

Yapay zekanın çevresel ayak izi: Enerji, su ve elektronik atık üzerine çok yönlü bir analiz

The environmental footprint of artificial intelligence: A multi-aspect analysis of energy, water and electronic waste

Tülay Turan^{1*} , Gökhan Turan² , İbrahim Kırbas³ 

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Burdur, Türkiye

² Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Burdur, Türkiye

³ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Burdur, Türkiye

Özet: Yapay zeka, modern teknolojinin en yenilikçi alanlarından biri olarak, endüstriyel süreçlerin optimizasyonundan çevresel sorunların çözümüne kadar geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, hızla artan kullanımı, önemli çevresel etkilerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bu çalışma, yapay zekanın çevresel etkilerinden enerji tüketimi, karbon emisyonları, su kullanımı ve elektronik atık konuları çerçevesinde mevcut literatürü derleyerek kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik sürdürülebilir stratejiler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada ayrıca, enerji verimliliğine dayalı algoritmaların geliştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, şeffaf karbon raporlaması ve sürdürülebilir tasarım yaklaşımları gibi stratejik müdahaleler değerlendirilmiştir. Bu analizler, yapay zekanın çevresel maliyetlerinin azaltılmasının yalnızca teknolojik yeniliklerle değil, aynı zamanda politika geliştirme, düzenlemeler ve paydaşlar arası iş birliği ile mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Bulgular, yapay zekanın çevresel etkilerinin etkin bir şekilde yönetilmesi durumunda, teknolojik ilerlemenin çevresel sürdürülebilirlikle uyumlu bir şekilde sağlanabileceğini göstermektedir. Çalışma, gelecekteki araştırmalar ve politika geliştirme süreçleri için temel bir çerçeve sunmakta ve yapay zekanın sürdürülebilirlik odaklı bir yaklaşımla geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zeka, çevresel sürdürülebilirlik, karbon ayak izi, enerji tüketimi, su kullanımı, elektronik atık.

Abstract: Artificial intelligence, one of the most innovative areas of modern technology, has a wide range of application potential, from optimizing industrial processes to solving environmental problems. However, its rapidly increasing use leads to significant environmental impacts. This study aims to comprehensively analyze the existing literature on the environmental impacts of artificial intelligence within the framework of energy consumption, carbon emissions, water use, and electronic waste and to develop sustainable strategies to reduce these impacts. The study also evaluated strategic interventions such as developing algorithms based on energy efficiency, integrating renewable energy sources, transparent carbon reporting, and sustainable design approaches. These analyses reveal that reducing the environmental costs of artificial intelligence is possible not only with technological innovations but also with policy development, regulations, and stakeholder cooperation. The findings show that if the environmental impacts of artificial intelligence are effectively managed, technological progress can be achieved in a way that is compatible with environmental sustainability. The study provides a basic framework for future research and policy development processes and emphasizes that artificial intelligence should be developed with a sustainability-oriented approach.

Keywords: Artificial intelligence, environmental sustainability, carbon footprint, energy consumption, water usage, electronic waste.

1. Giriş

Yapay zeka (Artificial Intelligence - AI), 21. yüzyılın en dönüştürücü teknolojik yeniliklerinden biri olarak karşımıza çıkmakta ve endüstrilerdeki dönüşüm süreçlerine liderlik etmektedir. AI, karmaşık sorunların çözümünde sunduğu yüksek işlem gücü ve öğrenme kabiliyeti ile yalnızca ekonomik büyümeye katkı sağlamakla kalma-

yıp, aynı zamanda çevresel, sosyal ve teknik problemlere yönelik yenilikçi çözümler geliştirme potansiyeli taşımaktadır. Bununla birlikte, AI'nin hızla gelişen yapısı ve yaygın kullanımı, çevresel etkiler açısından derinlemesine ele alınması gereken bir dizi sorunu da beraberinde getirmektedir.

*İletişim Yazarı / Corresponding author. Eposta/Email : tulayturan@mehmetakif.edu.tr

Geliş / Received: 09.01.2025, Revizyon / Revised: 17.04.2025

Kabul / Accepted: 06.05.2025



Burdur
Mehmet Akif Ersoy
University Press



Yapay zeka teknolojilerinin çevresel maliyetleri, yalnızca enerji tüketimi ile sınırlı kalmayıp, sera gazı emisyonları, veri merkezlerinin soğutulması için kullanılan su miktarı ve donanım üretimiyle ilişkili elektronik atık sorunlarını da içeren çok boyutlu bir yapı sergilemektedir. Bu etkiler, AI'nin genişleyen “karbon gölgesi” olarak nitelendirilebilir ve mevcut kullanım senaryoları sürdürülebilir bir şekilde yönetilmediği takdirde gelecekte daha büyük ölçekli çevresel sorunlara yol açabileceği öngörülmektedir.

Özellikle derin öğrenme algoritmalarının kullanıldığı AI sistemleri, oldukça yüksek miktarda enerji tüketmekte ve bu durum, sistemlerin karmaşıklığı ve boyutlarının artmasıyla orantısız bir şekilde büyümektedir. Örneğin, Ürteken Ön-Eğitilmiş Dönüştürücü 4 (Generative Pre-trained Transformer 4 - GPT4) gibi büyük dil modellerinin eğitimi, bir önceki sürüm olan GPT-3'e kıyasla on kat daha fazla hesaplama kaynağı gerektirmiş ve bu da enerji tüketimi ile karbon emisyonlarında önemli artışlara neden olmuştur (OpenAI, 2024). Bu durum, AI'nin daha güçlü ve karmaşık sistemlere yönelimindeki sürdürülebilirlik zorluklarına işaret etmektedir.

Veri merkezleri, yapay zeka sistemlerinin operasyonunda merkezi bir rol oynamakta ve dünya çapında enerji tüketiminin yaklaşık %1'ini oluşturmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency - IEA), bu oranın AI teknolojilerine olan talebin artmasıyla 2030 yılına kadar üç katına çıkabileceğini ve enerji talebinin küçük ölçekli bir ülkenin seviyesine ulaşabileceğini öngörmektedir (BBC News, 2024). Karbon emisyonlarının yanı sıra, veri merkezlerinde soğutma sistemlerinde kullanılan su miktarının özellikle kurak bölgelerde ciddi ekolojik sorunlara yol açabileceği de belirtilmektedir (George ve ark., 2023).

