

E-Atık Araştırmalarında Değişen Odaklar: Geleneksel Yönetimden Döngüsel Stratejilere

Hediye Kırlı Akın¹

Özet

Elektrikli ve elektronik atıklar (e-atık), dijitalleşmenin hızlanması ve ürün yaşam döngülerinin kısalmasıyla birlikte en hızlı büyüyen atık sorunlarından biri haline gelmiştir. E-atık araştırmaları başlangıçta ağırlıklı olarak toplama, bertaraf ve mevzuat odaklı geleneksel yönetim yaklaşımları çerçevesinde ele alınmıştır. Ancak zaman içinde, e-atıkların çevresel ortamlarda katlanarak yayılması ve halk sağlığı üzerindeki ciddi etkilerinin anlaşılmasıyla birlikte literatürde odak değişimi yaşanmıştır. Son yıllarda ise e-atıklar, döngüsel ekonomi perspektifi doğrultusunda yalnızca çevre ve halk açısından bir risk unsuru değil, aynı zamanda stratejik bir gelir kaynağı olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Bu kitap bölümü, e-atık araştırmalarında zaman içinde yaşanan bu odak değişimini bütüncül bir bakış açısıyla ele almaktadır. Geleneksel ekonomi anlayışından, çevresel ve sağlık odaklı çalışmalara, oradan döngüsel stratejilere uzanan bu dönüşüm; literatür temelli bir sentez aracılığıyla analiz edilmektedir. E-atık yönetiminin sistem düşüncesi çerçevesinde ele alınmasının önemi vurgulanmakta; endüstri mühendisliği perspektifinden süreç tasarımı, karar verme ve optimizasyon yaklaşımlarının bu alandaki potansiyel katkıları tartışılmaktadır. Sonuç olarak, çalışma e-atık yönetiminin yalnızca teknik bir zorunluluk değil, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda stratejik bir sistem tasarım problemi olduğunu ortaya koymaktadır.

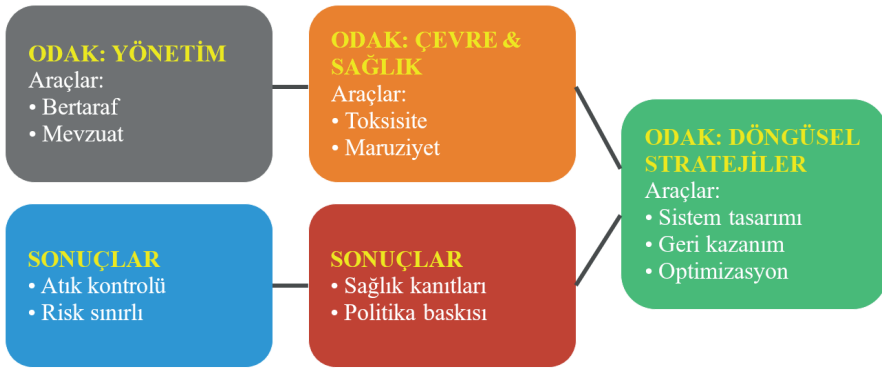
1. Giriş

Dijitalleşme, teknolojik yenilenme hızının artması ve küresel tüketim alışkanlıklarındaki dönüşüm, elektrikli ve elektronik atıkları (e-atık) günümüzün en hızlı büyüyen atık problemlerinden biri haline getirmiştir (Baldé et al., 2017; Forti et al., 2020). Başlangıçta ağırlıklı olarak teknik bir

1 Dr. Öğr. Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, hediyeakin@osmaniye.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4862-9054

atık yönetimi sorunu olarak ele alınan e-atıklar, zaman içinde çevresel, sağlıkla ilişkili, ekonomik ve yönetsel boyutları olan çok katmanlı bir araştırma alanına dönüşmüştür (Robinson, 2009; Perkins et al., 2014). Bu dönüşüm, literatürde yalnızca ele alınan temaların değil, aynı zamanda kullanılan yaklaşımların ve problem tanımlarının da büyük oranda değişmesine yol açmıştır.

