosh vd. (2017), biyogaz sistemlerinin sera gazı salımını konvansiyonel hayvan gübresi yönetimine kıyasla büyük oranda azaltabildiğini belirtmiştir. Ayrıca biyogaz üretim sürecinde açığa çıkan metanın kontrollü bir şekilde enerjiye dönüştürülmesi, metanın atmosferde serbest kalmasına kıyasla yaklaşık 25 kat daha düşük küresel ısınma potansiyeline sahip CO₂'ye dönüşmesini sağlar (IPCC, 2014). Bu yönüyle biyogaz teknolojileri, hem iklim değişikliği ile mücadele hem de yenilenebilir enerji üretimi açısından çifte fayda sunmaktadır.

Gelişmiş ülkelerde tarımsal biyogaz üretimi yaygın olarak entegre çiftlik sistemleriyle birlikte yürütülmekte olup, enerji bağımsızlığı, gübre maliyetlerinin düşürülmesi ve karbon ayak izinin azaltılması açısından etkin bir model oluşturmaktadır. Örneğin Almanya'da Avrupa kıtasındaki en fazla aktif biyogaz tesisine sahiptir ve tarımsal atıkların önemli bir kısmı bu yolla değerlendirilmektedir (Gustafsson & Anderberg, 2022). Buna karşın gelişmekte olan ülkelerde teknolojik ve ekonomik engeller nedeniyle biyogaz sistemlerinin yaygınlaşma oranı düşüktür (Bhupendra vd., 2022).

Ancak biyogaz üretim tesislerinin sürdürülebilir bir şekilde işletilebilmesi için düzenli atık temini, süreç parametrelerinin (pH, sıcaklık ve karbon/azot oranı) hassas takibi ve teknik bilgi gerekliliği gibi kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, enerji şebekelerine entegrasyon, yatırım teşvikleri ve teknik eğitim gibi destekleyici unsurlar da sistemin başarısını doğrudan etkilemektedir (Holm-Nielsen vd., 2009).

Sonuç olarak, biyogaz üretimi, tarımsal atıkların enerjiye dönüştürülmesi yoluyla hem çevresel yüklerin azaltılmasını hem de kırsal kalkınmanın desteklenmesini sağlayan, uygulanabilir ve çevre dostu bir çözüm sunmaktadır.

Biyokömür (Biochar) ve Sera Gazı Azaltımı

Biyokömür (biochar), organik atıkların oksijenin sınırlı olduğu koşullarda, genellikle 300–700°C aralığında piroliz işlemine tabi tutulmasıyla elde edilen karbon açısından

zengin katı bir üründür. Bu materyal, hem toprak iyileştirici özellikleri hem de uzun vadeli karbon tutma kapasitesi sayesinde iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir (Lehmann & Joseph, 2015). Tarımsal atıkların bu yöntemle işlenmesi, karbonun toprakta stabil bir formda tutulmasını sağlayarak atmosfere geri salımını önlemekte ve böylece negatif emisyon teknolojileri kapsamında değerlendirilebilmektedir (Woolf vd., 2010).

Mohan vd. (2014), biyokömür uygulamasının toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde önemli etkiler yarattığını; özellikle toprakların su tutma kapasitesini %20'ye kadar artırdığını, pH dengesini düzenlediğini ve katyon değişim kapasitesini yükselttiğini bildirmiştir. Bu iyileştirici etkiler, özellikle erozyona uğramış veya organik maddece zayıf topraklarda önemli bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca biyokömürün gözenekli yapısı, toprak mikrobiyal yaşamını desteklemekte ve bitki gelişimini olumlu yönde etkilemektedir (Lehmann vd., 2011).

Zhang vd. (2012) tarafından Çin'de yürütülen uzun dönemli bir tarla çalışmasında, pirinç tarlalarına uygulanan biyokömürün metan (CH₄) emisyonlarını %40 oranında azalttığı, aynı zamanda pirinç veriminde istatistiksel olarak anlamlı (%10–12 düzeyinde) bir artış sağladığı rapor edilmiştir. Bu etki, özellikle çeltik tarımı gibi su altında yetiştirilen ürünlerde metan oluşumunun azaltılması açısından önemlidir. Biyokömürün aynı zamanda nitröz oksit (N₂O) emisyonlarını da düşürdüğüne dair bulgular, sera gazı azaltımı üzerindeki çok yönlü etkilerini desteklemektedir (Cayuela vd., 2014).