Literatürde, yapay zeka teknolojilerinin çevresel etkilerinin yanı sıra etik ve sürdürülebilirlik boyutları da önemli bir yer tutmaktadır. Shin (2019), AI uygulamalarının insan hakları ihlallerine ve çevresel maliyetlere yol açabilecek potansiyel etkilerini vurgularken, Chavali ve ark. (2024) ise bu etkilerin minimize edilmesi için kapsamlı bir yasal ve politika çerçevesinin gerekliliğini önermek-

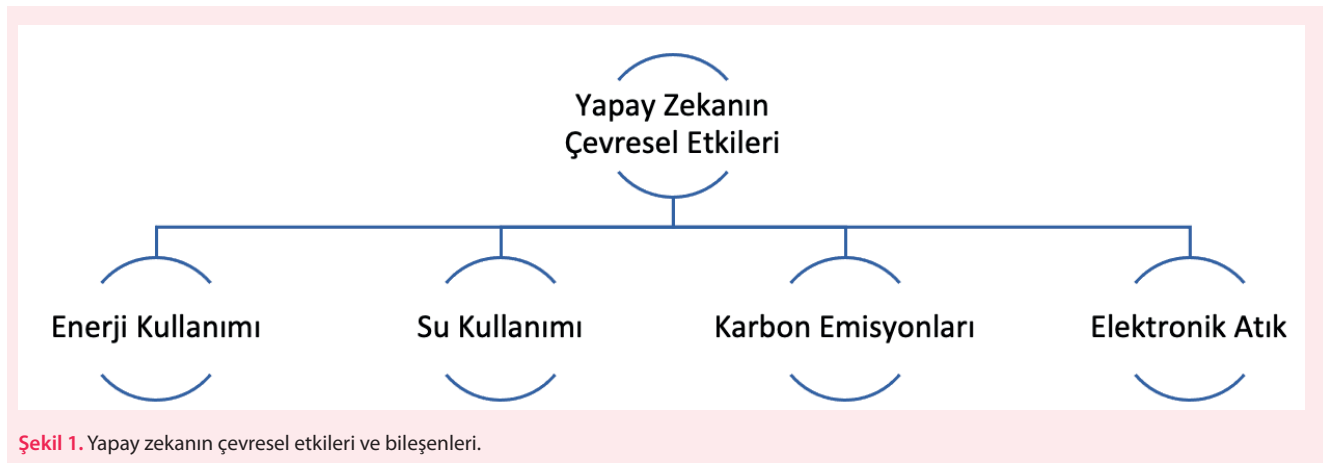
tedir. Nishant ve diğerleri (2020) tarafından yapılan bir çalışma ise AI'nin sürdürülebilirlik bağlamında sunduğu fırsatları ve beraberinde getirdiği zorlukları ele almıştır.

Bu bağlamda, yapay zeka teknolojilerinin sunduğu faydalardan yararlanırken çevresel maliyetlerini minimize edecek stratejilerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma, AI'nin çevresel etkilerini enerji, su ve elektronik atık boyutlarında detaylı bir şekilde analiz ederek mevcut literatürü sistematik bir şekilde derlemeyi ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik sürdürülebilirlik stratejileri önermeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, yapay zekanın çevresel sorunların çözümüne olan potansiyel katkıları değerlendirilerek, teknolojik ilerleme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengenin nasıl sağlanabileceği tartışılacaktır.

Bu çalışmada kullanılan literatür taraması, öncelikle son beş yıl içinde yayımlanmış, hakemli dergilerde yer alan ve yapay zekanın çevresel etkilerine odaklanan çalışmaları kapsamaktadır. Kaynaklar, Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect ve Google Scholar gibi bilimsel veri tabanlarında “artificial intelligence AND environmental impact”, “AI energy consumption”, “AI carbon emissions”, “AI water use” ve “electronic waste AND machine learning” gibi anahtar kelimelerle yapılan taramalar yoluyla seçilmiştir. Özellikle 2019–2024 yılları arasında yayımlanan çalışmalar önceliklendirilmiş, bunun yanı sıra bazı temel raporlar (IEA, Stanford AI Index, UNITAR) güncel veri sağladığı için dahil edilmiştir. Kaynakların seçimi; konunun güncelliği, atıf sayısı, metodolojik açıklık ve çalışmanın doğrudan çevresel etki temasıyla ilişkili olmasına göre yapılmıştır.

2. Yapay Zekanın Çevresel Etkileri

Çağdaş teknolojik yeniliklerin öncüsü olarak öne çıkan yapay zeka, çevresel etkileri bakımından kapsamlı bir şekilde ele alınması gereken kritik bir alan olarak dikkat çekmektedir. Bu bölümde, yapay zekanın çevresel etkileri, ilgili literatür doğrultusunda detaylandırılacak ve ►**Şekil 1**'de belirtilen alt başlıklar çerçevesinde sistematik bir şekilde incelenecektir.



2.1. Enerji Kullanımı

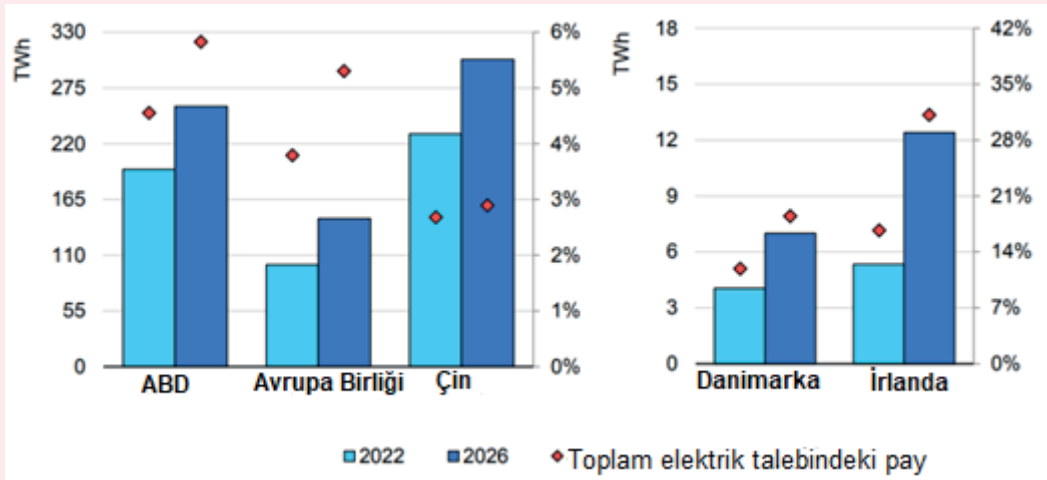
Yapay zekanın enerji tüketimi, hem AI sistemlerinin operasyonel taleplerini hem de AI teknolojilerinin çeşitli sektörlerde enerji kullanımını optimize etme potansiyelini kapsayan çok yönlü bir konudur. AI'nın enerji piyasalarında ve güç sistemlerinde konuşlandırılması, enerji üretimi, dağıtımı ve tüketiminde artan verimlilik ve sürdürülebilirlik vaat eden dönüştürücü bir güç olarak vurgulanmıştır. AI teknolojileri, enerji sistemlerinin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini ve enerji talebinin tahmin edilmesini sağlayan kalıpları ve eğilimleri belirlemek için geniş veri kümelerini analiz edebilir ve böylece artan enerji ihtiyaçlarının karmaşıklıklarını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu ele alabilir (Hamid ve Ganne, 2023).