E-atık araştırmalarının erken dönemlerinde baskın olan yaklaşım, toplama ve bertaraf süreçlerine odaklanan geleneksel yönetim anlayışıdır. Bu yaklaşımda e-atıklar, kontrol altına alınması gereken çevresel bir risk unsuru olarak değerlendirilmiş olup çözüm yöntemleri büyük ölçüde düzenleyici çerçeveler ve teknik bertaraf yöntemleri etrafında ele alınmıştır (Robinson, 2009). Ancak bu bakış açısı, e-atıkların içerdiği değerli materyallerin geri kazanımı, sistem verimliliği ve uzun vadeli sürdürülebilirlik gibi konuları yeterince kapsayamamıştır (Forti et al., 2020). E-atık araştırmalarında zaman içinde yaşanan bu dönüşüm, Şekil 1’de görüldüğü üzere yönetim temelli yaklaşımlardan çevresel ve sağlık odaklı çalışmalara, oradan da döngüsel stratejilere doğru belirgin bir odak değişimini beraberinde getirmiştir.



Şekil 1. E-Atık Araştırmalarında Odak Değişimi ve Yaklaşımlar (Robinson ,2009; Perkins et al., 2014; European Commission, 2020)

Şekil 1., e-atık araştırmalarında zaman içinde yaşanan odak değişimini kavramsal olarak özetlemektedir. Erken dönem çalışmalarda baskın olan geleneksel yönetim yaklaşımları; toplama, bertaraf ve mevzuata uyum gibi operasyonel süreçlere odaklanmaktadır. Ancak daha sonraki çalışmalar çevresel ve insan sağlığı etkilerinin anlaşılmasına yönelmiştir. Son dönemde ise e-atıklar, döngüsel ekonomi ve sistem yaklaşımı çerçevesinde yalnızca çevresel bir risk unsuru değil, aynı zamanda stratejik bir kaynak ve çok kriterli bir karar problemi olarak ele alınmaktadır.

Zamanla, e-atıkların çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin daha görünür hale gelmesi, literatürde yeni bir odak değişimini tetiklemiştir. Toksikolojik ve epidemiyolojik çalışmalar, e-atık sorununu yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ciddi bir halk sağlığı meselesi olarak konumlandırmıştır (Grant et al., 2013; Perkins et al., 2014). Bu gelişme, e-atık araştırmalarının disiplinlerarası bir yapıya evrilmesinde önemli bir kırılma noktası oluşturmıştır.

Son yıllarda ise e-atık literatüründe daha köklü bir paradigma değişimi gözlemlenmektedir. Lineer “al–kullan–at” modeli yerine, döngüsel ekonomi temelli yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. E-atıklar, uygun şekilde yönetildiğinde ekonomik ve çevresel değer üretebilecek stratejik bir kaynak olarak ele alınmaya başlanmıştır (European Commission, 2020; Forti et al., 2020). Bu dönüşüm, özellikle endüstri mühendisliği perspektifinden bakıldığında, sistem düşüncesi, süreç tasarımı ve karar verme yaklaşımlarının önemini de artırmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, e-atık araştırmalarında zaman içinde yaşanan odak değişimini bütüncül bir bakış açısıyla ele almaktır. Geleneksel yönetim yaklaşımlarından çevresel ve sağlık odaklı çalışmalara, oradan da döngüsel stratejilere uzanan bu evrim; literatür temelli bir değerlendirme ile analiz edilmektedir (Donthu et al., 2021). Çalışma, e-atık alanındaki araştırma eğilimlerini sistematik biçimde ortaya koymayı ve döngüsel ekonomi perspektifinin e-atık yönetimindeki rolünü endüstri mühendisliği bakış açısıyla ele almayı amaçlamaktadır.

2. E-Atık Yönetiminde Dönüşüm: Geleneksel Yaklaşımlardan Sistem Düşüncesine

E-atık yönetiminin gelişimi, büyük ölçüde atık kavramının nasıl tanımlandığı ve ele alındığı ile ilişkilidir. Erken dönem yaklaşımlar, e-atıkları öncelikle çevresel risk oluşturan materyaller olarak değerlendirmiş; yönetim stratejileri ise bu risklerin minimize edilmesine odaklanmıştır (Robinson, 2009; Sepúlveda et al., 2010). Toplama, geçici depolama ve bertaraf süreçleri, geleneksel e-atık yönetiminin temel bileşenlerini oluşturmuştur. Endüstri mühendisliği perspektifinden bakıldığında, bu durum kaynak israfı, düşük sistem verimliliği ve sürdürülemez süreç tasarımlarına da işaret etmektedir. Literatür incelendiğinde Tablo 1’de görüldüğü üzere e-atık konusunda zaman içinde baskın olan odak noktalarının ve kullanılan yaklaşımların değiştiği görülmektedir.