Biyokömür uygulamasının karbon ayak izine katkısı, sadece sera gazı azaltımıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda karbon kredisi mekanizmaları yoluyla ekonomik faydaya da dönüştürülebilmektedir. Özellikle Avrupa Birliği, Avustralya ve Japonya gibi ülkelerde biyokömür üretimi ve kullanımı çeşitli teşvik programlarıyla desteklenmekte; bazı ülkelerde karbon sertifikalandırma sistemleri üzerinden ticarete konu olabilmektedir (Lehmann & Joseph, 2015).

Ancak biyokömür üretiminin çevresel faydalarının maksimize edilmesi için kullanılan hammadde türü, piroliz sıcaklığı, kalıntı mineral içeriği ve uygulama dozajı gibi teknik parametrelerin titizlikle kontrol edilmesi gerekmektedir (Spokas vd., 2012). Ayrıca biyokömürün topraklara yaygın olarak uygulanabilmesi için çiftçi farkındalığı, ekonomik fizibilite çalışmaları ve yerel toprak özelliklerine uygun uygulama rehberlerinin geliştirilmesi gereklidir.

Sonuç olarak, biyokömür üretimi ve kullanımı, tarımsal

atıkların ileri dönüşümünde çevresel sürdürülebilirliği destekleyen, düşük karbonlu kalkınma politikalarıyla uyumlu ve uzun vadeli etkiler sunan yenilikçi bir stratejidir.

Tarımsal atıkların çevresel sürdürülebilirlik açısından ele alınması için aşağıdaki uygulama kılavuzuna bağlı olarak adımlar atılmalıdır. İlk olarak organik, hayvansal, ambalaj vb. atık türleri belirlenmelidir bir sonraki adımda hedef atık türü için kompostlama, biyogaz veya piroliz gibi uygun bir geri kazanım teknolojisinin seçiminin yapılması gerekir. Çeşitli çevresel faktörler göz önünde bulundurularak atık miktarına bağlı olarak uygun ölçekli sistemin kurulması bir sonraki adım olmalıdır. Amaçlanan çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılabilmesi için uygulamanın sonraki aşamalarında mutlaka teknik operatör ve çiftçi gibi paydaşlar için eğitim ve kapasite geliştirme faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Son adım olarak emisyon, ürün kalitesi ve verimlilik gibi sürdürülebilirlik parametrelerinin izleme ve raporlama işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Atık türüne bağlı olarak gerçekleştirilen geri kazanım yöntemleri ve bu yöntemlerin çevresel katkıları ile ilgili yapılmış çalışmalar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.

Tarımsal Atıkların Geri Kazanım Yöntemlerine Göre Çevresel Katkıları

Geri Kazanım Yöntemleri	Atık Türü	Çevresel Katkı	Kaynak
Kompostlama	Bitkisel, hayvansal	Toprak organik maddesi	Awasthi et. Al. 2014
Biyogaz	Hayvansal	Enerji üretimi, CH ₄ azaltımı	Zhang et. Al., 2018
Biyokömür	Bitkisel	Su tutma kapasitesi, CO ₂ tutulumu	Mohan et. Al., 2014
Uygulama örnekleri	Karışık	Karbon ayak izi azaltımı	European Com. 2020

Başarılı Uygulama Örnekleri

Avrupa Birliği bünyesindeki "Zero Waste Agriculture" programları çerçevesinde uygulanan projelerde, çiftlik ölçeğinde kurulan biyogaz tesislerinin hem enerji üretimini hem de çiftlik atıklarını entegre biçimde yönettiği görülmektedir (European Commission, 2020). Özellikle Danimarka, Almanya ve Hollanda'da tarımsal atıkların geri kazanımı %50'nin üzerine çıkmış ve bu sayede tarımsal faaliyetlerin karbon ayak izi ciddi oranda azaltılmıştır. 9000'den fazla biyogaz tesisi (2022 itibarıyla) ile tarımsal atıkların %65'i enerjiye dönüştürülmektedir. Bioeconomy Strategy kapsamında tarımsal atıklar hammadde olarak değerlendirilmektedir (BMEL, 2020). Hindistan'da "National Bio-Energy Mission" kapsamında çiftçilere biyogaz ve kompost sistemleri için %50'ye varan sübvansiyon verilmektedir. Pilot köy projelerinde %30 organik atık geri kazanımı sağlanmıştır (Jain vd., 2022). Türkiye'nin büyük

miktarda biyogaz tesisi kurabilme ve böylece ülkenin enerji ihtiyacının yaklaşık yüzde 6'sını biyogaz üretiminden karşılayabilme potansiyeli bulunmaktadır (Anonim, 2020).