Yapay zekanın enerji verimliliğini artırmadaki rolü özellikle önemlidir. Makine öğrenimi algoritmaları, hava koşulları, doluluk kalıpları ve enerji fiyatları gibi değişkenlere uyum sağlayarak enerji tüketimini optimize edebilir ve bu da önemli maliyet tasarrufları ve çevresel faydalar sağlayabilir (Olatunde ve ark., 2024; Adewumi ve ark., 2024). Makine öğrenimi yoluyla geliştirilen tahmini modellerin, konut elektrik kullanımı ve bina enerji performansı dahil olmak üzere çeşitli bağlamlarda enerji tüketimini etkili bir şekilde tahmin ettiği gösterilmiştir (Bahrami ve Khashroum, 2023; Azmi ve Saleh, 2024). Bu modeller, etki eden faktörler arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya çıkarmak için geçmiş verileri kullanır ve böylece enerji tüketim tahminlerinin doğruluğunu artırır (Goudarzi ve ark., 2019). Yapay zekanın yenilenebilir enerji yönetimindeki uygulaması, güneş ve rüzgar enerjisi gibi kaynakların içsel kesintiliğinin üstesinden gelmek için çok önemlidir. Yapay zeka, makine öğrenimi tekniklerini kullanarak tahmin doğruluğunu artırabilir ve yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için gerekli olan şebeke operasyonlarını optimize edebilir (Hassan ve ark., 2023). Yapay zekanın akıllı şebeke teknolojilerine entegrasyonu, enerji dağıtımı ve tüketiminin yönetimini daha da destekleyerek daha

duyarlı ve verimli bir enerji altyapısının oluşturulmasını kolaylaştırır (Ali ve Choi, 2020; Şerban ve Lytras, 2020). Ancak, yapay zeka sistemlerinin kendilerinin çalıştırılmasıyla ilişkili enerji tüketimini kabul etmek önemlidir. Makine öğrenimi algoritmalarının, özellikle veri merkezlerindeki hesaplama talepleri önemli olabilir ve bu da yapay zeka teknolojilerinin genel enerji ayak iziyle ilgili endişelere yol açabilir (Biglari ve Tang, 2023; Kumar ve ark., 2022). Araştırmalar, yapay zekanın çeşitli uygulamalarda enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabilmesine rağmen, yapay zeka modellerini eğitmek ve dağıtmak için gereken enerjinin, faydaların maliyetlerden daha ağır bastığından emin olmak için dikkatlice yönetilmesi gerektiğini göstermektedir (Liu ve ark., 2022).

IEA'nın 2024 raporuna göre, veri merkezlerinin elektrik tüketimi ve toplam elektrik talebindeki payı 2022 ve 2026 yılları arasında önemli ölçüde artış göstermektedir. **►Şekil 2**'de verildiği gibi, Amerika Birleşik Devletleri'nde veri merkezlerinin elektrik tüketimi 2022'de yaklaşık 220 TWh iken, 2026'da 275 TWh'yi aşması ve toplam elektrik talebinin %5-6'sını oluşturması beklenmektedir. Avrupa'da ise tüketimin 2022'de 100 TWh civarında olduğu, 2026'da 150 TWh'ye ulaşarak toplam talebin yaklaşık %3'ünü karşılayacağı öngörülmektedir. Çin'de veri merkezlerinin tüketimi 2022'de yaklaşık 220 TWh seviyesinde gerçekleşirken, 2026'da 300 TWh'yi aşarak elektrik talebinin %5'ini oluşturacağı tahmin edilmektedir. Küçük ölçekli ülkelerden Danimarka, 2022'de 4 TWh olan tüketimin 2026'da 7 TWh'ye yükselmesiyle toplam talebin %10'una yaklaşırken, İrlanda'da bu artış çok daha çarpıcıdır; 2022'de 6 TWh olan tüketim, 2026'da 13 TWh'yi aşarak toplam elektrik talebinin %35'ini oluşturacaktır. Bu bulgular, veri merkezlerinin elektrik talebindeki payının hızla arttığını ve özellikle İrlanda gibi bölgelerde enerji altyapısı üzerindeki baskının ciddi boyutlara ulaşabileceğini göstermektedir (IEA, 2024).

Büyük dil modellerinin (Large Language Models - LLM) karmaşılaşması, enerji talebinde kayda değer bir artış



Şekil 2. Veri merkezlerinin 2022 ve 2026 yıllarındaki tahmini elektrik tüketimi (IEA, 2024)

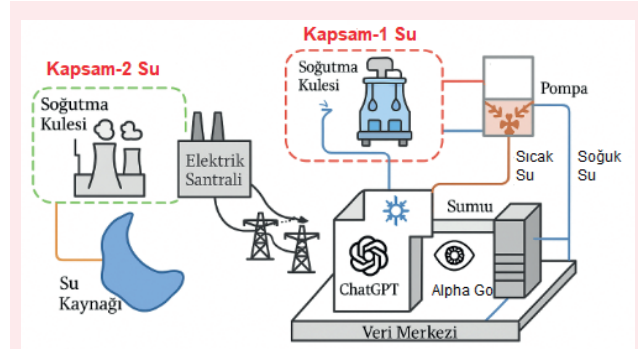
beraberinde getirmektedir. GPT-3 gibi bir modeli eğitmek için yaklaşık 1.300 megawatt saat (MWh) elektrik kullanıldığı tahmin edilmektedir. Bu miktar, ABD'deki 130 evin yıllık elektrik tüketimine eşdeğerdir. Daha gelişmiş olan GPT-4'ün eğitimi ise yaklaşık 50 kat daha fazla elektrik tüketmektedir, bu da yapay zekanın hesaplama gücüne olan talebinin katlanarak arttığını göstermektedir. Genel olarak, yapay zekanın büyümesini sürdürebilmek için gerekli hesaplama gücünün yaklaşık her 100 günde bir iki katına çıktığı ifade edilmektedir (IEA, 2024). Bu bağlamda yapay zeka enerji tüketimini optimize etmek ve enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak için önemli fırsatlar sunarken, aynı zamanda kendi enerji talepleriyle ilgili zorluklar da yaratmaktadır. Yapay zekanın enerji verimliliği için kullanılması ve operasyonel enerji tüketiminin etkin bir şekilde yönetilmesi arasında bir denge kurulması için bu alanda devam eden araştırma ve geliştirme çalışmalarının büyük önem taşıdığı vurgulanmalıdır.