Tablo 1. E-Atık Araştırmalarında Odakların Evrimi (Robinson, 2009; Sepúlveda et al., 2010; Forti et al., 2020).

Dönem	Baskın Odak	Disiplin	Yaklaşım
2000–2010	Yönetim	Mühendislik	Bertaraf, Mevzuat, Atık kontrolü
2010–2018	Çevre & Sağlık	Çevre Bilimleri, Halk Sağlığı ve Epidemiyoloji	Toksiste, Maruziyet ve Risk Analizi
2018-...	Döngüsel	Sistem ve Endüstri Mühendisliği	Sistem tasarımı, Optimizasyon, Geri Kazanım

E-atık araştırmaları ile ilgili çalışmalar 2000 li yıllarda ağırlıklı olarak dikkat çekmeye başlamıştır. Uzun süre baskın olan geleneksel yönetim yaklaşımları, ağırlıklı olarak toplama, taşıma, bertaraf ve mevzuata uyum süreçleri gibi konulara odaklanmıştır. Bu yaklaşımlar, e-atıkların çevresel risklerinin azaltılmasında belirli ölçüde katkı sağlamış olmakla birlikte, hızla artan atık hacmi, ürün geri kazanımının karmaşıklığı ve sürdürülebilirlik hedefleri karşısında hiçbir zaman yeterli olmamıştır. Özellikle lineer ekonomi anlayışına dayanan bu yapı, e-atıkları sistem dışına çıkarılması gereken bir çıktı olarak ele almış ve karar süreçlerinde çok boyutlu performans ölçütlerini yeterince dikkate alamamıştır. Bu durum, e-atık yönetiminin yalnızca operasyonel bir atık problemi olarak değil, çevresel, ekonomik ve yönetsel kriterlerin birlikte değerlendirildiği çok kriterli bir karar problemi olarak ele alınmasını gerekli kılmıştır. Bu bağlamda çok yanıtli performans hedeflerinin tek bir karar metriğine indirgenmesine olanak tanıyan Gri İlişkisel Analiz gibi analitik yaklaşımlar (Fedai et al., 2022), günümüzde sürdürülebilirlik temelli e-atık araştırmalarındaki yöntemsel dönüşümün de önemli birer parçası haline gelmektedir.

Zamanla, geleneksel yönetim yaklaşımlarının sınırlılıkları ve yetersizlikleri daha belirgin hale gelmiştir. Artan e-atık miktarları, bertaraf kapasitesi üzerindeki baskıyı artırmış; aynı zamanda çevresel ve sağlık risklerinin kontrol altına alınmasını zorlaştırmıştır (Baldé et al., 2017; Perkins et al., 2014). Bu gelişmeler, literatürde e-atık yönetiminin yalnızca operasyonel bir problem değil, bütüncül bir sistem problemi olarak ele alınması gerektiği yönünde bir farkındalık yaratmıştır (European Commission, 2020).

Bu noktada sistem düşüncesi, e-atık yönetimi araştırmalarında giderek daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Sistem düşüncesi, e-atıkları üretim, tüketim ve geri kazanım süreçleriyle birlikte ele alarak, parçalı çözümler yerine bütüncül

yaklaşımlar geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, e-atıkların yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir çıktı değil, kapalı döngü sistemlerde yeniden değerlendirilebilecek bir girdi olduğunu özellikle vurgulamaktadır (European Commission, 2020; Forti et al., 2020).

Sistem temelli yaklaşımların benimsenmesiyle birlikte, e-atık araştırmaları bütün olarak ele alındığından dolayı çalışmalarda disiplinlerarası da bir genişleme gözlemlenmiştir. Literatürde çevre bilimleri ve halk sağlığı çalışmalarının yanı sıra, politika ve yönetim boyutlarında yapılan çalışmalarda da daha belirgin artışlar gözlenmiştir (Grant et al., 2013; Perkins et al., 2014). Bu gelişme, e-atık konusunu yönetmeyi teknik bir zorunluluktan çıkararak stratejik bir sürdürülebilirlik problemine dönüştürmüştür.