Tarımsal atıkların geri kazanımı ve geri dönüşümünün sürdürülebilirlik açısından başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için kanun koyucuların aşağıdaki uygulamaları hayata geçirmesi gerekir.

- Entegre atık yönetim politikaları oluşturulmalı; tarım, çevre ve enerji bakanlıklarının işbirliği sağlanmalıdır.
- Ekonomik teşvikler (vergi indirimi, sübvansiyon, karbon kredisi) ile çiftçilere geri kazanım teknolojilerine geçiş kolaylaştırılmalıdır.
- Yasal zorunluluklar, özellikle büyük ölçekli tarımsal işletmeler için atık geri kazanımı şart koşulmalıdır (örneğin AB Ortak Tarım Politikası çerçevesi).
- Karbon piyasalarına entegrasyon ile tarımsal atıkların çevresel katkısı ölçülebilir ve gelir getirici hale getirilebilir (Paritosh vd., 2017).

Bu bulgular, tarımsal atıkların yalnızca bir çevre sorunu değil, aynı zamanda bir kaynak olarak ele alınması gerektiğini ve uygun değerlendirme teknolojileriyle çevresel, ekonomik ve sosyal kazanımlar sağlanabileceğini göstermektedir.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmanın bulguları, tarımsal atıkların geleneksel olarak çevresel bir yük olarak algılanmasına karşın, uygun teknolojilerle değerlendirildiğinde önemli çevresel ve ekonomik fırsatlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde de belirtildiği gibi, özellikle organik tarımsal atıkların kompostlama, anaerobik çürütme ve piroliz gibi işlemlerle yeniden kullanımının; toprak verimliliğini artırmak, sera gazı salımlarını azaltmak ve döngüsel ekonomiye katkı sağlamak gibi çok yönlü faydaları bulunmaktadır (Awasthi vd., 2014; Mohan vd., 2014; Paritosh vd., 2017).

Bulgular, düşük ve orta gelirli ülkelerde geri kazanım oranlarının oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, altyapı eksiklikleri, teknolojik sınırlılıklar ve farkındalık düzeyinin yetersizliği gibi yapısal sorunlardan kaynaklanmaktadır (UNEP, 2020). Öte yandan Avrupa Birliği gibi bölgelerde, tarımsal atık yönetimine ilişkin politikaların ve teşviklerin sistematik biçimde uygulanması sayesinde atık geri kazanım oranlarının %50'nin üzerine çıktığı görülmektedir. Bu karşılaştırma, politika düzeyindeki düzenlemelerin ve yerel uygulamaların etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Bioenerji üretimi açısından değerlendirildiğinde, tarımsal atıkların biyogaz üretimi için büyük bir potansiyel taşıdığı anlaşılmaktadır. Ortaya konan veriler, 1 ton sığır gübresinden elde edilen biyogaz, kırsal bir hanenin günlük enerji ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, biyogaz sistemlerinin yaygınlaştırılması hem atıkların bertaraf edilmesini kolaylaştırmakta hem de enerji arz güvenliğine katkı sağlamaktadır.

Biyokömür üretimi gibi yeni nesil teknolojiler ise yalnızca atıkları değerlendirmekle kalmamakta, aynı zamanda uzun vadeli karbon tutumu sağlayarak iklim değişikliği ile mücadeleye destek olmaktadır (Wael vd., 2019). Bu yönüyle tarımsal atıkların değerlendirilmesi, sadece çevre mühendisliği açısından değil, aynı zamanda iklim politikaları bağlamında da önem arz etmektedir.

Ancak tüm bu olumlu yönlere rağmen, tarımsal atıkların sürdürülebilir yönetimi önünde hâlâ önemli zorluklar bulunmaktadır. Bunlar arasında ekonomik fizibilite, teknolojiye erişim, çiftçi eğitimi ve atık toplama sistemlerinin yetersizliği öne çıkmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir tarımsal atık yönetiminin yaygınlaştırılabilmesi için hem teknik hem de sosyal bileşenleri içeren çok boyutlu stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, tarımsal atıkların çevresel sürdürülebilirlik açısından bir tehditten ziyade fırsat olarak ele alınabileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan literatür analizi, tarımsal atıkların geri kazanımı yoluyla toprağın iyileştirilmesi, yenilenebilir enerji üretimi, sera gazı azaltımı ve döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında önemli katkılar sağladığını göstermiştir.