2.2. Su Kullanımı

Yapay zeka sistemleri ve veri merkezleri modern dünyada giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu gelişme, su kullanımına ilişkin çevresel sorunların daha belirgin hale gelmesine neden olmaktadır (Austen, 2023; Albers, 2019). Bulut bilişimin ve AI zincirinin omurgasını oluşturan veri merkezleri, soğutma ve diğer depolama ihtiyaçları için büyük miktarda su tüketmektedirler (Poff ve ark., 2015; Basmadjian ve ark., 2015). Su kullanımı finansal genişlemeye yol açmakla beraber, su kıtlığı sorunu negatîf katkıyı arttırmaktadır (Ferreira ve ark., 2019; Ghamkhari ve ark., 2017). Su, yüksek performanslı bilgi işlem ekipmanları tarafından üretilen ısıyı dağıtmak için soğutma sistemlerine alternatif ihtiyaçtır (Ramli ve Jambari, 2018; Dayarathna ve ark., 2016). Soğutma sistemleri veri merkezinin toplam enerji tüketiminin %50'sine kadarını karşılayabilir ve bu enerjinin önemli bir kısmı su bazlı soğutma için kullanılır (Kummu ve ark., 2016; Chen ve ark., 2015). Veri depolama ve işleme için artan talep, verilerin daha fazla yedekli cihazın konuşlandırılmasına yol açması su tüketimini daha da artırmıştır (Uzaman ve ark., 2019; Alam ve ark., 2022).

Li ve arkadaşları yapay zeka modellerinin su kullanımını üç farklı kapsamda ele almışlardır. Kapsam-1 su kullanımı, veri merkezlerinde sunucu soğutması için doğrudan tüketilen suyu tanımlamak için kullanılmıştır. Kapsam-2 su kullanımı, AI veri merkezlerinin elektrik ihtiyacını karşılamak için termik santrallerde dolaylı olarak kullanılan suyu ifade etmektedir. Kapsam-3 su kullanımı ise AI için gerekli çip ve sunucuların üretiminde kullanılan suyu tanımlamak için kullanılmıştır. Analizleri, AI modellerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından enerji tüketiminin yanı sıra su ayak izini de dikkate alması gerektiğini vurgulamaktadır. ►**Şekil 3**, veri merkezlerinde su kullanımını doğrudan (Kapsam-1) ve dolaylı (Kapsam-2) olmak üzere iki başlık altında göstermektedir. Kapsam-1, veri merkezinin kendi içindeki soğutma sistemlerinde kullanılan suyu ifade ederken; Kapsam-2, elektrik üretimi sırasında dolaylı olarak tüketilen su miktarını kapsa-

maktadır. Şekilde ayrıca soğutma kuleleri, ısı değiştiriciler, pompa sistemleri ve enerji iletim hatları gibi unsurlar yer almakta; yapay zeka modellerinin çalıştığı sunucu sistemlerinin bu kaynaklarla nasıl ilişkilendiği gösterilmektedir. Bu görsel, veri merkezlerinin yalnızca enerji değil aynı zamanda su kaynakları üzerinde de doğrudan ve dolaylı etkiler yarattığını açık biçimde ortaya koymaktadır (Li ve ark., 2023).



Şekil 3. Yapay zeka veri merkezlerinin operasyonel su kullanımı (Li ve ark., 2023)

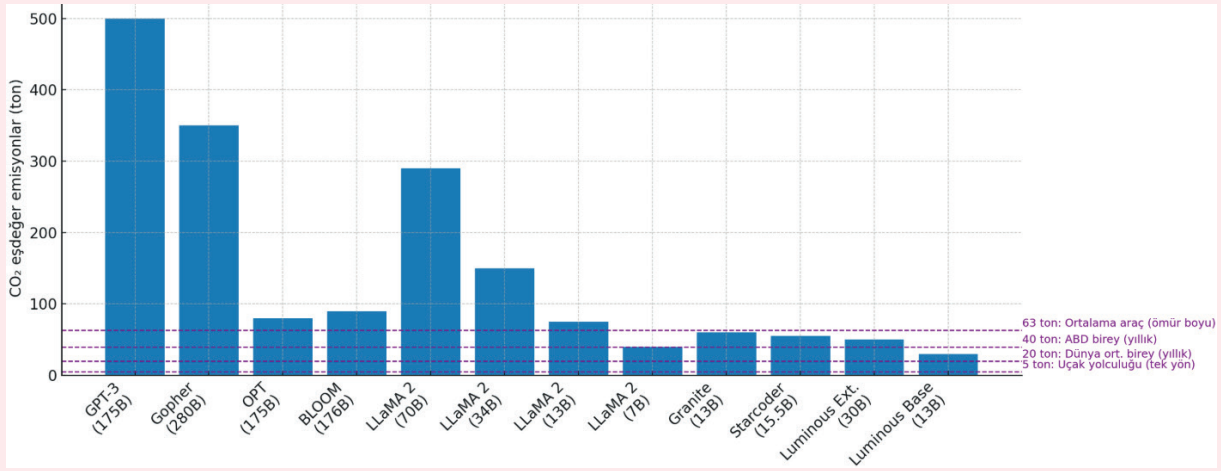
Araştırmacılar, veri merkezlerinin su kaynakları ve maliyetleri ele almak için çeşitli stratejiler araştırmışlardır. Su tüketimi önemli ölçüde azaltılabilen buharlaştırıcı soğutma veya hava bazlı soğutma kullanımı gibi daha verimli soğutma sonuçları önermişlerdir (Mekonnen ve Hoekstra, 2016; Reddy ve ark., 2017). Güneş veya rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji dağıtımları kullanılarak, su kullanımının minimize edilebileceği de vurgulanmıştır (Alkrush ve ark., 2024). Bir diğer strateji ise veri merkezi operasyonlarının ve kaynak dağıtımının planlanmasıdır. İş planlaması, sanallaştırma ve enerji planlama gibi tesisatların veri merkezleri enerji dağıtımını düzenleyerek, su ayak izlerinin takip edilmesini sağlayacaktır (Sun ve ark., 2016; Hurson ve ark., 2016). Ayrıca, büyük veri analitiği ve bulut bilişim gibi gelişmiş veri yönetimi ve işleme tekniklerinin kullanımı, kaynak iletişimi optimize etme ve su tüketimi en az indirmeye yardımcı olabileceği savunulmuştur (Li ve ark., 2017; Yang ve ark., 2017; Sun ve ark., 2016). Su kullanım problemi ile karşı karşıya olan sistemler geri dönüştürülmüş veya tuzdan arındırılmış su gibi alternatif su kaynaklarını keşfetmesi mümkündür (Sîrbu ve Babaoğlu, 2015). Veri merkezi operatörleri ve su yönetimi politikaları arasındaki iş birliği, veri merkezi endüstrisi için sürdürülebilir su yönetiminin geliştirilmesine yardımcı olabilir. Sonuç olarak veri merkezlerinin su kullanımı ve maliyetleri, çok yönlü bir çalışmaya ihtiyaç duyulan bir alandır. Bu alan soğutma teknolojilerindeki gelişmeler, yenilenebilir enerji kullanımı ve sürdürülebilir su yönetimi sistemlerinin tasarlanması ile optime edilecektir.