Sonuç olarak, e-atık yönetiminin evrimi, literatürde yalnızca yöntemlerin değil, problem tanımlarının da değiştiğini göstermektedir. Geleneksel, lineer ve parçalı yaklaşımların yerini; sistem düşüncesine dayalı, çok aktörlü ve döngüsel stratejiler almaya başlamıştır (European Commission, 2020). Bu dönüşüm, izleyen bölümlerde ele alınacak çevresel-sağlık odaklı araştırmalar ile döngüsel ekonomi temelli stratejilerin kavramsal zeminini oluşturmaktadır.

3. Çevresel ve Sağlık Odaklı Araştırmaların Literatürdeki Rolü

E-atık araştırmalarında yaşanan ilk büyük odak kayması, çevresel etkilerin sistematik biçimde ortaya konulmasıyla başlamıştır. Erken dönem çalışmalar, e-atıkların içerdiği ağır metaller ve kalıcı organik kirleticilerin toprak, su ve hava ortamlarına yayılımını incelemiş; bu yayılımın doğal sistemler üzerindeki olumsuz etkilerini ayrıntılı biçimde belgelemeye odaklanmıştır (Sepúlveda et al., 2010; Robinson, 2009). Bu kirleticilerin çevresel ortamlara karışması, ekolojik dengenin bozulmasına, toprak ve sucul canlıların zarar görmesine ve uzun vadede çeşitli kanser türleri başta olmak üzere ciddi sağlık risklerinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Kırılı Akın ve Fedai, 2024). Söz konusu çalışmalar, e-atıkların yalnızca hacimsel bir atık sorunu olmadığını; aynı zamanda uzun süreli çevresel ve ekotoksik riskler barındıran çok önemli ve kritik bir kirlilik kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, e-atık kaynaklı kirleticilerin çevresel ortamlara yayılımı ve halk sağlığı üzerindeki etkileri, tek başına ele alınamayacak kadar karmaşık etkileşimler içermekte olup, çok boyutlu ve büyük bir yapı sergilemektedir (Şekil 2).

Şekil 2. E-Atık Kaynaklı Çoklu Çevresel ve Sağlık Etki Ağı (Sepúlveda et al., 2010; Grant et al., 2013; Perkins et al., 2014)

Şekil2. e-atık kaynaklı kirleticilerin toprak, su ve hava ortamları üzerinden yayılımını ve bu yayılımın insan sağlığı üzerindeki etkilerini çoklu maruziyet yolları çerçevesinde göstermektedir. Mesleki ve toplumsal maruziyet

biçimleri birlikte ele alınarak, e-atık etkilerinin karmaşık ve etkileşimli yapısı vurgulanmıştır.

Çevresel bulguların tutarlı biçimde tekrar edilmesi, literatürde insan sağlığı boyutunun daha görünür hale gelmesine zemin hazırlamaktadır. Özellikle kayıt dışı geri dönüşüm faaliyetlerinin yoğunlaştığı bölgelerde yürütülen çalışmalar, e-atık maruziyetinin işçiler ve çevrede yaşayan topluluklar üzerinde ne kadar ciddi sağlık etkilerine neden olabileceğini ortaya koymuştur (Grant et al., 2013). Bu bağlamda e-atıklar, yalnızca çevre biliminin değil, halk sağlığı ve epidemiyoloji disiplinlerinin de ilgi alanına giren multidisipliner ve küresel bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

İnsan sağlığı odaklı araştırmalar, e-atık kaynaklı maruziyetleri genel olarak nörolojik gelişim bozuklukları, solunum sistemi rahatsızlıkları, çeşitli kanserler ve endokrin bozucu etkiler gibi sağlık çıktılarıyla ilişkilendirmiştir (Perkins et al., 2014). Bu çalışmalar, e-atık sorununu çevresel adalet perspektifinden ele alan yeni bir araştırma hattının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle çocuklar, yaşlılar, kronik rahatsızlığı olanlar, hamileler ve düşük gelirli topluluklar gibi hassas gruplar üzerindeki olumsuz etkileri, literatürde yıllar geçtikçe daha fazla vurgulanmaya başlamıştır.