Kompostlama, biyogaz üretimi ve biyokömür gibi teknolojiler, atıkların çevreye zarar vermeden değerlendirilmesini sağlamak ve kırsal kalkınmayı desteklemektedir. Bununla birlikte, mevcut geri kazanım oranlarının küresel düzeyde yeterli olmadığı; özellikle gelişmekte olan ülkelerde yapısal ve yönetsel engellerin sürdürülebilir atık yönetimini sınırladığı görülmektedir.

Sonuç olarak, tarımsal atıkların sürdürülebilir yönetimi; bütüncül bir atık politikası, çiftçi destek programları, teknik altyapı yatırımları ve toplum temelli bilinçlendirme çalışmaları ile birlikte ele alınmalıdır. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmaların, yaşam döngüsü analizleri ve maliyet-etkinlik değerlendirmeleriyle bu teknolojilerin uygulanabilirliğini daha detaylı olarak incelemesi önerilmektedir.

Etik Komite Onayı: Bu çalışma için etik komite onayı gerekmemektedir.

Hakem değerlendirmesi: Dış bağımsız.

Çıkar Çatışması: Yazarın beyan edeceği bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Finansal Açıklama: Bu çalışma için herhangi bir mali destek alınmamıştır.

Ethics Committee Approval: Ethics committee approval is not required for this study.

Peer-review: Externally peer-reviewed.

Conflict of Interest: The author have no conflict of interest to declare.

Financial Disclosure: This study was not supported by any funding agency.

Kaynaklar

- Anonim. (2020). *Türk-Alman Biyogaz Projesi*. <https://tuerkei.diplo.de/tr-tr/themen/wirtschaft/-/1798692>
- Awasthi, M. K., Pandey, A. K., Khan, J., Bundela, P. S., Jonathan W.C. Wong J. W.C., Selvam, A., (2014). Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. *Bioresource Technology*, 168, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.048>
- Bernal, M. P., Alburquerque, 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>
- Bhupendra, K., Mohammad, Y., & Maulin, P. S. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, 206(1), 112285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
- Cayuela, M. L., Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Hanley, K., Enders, A., & Lehmann, J. (2014). Biochar and denitrification in soils: When, how much and why does biochar reduce N₂O emissions? *Scientific Reports*, 4, 3499. <https://doi.org/10.1038/srep03499>
- European Commission. (2020). *A new circular economy action plan*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- FAO. (2019). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/CA3129EN/ca3129en.pdf>
- Gustafsson, M., & Anderberg, S. (2022). Biogas policies and production development in Europe: A comparative analysis of eight countries. *Biofuels*, 13(8), 931–944. <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2034380>
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–5484. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
- IPCC. (2014). *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*.
- Jain, R., & Naik, S. N. (2022). Sustainable management of agricultural waste in India. In Baskar, C., Ramakrishna, S., Baskar, S., Sharma, R., Chinnappan, A., & Sehwat, R. (Eds.), *Handbook of Solid Waste Management*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4230-2_26
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., Astals, S., (2014). Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(2), 99–111. <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.525496>
- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., Pittman, C. U., (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low-cost and sustainable adsorbent—A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120>
- Paritosh, K., Kushwaha, S. K., Yadav, M., Pareek, N., Chawade, A., Vivekanand, V., (2017). Food waste to energy: An overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling. *BioMed Research International*, 2017, 2370927. <https://doi.org/10.1155/2017/2370927>
- Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A. A., Lima, I. M., Lamb, M. C., McAloon, A. J., Lentz, R. D., (2012). Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069>
- UNEP. (2020). *Waste management outlook for Latin America and the Caribbean*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/ietc/resources/publication/waste-management-outlook-latin-america-and-caribbean>
- UNEP. (2024). *Global waste management outlook 2024*. United Nations Environment Programme.
- Wael, M. S., Hamada, R. B., Mamoudou, S., Simpson, C. R., El-Maged, T. A. A., Rady, M. M., Nelson, S. D., (2019). Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany*, 127, 333–347. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.01.015>
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate

global climate change. *Nature Communications*, 1(5), 56.

<https://doi.org/10.1038/ncomms1053>

Zhang, A., Bian, R., Pan, G., Cui, L., Hussain, Q., Li, L., & Chang, A. (2012). Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice-growing cycles. *Field Crops Research*, 127, 153–160.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.020>

Zhao, N., Teng, J., & Chen, Y. (2018). Current situation and analysis of agriculture waste management in China. *World Environment*, 4, 44–47.

Zhu, N., Deng, C., Xiong, Y., & Qian, H. (2004). Performance characteristics of three aeration systems in the swine manure composting. *Bioresource Technology*, 95(3), 319–326.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.021>