2.3. Karbon Emisyonları

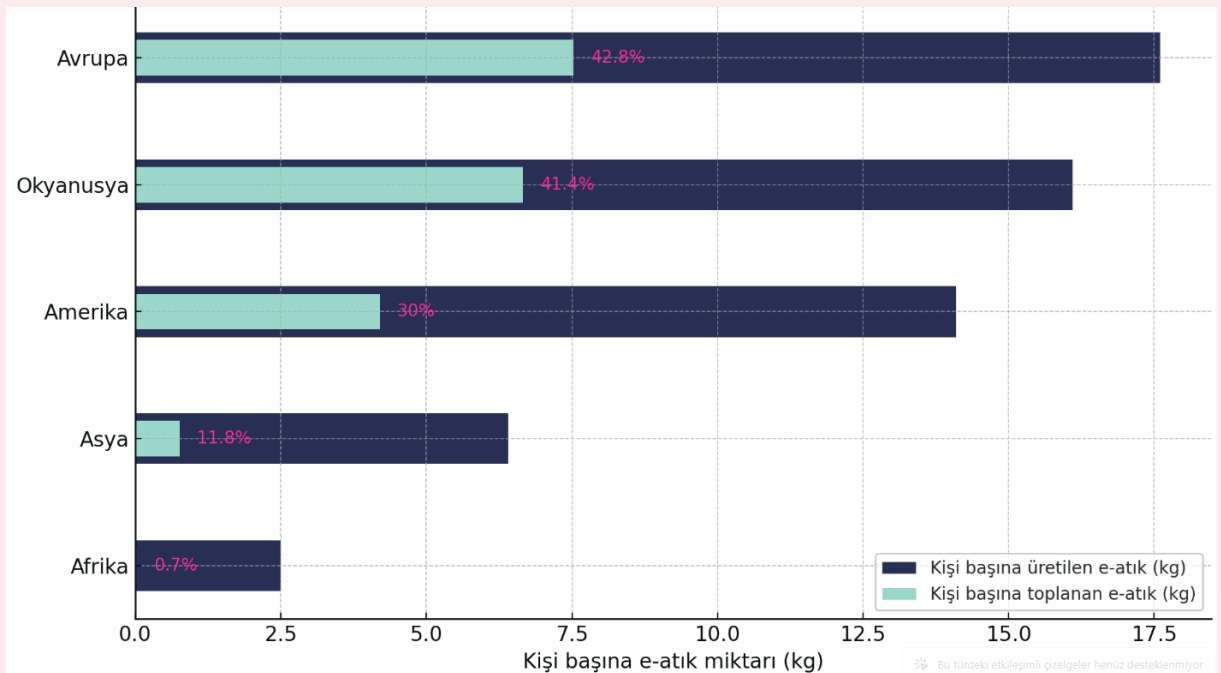
Yapay zeka ve karbon emisyonlarının kesişimi, karmaşık bir fırsat ve zorluk manzarası sunmaktadır. Bir yandan AI, süreçleri optimize ederek ve verimliliği artırarak çe-

şitli sektörlerde karbon ayak izlerini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Öte yandan AI eğitiminin ve dağıtımının enerji yoğun yapısı, bu teknolojilerle ilişkili karbon emisyonları konusunda endişelere yol açmaktadır. Gelişmiş yapay zeka modellerinin eğitimi önemli miktarda hesaplama kaynağı gerektirir ve bu da önemli miktarda elektrik tüketimine ve ilişkili karbon emisyonlarına yol açmaktadır (Desislavov, 2021). Araştırmalar, yapay zeka eğitiminin karbon ayak izinin hızla arttığını, bazı tahminlerin yaklaşık her 3-4 ayda bir emisyonların iki katına çıktığını göstermektedir (Gürsakal ve ark., 2022). Bu gelişme beraberinde yapay zeka gelişiminin sürdürülebilirliği hakkında kritik soruları gündeme getirmektedir (Xiao, 2023; Cows ve ark., 2021).

Yapay zeka ile bağlantılı karbon emisyonları yalnızca operasyonel taleplerinin bir yan ürünü değildir. Yapay zeka sistemlerinin veri merkezi operasyonlarından donanım için malzeme tedarikine kadar tüm yaşam döngüsü, genel karbon ayak izlerine katkıda bulunmaktadır (Bolte ve ark., 2022; Tamburrini, 2022). Örneğin yapay zeka altyapısı için değerli minerallerin çıkarılması, daha fazla çevresel bozulmaya yol açabilir ve yapay zekanın karbon emisyonlarıyla ilişkili zorlukları daha da artırabilir. Bu nedenle, yapay zeka çeşitli sektörlerde verimliliği artırma potansiyeline sahip olsa da, kendi çevresel maliyetleri dikkatlice yönetilmelidir. Bu zorlukları ele alan araştırmacılar yapay zekanın karbon ayak izini azaltmak için çeşitli stratejiler önerdiler. “Yeşil Yapay Zeka” kavramı, enerji verimliliği ve sürdürülebilirliğe öncelik veren ya-



Şekil 4. 2020-2023 Yılları arasında seçili makine öğrenimi modelleri ve gerçek yaşam örneklerinin CO₂ eşdeğer emisyonları (Stanford University, 2024)



Şekil 5. 2022 Yılında dünya genelinde üretilen ve toplanan e-atık miktarı (UNITAR, 2024).

pay zeka teknolojilerinin geliştirilmesini amaçlamaktadır (Schwartz ve ark., 2020). Bu yaklaşım, yalnızca etkili değil aynı zamanda çevre dostu algoritmaların oluşturulmasını savunmaktadır (Rolnick ve ark., 2022; Wang ve ark., 2023).

Stanford Üniversitesi'nin 2024 AI Endeksi Raporu'na göre, büyük dil modellerinin eğitimi sırasında ortaya çıkan karbon emisyonları büyük farklılıklar göstermektedir. Meta'nın Llama 2 70B modeli, eğitim sürecinde yaklaşık 291,2 ton karbon salınımına neden olmuş ve bu miktar, New York-San Francisco arasındaki bir gidiş-dönüş uçuşunda bir yolcunun saldıgı emisyonun yaklaşık 291 katına ve ortalama bir Amerikalının yıllık karbon salımının 16 katına denk gelmektedir. Bununla birlikte, Llama 2'nin emisyonları, OpenAI'nin GPT-3 modelinin eğitim sürecinde saldıgı 502 ton karbonun altında kalmaktadır. Geliştiriciler tarafından açıklanmayan bazı modellerin emisyon verileri ise bağımsız araştırmacılar tarafından tahmin edilmiştir. ►Şekil 4'te 2020-2023 yılları arasında seçili makine öğrenimi modelleri ve gerçek yaşam örneklerinin CO₂ eşdeğer emisyonları (ton) verilmiştir (Stanford University, 2024). Sonuç olarak, yapay zeka karbon emisyonlarını azaltma ve çeşitli sektörlerde sürdürülebilirliği artırma konusunda önemli bir vaat sunarken, kendi enerji tüketimiyle ilişkili çevresel maliyetleri ele almak ve planlamak önem arz etmektedir.