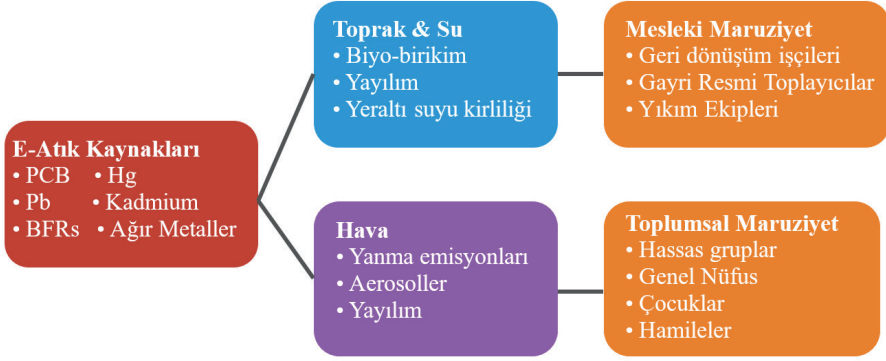
Bu süreçte çevresel ve sağlık odaklı çalışmalar, e-atık yönetimi politikalarının şekillenmesinde de belirleyici olmuştur. Bilimsel bulgular, yalnızca risklerin tanımlanmasına değil, aynı zamanda düzenleyici çerçevelerin gereçlendirilmesine de katkı sağlamıştır. Dolayısıyla bu araştırmalar, e-atık literatüründe yönetimden etkilere doğru yaşanan odak değişiminin temel taşı olarak değerlendirilmektedir.

4. Döngüsel Ekonomi Perspektifinden E-Atık Araştırmaları

E-atık araştırmalarında yaşanan ikinci büyük paradigma değişimi, döngüsel ekonomi yaklaşımının literatürde merkezi bir konuma gelmesiyle ortaya çıkmıştır. Döngüsel ekonomi, e-atıklar içerisindeki değerli kaynakların mümkün olan en uzun süre sistem içinde tutulmasını ve atığın değer kaybı yerine değer yaratma potansiyeli taşımasını esas almaktadır (European Commission, 2020). Bu yaklaşım, e-atıkları yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir çıktı olarak değil, yeniden değerlendirilebilir bir girdi olarak konumlandırmaktadır.

Literatürde döngüsel ekonomi temelli e-atık çalışmaları, lineer “al-kullan-at” modelinin sınırlılıklarını açık biçimde ortaya koymaktadır. Lineer sistemlerde kaynak verimliliği düşük kalmakta; çevresel ve ekonomik maliyetler büyük ölçüde sistem dışsallaşmaları olarak ortaya çıkmaktadır (Forti et al., 2020). Döngüsel yaklaşımlar ise ürün yaşam döngüsü boyunca değer geri

kazanımını ve kapalı döngü sistemleri hedeflemektedir. Lineer e-atık yönetim yaklaşımlarının sınırlılıkları ile döngüsel sistemlerin sunduğu potansiyel kazanımlar arasındaki farklar, sistem performansı ve sürdürülebilirlik boyutları açısından Şekil3.' te açıkça ortaya konulmaktadır.



Şekil3. Lineer ve Döngüsel E-Atık Sistemlerinin Performans Karşılaştırması (European Commission, 2020; Forti et al., 2020)

Şekil3.' te Lineer ve döngüsel e-atık yönetim sistemlerini kaynak kullanımı, sistem dayanıklılığı ve sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılmaktadır. Şekilde lineer sistemlerde ortaya çıkan kaynak kayıpları ve çevresel dışsallıklar ile döngüsel sistemlerin sunduğu değer geri kazanımı potansiyeli özetlenmiştir.

Endüstri mühendisliği perspektifinden bakıldığında, döngüsel ekonomi yaklaşımı sistem tasarımı, süreç optimizasyonu ve performans ölçümü açısından yeni araştırma alanları açmaktadır. E-atık yönetimi, bu çerçevede yalnızca çevresel bir sorumluluk değil, aynı zamanda stratejik bir operasyonel problem olarak ele alınmaktadır. Kaynak verimliliği, tersine lojistik ve yeniden kullanım stratejileri, döngüsel e-atık yönetiminin temel bileşenleri arasında yer almaktadır.

Bu çalışma, e-atık araştırmalarında yönetimden stratejiye doğru yaşanan odak değişimini açık biçimde yansıtmaktadır. Döngüsel ekonomi yaklaşımı, e-atık sorununu reaktif bir problemden proaktif bir sistem tasarım meselesine dönüştürmüştür.