2.4. Elektronik Atık

Donanım üretimi ve kullanımıyla ilişkili karbon ayak izi, genel çevresel bozulmaya önemli bir katkıda bulunmaktadır (Krumay ve Brandtweiner, 2016). Donanımların kullanım ömrünün sonuna gelmesi, özellikle cihazlar uygunsuz şekilde geri dönüştürüldüğünde veya atıldığında, zararlı maddelerin çevreye salınmasına yol açmaktadır. E-atık, uygun şekilde yönetilmediği takdirde insan sağlığı ve çevre üzerinde zararlı etkilere sahip olabilen ağır metaller de dahil olmak üzere çeşitli zararlı organik ve inorganik bileşiklerden oluşmaktadır (Li, 2016). Ülkelerin politika olarak, geri dönüşüm ve bertaraf sisteminin olmaması, atılan elektronik cihazlardaki birçok toksik maddenin toprağa ve su sistemlerine sızabilmesi nedeniyle e-atıkların çevresel etkisini daha da kötüleştirmektedir (Zhou ve ark., 2014; Zhang ve ark., 2015). Kapsamlı geri dönüşüm ağlarının kurulması, bu etkileri azaltmak ve e-atıkların güvenli bir şekilde işlenmesini teşvik etmek için çok önemlidir (Zu ve ark., 2012; Xu ve ark., 2019; Gupta ve ark., 2021; Ahmad İbrahim ve ark., 2022). Atık yönetimi açısından, e-atık geri dönüşümünü çevreleyen mevcut uygulamalar genellikle yetersizdir. E-atıkların önemli bir kısmı ya çöplüklere gönderiliyor ya da çevresel güvenlik standartlarına uymayan gayri resmi geri dönüşüm süreçleriyle yönetilmektedir (Ardito ve ark., 2015; Othman ve ark., 2015; Kumar ve Dahyalal 2014). 2024 Küresel E-Atık İzleme (Global E-waste Monitor - GEM) Raporu'na göre, dünya genelindeki elektronik atık (e-atık) üretimi, belgelenen e-atık geri dönüşüm oranından beş kat daha hızlı artmaktadır. UNITAR (United Nations Institute for Training and Research – UNITAR) tarafından yayımlanan rapora göre, 2022 yılında üreti-

len 62 milyon ton e-atık, yaklaşık 1,55 milyon 40 tonluk kamyon dolduracak büyüklüktedir. Bu, ekvator çevresinde tampon tampona bir hat oluşturacak kadar kamyon anlamına gelmektedir ve e-atık yönetiminin küresel boyuttaki aciliyetini vurgulamaktadır (UNITAR, 2024).

Dünya genelinde üretilen ve geri toplanan elektronik atık miktarı, bölgesel ve küresel ölçekte önemli farklılıklar göstermektedir. ►Şekil 5'te Bölgesel bazda e-atık üretimi ve geri dönüşüm oranları verilmiştir. Şekile göre Avrupa, kişi başına 17,6 kg e-atık üretimiyle en fazla e-atık üreten bölge olup, bunun 7,53 kg'ı geri toplanarak %42,8'lik bir geri dönüşüm oranına ulaşmıştır. Afrika ise kişi başına 2,5 kg ile en az e-atık üreten bölge olmasına rağmen, geri dönüşüm oranı sadece %0,7 (0,018 kg) seviyesinde kalmıştır. Bu bulgular, bölgesel geri dönüşüm altyapısındaki yetersizlikleri ve küresel e-atık yönetiminde karşılaşılan ciddi zorlukları ortaya koymakta, e-atıkların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için acil önlemler alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

3. Sürdürülebilir Stratejiler ve Öneriler

3.1. Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu

Yenilenebilir enerji kaynaklarının veri merkezlerine entegre edilmesi, sürdürülebilirliği artırmak ve bu tesislerin çevresel etkisini azaltmak için kritik bir strateji olarak kabul edilmektedir. Veri merkezleri, soğutma sistemleri için kullanılan yüksek enerji tüketimleriyle dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, karbon emisyonlarını azaltmak ve enerji verimliliğini teşvik etmek için önemli bir adımdır (Kang ve ark., 2018; Peng ve ark., 2022; Wang ve Tang, 2022). Yenilenebilir enerjiyi veri merkezlerine entegre etmenin temel motivasyonlarından biri, operasyonel karbon ayak izlerinde önemli bir azalmanın yaşanmasını sağlayacaktır. Osibo çalışmasında, geleneksel güç kaynaklarından rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin hızlı bir şekilde olması gerekliliğini vurgulamıştır (Osibo ve Adamo, 2023). Bu geçiş yalnızca veri merkezlerinin acil enerji taleplerini karşılamakla kalmayarak, aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı en aza indirerek daha geniş sürdürülebilirlik hedefleriyle de uyumlu hale gelmesini sağlayacaktır. Austen'in çalışmasında belirttiği gibi yeşil teknolojilerin benimsenmesi, bu teknolojilerin karbondioksit emisyonlarını azaltmaya ve genel enerji verimliliğini iyileştirmeye yardımcı olması nedeniyle veri merkezlerinin uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak için çok önemlidir (Austen ve Subroto, 2023).

Veri merkezlerinin operasyonel dinamikleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanan gelişmiş enerji yönetim stratejileriyle optimize edilebilir. Örneğin, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin uygulanmasının, veri merkezlerindeki güç kaynağının istikrarını ve güvenliğini artırırken karbon emisyonlarını azaltacaktır (He ve ark., 2023; He ve ark., 2024). Hidrojen bazlı enerji depolama sistemlerinin kullanımı, yenilenebilir enerji için

tutarlı bir güç kaynağı sağlayabilir (Celestine ve ark., 2021; Oró ve ark., 2015). Bu, özellikle veri merkezlerinin enerji çıktılarının enerji depolama çözümleriyle birlikte entegrasyonunun optimize edilmesi nedeniyle önemlidir (Yang ve ark., 2019).

Yapay zeka destekli enerji yönetim sistemleri gibi yenilikçi yaklaşımlar veri merkezlerinin verimliliğini daha da artırabilir. Yapay zeka teknolojileri akıllı enerji kullanımını kolaylaştırabilir ve enerji dönüşüm verimliliğini iyileştirebilir, böylece geleneksel veri merkezlerini yeşil bulut platformlarına dönüştürebilir. Bu entegrasyon yalnızca enerji tüketimini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda veri merkezlerinin genel performansını da iyileştirerek enerji tedarikindeki dalgalanmalara karşı daha dayanıklı hale getirecektir (Bouaouda ve ark., 2024). Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının veri merkezlerine entegrasyonu yalnızca bir trend değil, dijital çağda sürdürülebilirliğe ulaşmak için bir zorunluluktur. Kapsamlı enerji yönetimi stratejileri benimseyerek, gelişmiş teknolojilerden yararlanarak ve operasyonel uygulamaları optimize ederek veri merkezleri güvenilir ve verimli hizmet sunumunu garanti ederken çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltabilir.