5. Döngüsel Stratejiler ve Sistem Düzeyi Çözümler

Döngüsel ekonomi perspektifinin e-atık literatürüne entegrasyonu, somut stratejilerin ve sistem düzeyi çözümlerin geliştirilmesini beraberinde getirmiştir. Bu stratejiler, ürün tasarımından toplama sistemlerine, geri kazanım teknolojilerinden karar destek mekanizmalarına kadar uzanan geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır (Gaines, 2014).

Ürün tasarımında döngüsellik, her geçen gün katlanarak artan e-atık miktarının azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Modüler tasarım yaklaşımları, demontaj kolaylığı ve malzeme standartlaştırması, ürünlerin kullanım ömrünün uzatılmasına, bakım ve onarım süreçlerinin iyileştirilmesine ve geri kazanım oranlarının artırılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu bağlamda, Çevre için Tasarım (Design for Environment) prensipleri, malzeme seçimi ve söküm kriterlerinin sistem verimliliği üzerindeki etkisini optimize ederek döngüsel üretim ve geri kazanım süreçlerinin temelini oluşturmaktadır (Hauschild et al., 2004). Bu yaklaşım, e-atık yönetiminin yalnızca bertaraf aşamasında değil, ürün yaşam döngüsünün tasarım gibi erken safhalarında başlaması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Tersine lojistik sistemleri, döngüsel e-atık stratejilerinin operasyonel omurgasını oluşturmaktadır. Toplama, ayırma ve yeniden yönlendirme süreçlerinin etkin biçimde tasarlanması, sistem performansı açısından belirleyicidir. Literatürde, bu süreçlerin optimizasyonu için çok kriterli karar verme ve simülasyon temelli yaklaşımların giderek daha fazla kullanıldığı görülmektedir (Donthu et al., 2021). Döngüsel e-atık yönetiminde öne çıkan stratejiler ve bu stratejilerin temel özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Döngüsel E-Atık Stratejileri (Fleischmann et al., 1997; Ghisellini et al., 2016)

Strateji	Amaç	Endüstri Müh. Katkısı	Politika Bağlantısı
Tasarımda Döngüsellik (Eko-Tasarım)	Ürün ömrünü uzatma ve demontaj işlemlerini artırma	Ürün-süreç	Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR), Green Deal.
Tersine Lojistik	Atıkların kullanıcıdan toplanarak sisteme geri kazandırılması	Rota Optimizasyonu, tesis yer seçimi, ağ tasarımı, simülasyon	AB E-Atık Direktifleri, Atık Yönetimi Yönetmeliği.
İleri Dönüşüm ve Geri Kazanım	Değerli metallerin ve ham maddenin maksimum verimle ayrıştırılarak kaynak veriminin sağlanması.	Süreç analizi, Yalın Üretim, Malzeme Akış Analizi (MFA)	CE Planı, Döngüsel Ekonomi Eylem Planı, Sıfır Atık Politikası.
Akıllı Karar Destek Sistemleri	Stratejik ve taktiksel yönetim kararlarının optimize edilmesi.	Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), Yapay Zeka, Tahminleme Modelleri.	Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG), ISO 14001.
Onarma ve Yeniden Kullanma	Ürünlerin atık haline gelmeden ekonomik döngüde tutulması.	Stok Yönetimi, Bakım Planlama, Talep Tahmini.	Tamir Hakkı

Bu stratejiler, e-atık yönetiminin yalnızca teknik çözümler açısından değil, bütüncül sistem tasarımları ile değerlendirilerek ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu noktada Endüstri mühendisliği, e-atık literatürüne yöntemsel ve analitik katkılar sunan temel disiplinlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu noktada Endüstri Mühendisliği, e-atık literatürüne yöntemsel ve analitik katkılar sunan temel disiplinlerden biri olarak öne çıkmaktadır Özellikle tersine lojistik sistemleri, döngüsel e-atık stratejilerinin operasyonel omurgasını oluştururken; toplama, ayırma ve yeniden yönlendirme süreçlerinin etkin tasarımı sistem performansı açısından belirleyicidir. Literatürde, bu süreçlerin optimizasyonu için ÇKKV ve simülasyon temelli yaklaşımların giderek daha fazla kullanıldığı görülmektedir (Donthu et al., 2021; Fleischmann et al., 1997). Bu bütüncül yaklaşım ve karar mekanizmaları Şekil 4'te detaylandırılmıştır.



Şekil 4. Döngüsel E-Atık Yönetimi için Bütünleşik Endüstri Mühendisliği Modeli (Fleischmann et al., 1997; Ghisellini et al., 2016; Donthu et al., 2021)

Şekil 4'te, döngüsel e-atık yönetimini girdi, karar ve çıktı bileşenleri üzerinden ele alan, endüstri mühendisliği temelli bir sistem modeli sunulmaktadır. Model, e-atık akışlarını ve bu akışlara eşlik eden belirsizlikleri dikkate alarak; politika, strateji, ürün tasarımı ve optimizasyon kararlarının sistem performansı üzerindeki etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır. Bu çerçevede şekil, döngüsel e-atık yönetiminin yalnızca teknik bir süreç değil, çok kriterli ve çok düzeyli bir karar problemi olduğunu vurgulamaktadır

6. Tartışma, Sonuçlar ve Gelecek Araştırma Alanları

Bu çalışma, ağırlıklı olarak 2000'li yıllardan itibaren çalışılmaya başlanan e-atık araştırmalarının zaman içinde yaşadığı odak değişimini, literatür temelli ve bütüncül bir bakış açısı ile ele almıştır. Bulgular, e-atık çalışmalarının geleneksel yönetim yaklaşımlarından çevresel ve sağlık odaklı araştırmalara;

oradan da döngüsel ekonomi temelli stratejik yaklaşımlara doğru evrildiğini göstermektedir.

Bu dönüşüm, e-atık sorununun artık yalnızca düzenleyici veya teknik bir problem olarak ele alınamayacağını ortaya koymaktadır. Literatürdeki eğilimler, e-atık yönetiminin sistem düşüncesi, disiplinlerarası iş birliği ve stratejik karar verme mekanizmalarıyla ele alınması gerektiğine işaret etmektedir.

Gelecek araştırmalar açısından, döngüsel e-atık sistemlerinin performansının ölçülmesi, belirsizlik altında karar verme ve politika–uygulama boşluklarının analiz edilmesi öncelikli alanlar arasında yer almaktadır. Ayrıca, gelişmekte olan ülkelerdeki uygulamaların daha derinlemesine incelenmesi, literatürdeki coğrafi dengesizliklerin giderilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, e-atık araştırmalarında yaşanan odak değişimi, sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi hedefler doğrultusunda yeni bir araştırma gündemi ortaya koymaktadır. Bu çalışma, söz konusu dönüşümü sistematik biçimde ortaya koyarak, akademik literatüre ve uygulamaya yönelik tartışmalara bütüncül bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Kaynakça

- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU), & International Solid Waste Association (ISWA).
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- European Commission. (2020). *A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. European Commission.
- Fedai, Y., Basar, G., & Kirli Akın, H. (2022). Multi-response optimization in drilling of MWCNTs reinforced GFRP using grey relational analysis. *Teknikçi vjesnik*, 29(3), 742-751.
- Fleischmann, B., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Beullens, P., & Dekker, R. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1-17. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00230-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00230-0)
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU), & International Solid Waste Association (ISWA).
- Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 1–2, 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.10.001>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a new paradigm of production and consumption. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.0611>
- Grant, K., Goldizen, F. C., Sly, P. D., Brune, M.-N., Neira, M., van den Berg, M., & Norman, R. E. (2013). Health consequences of exposure to e-waste: A systematic review. *The Lancet Global Health*, 1(6), e350–e361. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70101-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70101-3)
- Hauschild, M. Z. (2004). Design for environment: Do we get the focus right? *CIRP Annals*, 53(1), 1–4. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60636-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60636-X)
- Kırılı Akın, H., & Fedai, Y. (2024). Elektronik atık yönetiminde imalat teknolojilerinin rolü. Hediye KIRLI AKIN (Ed.), Endüstri Mühendisliğinde İleri Araştırmalar (ss. 22–38). Yaz Yayınları.
- Perkins, D. N., Drisse, M.-N. B., Nxele, T., & Sly, P. D. (2014). E-waste: A global hazard. *Annals of Global Health*, 80(4), 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001>

- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 408(2), 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>
- Sepúlveda, A., Schluep, M., Renaud, F. G., Streicher, M., Kuehr, R., Hagelüken, C., & Gerecke, A. C. (2010). A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipment during recycling: Examples from China and India. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(1), 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.ciar.2009.04.001>