3.2. Politikalar ve Yönetmelikler

Uluslararası düzenlemelerin yapay zeka ve çevresel yükümlülükler üzerindeki etkisi, ulusların teknolojik ilerlemeyi sürdürülebilirlikle dengelemeye çalışması nedeniyle kritik bir çalışma alanıdır. Yapay zekanın çeşitli sektörlerde, özellikle enerji ve çevre yönetimine entegrasyonu, bu teknolojilerin sunduğu fırsatları ve zorlukları ele alabilecek sağlam bir düzenleyici çerçeve gerektirir. Etkili düzenlemenin temel yönlerinden biri, hesap verebilirliği ve sürdürülebilirliği sağlarken yapay zekanın çeşitli uygulamalarını barındıran uyumlu bir yaklaşıma duyulan ihtiyaçtır. Zhao ve Fariñas (2022), titiz kurumsal politikalarla desteklenen proaktif bir düzenleyici çerçevenin AI ile ilişkili sürdürülebilirlik zorluklarını ele almak için gerekli olduğunu savunmaktadır. Bu bakış açısı, AI'nin çevresel etkilerini anlamak için bütünsel bir yaklaşımın önemini vurgulayan ve sorumlu inovasyon ve dağıtım uygulamalarını savunan Naeeni tarafından da desteklenmektedir (Naeeni ve Nouhi, 2023). Bu tür çerçeveler yalnızca teknolojik yönle odaklanmamalı, aynı zamanda etik hususları ve toplumsal etkileri de içermelidir. Oladoyinbo ve diğerleri (2024), AI uygulamalarını toplumsal değerlerle uyumlu hale getiren uyarlanabilir düzenleyici çerçevelere olan ihtiyaçı vurgulamaktadır.

Avrupa Birliği (AB), AI ve çevresel sürdürülebilirliğin kesişimini ele alan politikaların geliştirilmesinde ön safarda yer almıştır. Perucica ve Andjelković (2022), AI ve çevre politikaları arasındaki karşılıklı bağımlılığa yönelik kapsamlı yaklaşımların gerekliliğini tartışmakta ve mevcut AB düzenlemelerinin AI dönemi için yeterli olup olmadığını sorgulamaktadır. Bu, AB'nin yenilenebilir enerji hedeflerini karşılamayı ve AI teknolojilerini enerji sistemlerine entegre etmeyi amaçlaması nedeniyle özellikle önemlidir. Aderibigbe'nin (2023), belirttiği gibi, AI'nin enerji verimliliğini ve yönetimini geliştirme po-

tansiyeli önemlidir. Aderibigbe, elektrik talebi tahmininde makine öğreniminin rolünü ve düzenleyici çerçeveler için etkilerini vurgulamaktadır. Ayrıca, düzenleyici ortam teknolojik gelişmelerle uyum sağlamak için sürekli olarak gelişmelidir. Rojek (2023), veri gizliliği, önyargı ve siber güvenlik gibi zorlukların ele alınmasının, enerji piyasalarındaki yapay zeka dönüşümlerinin tüm paydaşlar için faydalı olmasını sağlamak için kritik öneme sahip olduğunu belirtmektedir. Bu dinamik düzenleyici ortam, çevresel ve toplumsal çıkarları korurken inovasyonu teşvik etmek için elzemdir. Düzenleyici çerçevelere ek olarak, politika yapıcılar, endüstri liderleri ve araştırmacılar dahil olmak üzere çeşitli paydaşlar arasında iş birliğine acil ihtiyaç vardır. Cows ve diğerleri (2021), iklim değişikliğiyle mücadelede yapay zekayı kullanmada AB'nin liderlik etme potansiyelini vurgulayarak, yapay zekanın fırsatlarından yararlanırken çevresel etkisini azaltmaya yönelik öneriler sunmaktadır. Bu iş birlikçi yaklaşım, enerji sektöründe yapay zeka ve nesnelerin interneti teknolojilerinin başarılı bir şekilde entegre edilmesini sağlamada net düzenleyici çerçevelerin ve iş gücü geliştirilmenin önemini tartışan Mallipedi tarafından da desteklenmektedir (Mallipedi, 2022). Sonuç olarak, uluslararası düzenlemelerin, yapay zekanın ve çevresel yükümlülüklerin kesişimi hem zorluklar hem de fırsatlar sunmaktadır. AI teknolojilerinin sürdürülebilirlik hedeflerine olumlu katkıda bulunmasını sağlamak için kapsamlı ve uyarlanabilir bir düzenleyici çerçeve esastır. İş birliğini teşvik ederek ve etik hususları düzenleyici uygulamalara entegre ederek, paydaşlar iklim değişikliği ve çevresel bozulmanın acil zorluklarını ele alırken sürdürülebilir kalkınmayı yönlendirmek için AI'nin potansiyelinden yararlanabilirler.

3.3. Şeffaflık ve Raporlama

Yapay zekanın karbon ve enerji maliyetlerinin düzenli olarak raporlanması, teknolojik ilerlemeyi çevresel sürdürülebilirlikle dengelemek için giderek daha da önemli hale gelmektedir. Yapay zekanın çevresel etkisini değerlendirmedeki temel zorluklardan biri, karbon ve enerji maliyetlerinin raporlanmasında şeffaflığa ihtiyaç duyulmasıdır. Naeeni ve Nouhi (2023), yapay zeka teknolojilerinin geniş ekolojik ayak izinin dikkate alınmasının önemini vurgulamıştır. Kuruluşların yapay zeka operasyonlarıyla ilişkili enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını doğru bir şekilde yansıtan kapsamlı raporlama uygulamaları benimsemelerinin gerekliliğinin altını çizmiştir. Villiers ve diğerleri (2023), yapay zekanın büyük miktarda veriyi analiz ederek, insanların ayırt etmesinin zor olduğu içgörüler sağlayarak sürdürülebilirlik raporlamasını nasıl artırabileceğini sorgulamıştır. Bu yetenek, yönetim bilgi sistemlerini önemli ölçüde iyileştirebilir ve kuruluşların çevresel etkilerini daha etkili bir şekilde raporlamasını sağlayabilir. Sürdürülebilirlik raporlamasında yapay zekanın kullanımı daha doğru açıklamalara yol açabilir ve böylece kurumsal uygulamalarda daha fazla hesap verebilirlik ve şeffaflık teşvik edilebilir. Yapay zeka teknolojileriyle ilişkili karbon emisyonlarının niceliklendirilmesi de önemlidir. Lacoste ve diğerleri (2019), büyük ölçekli yapay zeka modellerinin eğitiminin ener-

ji maliyetlerine ilişkin içgörüler sunarak, yapay zekanın çevresel etkilerine yönelik geniş araştırmalara ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır.

“Yeşil Yapay Zeka” kavramı, yapay zekanın oluşturduğu çevresel zorluklara bir yanıt olarak ortaya çıkmıştır. Schwartz ve diğerleri (2020), karbon ayak izini azaltmak için yapay zeka araştırmalarında verimlilik yaratılmasını savunarak, derin öğrenmenin önemli finansal kaynaklara sahip olanlarla sınırlı olmaması gerektiğini ileri sürmektedir. Bu yaklaşım, AI gelişiminin sürdürülebilir olması gerektiği ve kuruluşların çevresel etkileri azaltma çabaları hakkında rapor vermesi gerektiği yönündeki artan kabul uyumludur. Ayrıca, AI’nın karbondioksit giderme (Carbon Dioxide Removal - CDR) teknolojileriyle entegrasyonu, kuruluşlara karbon emisyonlarını en aza indirirken enerji sistemlerini optimize etme fırsatı sunacaktır. Li ve diğerleri (2024), AI’nın doğru karbon emisyonu değerlendirmelerini ve CDR tesislerinin gerçek zamanlı izlenmesini nasıl kolaylaştırabileceğini ve bunun çevresel etkilerin raporlanmasında şeffaflığı nasıl artırabileceğini tartışmıştır. Bu entegrasyon, daha bilinçli karar almaya ve iyileştirilmiş sürdürülebilirlik sonuçlarına yol açacaktır.

3.4. Etmen Tabanlı Sistemlerle Sürdürülebilir Yapay Zekâ Uygulamaları

Çoklu etmen tabanlı sistemler (multi-agent systems), çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada yapay zekâ uygulamaları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu sistemler, birbirinden bağımsız ancak etkileşim hâlinde çalışan yazılım birimlerinin, belirli amaçlar doğrultusunda kendi kararlarını alabilmesini ve çevreleriyle iş birliği kurarak sistem düzeyinde bütünsel çıktılar üretmesini sağlamaktadır. Etmen tabanlı yaklaşımlar, enerji yönetimi, atık azaltımı ve çevresel izleme gibi alanlarda sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.

Zhang ve arkadaşları (2023), düşük karbonlu talep yönetimi için çoklu etmenli güvenli pekiştirmeli öğrenme (Multi-Agent Safe Reinforcement Learning) yöntemini kullanarak, dağıtım ağlarında karbon emisyonlarını azaltmayı hedefleyen bir çerçeve geliştirmiştir. Bu çalışma, esnek yüklerin kontrolü ve karbon emisyonlarının sınırlandırılması konularında önemli katkılar sunmaktadır. Bayer ve Pruckner (2023), binaların ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak amacıyla çoklu etmenli pekiştirmeli öğrenme (Multi-Agent Reinforcement Learning) yöntemini uygulamışlardır. Bu yaklaşım, enerji tasarrufu sağlarken kullanıcı konforunu da artırmayı hedeflemektedir. Qian ve arkadaşları (2023), kentsel planlamada paydaş dinamiklerini yönlendirmek için çoklu etmenli pekiştirmeli öğrenme (Multi-Agent Reinforcement Learning) tabanlı bir çerçeve önermiştir. Bu çerçeve, arazi kullanım kararlarını optimize ederek sürdürülebilir kentsel gelişimi desteklemektedir. Bu çalışmalar, etmen tabanlı sistemlerin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada nasıl etkili bir araç olabileceğini göstermektedir. Gelecekte, bu sistemlerin daha geniş alanlarda uygulanması ve performanslarının nicel ölçütlerle değerlendirilmesi,

sürdürülebilir yapay zekâ uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

4. Sonuç ve Tartışma

Yapay zeka teknolojileri, yalnızca ekonomik kalkınmanın değil aynı zamanda çevresel ve toplumsal dönüşümün de itici gücü haline gelmiştir. Bu çalışmada, yapay zekanın çevresel etkileri dört temel boyutta “enerji tüketimi, su kullanımı, karbon emisyonları ve elektronik atık üretimi” ele alınmış; bu etkilerin birbirine bağlı yapıları ve çok katmanlı sonuçları literatür temelinde sistematik biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, yapay zekanın çevresel ayak izinin giderek büyüyen ve küresel sürdürülebilirlik çabalarını doğrudan etkileyen bir sorun haline geldiğini göstermektedir. Özellikle büyük dil modelleri gibi kaynak yoğun algoritmaların geliştirilmesi ve uygulanması, enerji ve su tüketimini hızla artırmakta; bu durum, veri merkezlerinin enerji altyapısı ve su ekosistemleri üzerindeki baskısını artırarak çevresel sürdürülebilirliği tehdit etmektedir.

Bu bağlamda, yapay zekanın çevresel etkilerinin yalnızca teknoloji üretimi aşamasında değil, tüm yaşam döngüsü boyunca dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Donanım üretimi için gereken nadir toprak elementleri ve enerji yoğun üretim süreçleri, elektronik atık üretiminin ötesinde doğal kaynakların tükenmesine ve çevresel bozulmaya neden olmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde yetersiz geri dönüşüm altyapısı nedeniyle elektronik atıkların düzensiz bertarafı, çevre kirliliğini ve halk sağlığı risklerini artırmaktadır. Stanford AI Index (2024) verileri gibi güncel ampirik bulgular, yapay zeka modellerinin eğitim süreçlerinde oluşan karbon salımlarının, bireysel karbon ayak izlerini kat kat aşan düzeylere ulaştığını göstermektedir. Meta’nın Llama 2 ya da OpenAI’nin GPT serisi gibi modellerin eğitiminde açığa çıkan binlerce ton karbon salımı, bu teknolojilerin çevresel etkilerinin yalnızca soyut değil, somut ve ölçülebilir nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapay zeka sistemlerinin enerji verimliliği sağlayan algoritmalar yoluyla enerji tüketimini optimize etme potansiyeli, bu teknolojinin çevresel açıdan ikili bir doğaya sahip olduğunu göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, yapay zeka hem bir sorun kaynağı hem de çözüm aracı olabilir. Bu çelişkili konum, politika yapımcılar, özel sektör, teknoloji geliştiriciler ve akademik çevreler için karmaşık ancak kaçınılmaz bir sorumluluğu da beraberinde getirmektedir. Goudarzi ve arkadaşlarının (2019) bina enerji tüketimi üzerine geliştirdiği yapay zeka modelleri, enerjiyi daha verimli kullanma potansiyelini kanıtlarken; Li ve arkadaşlarının (2023) su ayak izi analizleri, bu teknolojinin görünmeyen çevresel maliyetlerini ifşa etmiştir. Bu durum, teknolojik inovasyonun yalnızca “ilerleme” olarak algılanmaması gerektiğini, aynı zamanda çevresel sorumluluklar ve etik yükümlülüklerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Yapılan analizler, sürdürülebilir yapay zeka gelişimi için

çok aktörlü ve çok katmanlı stratejilerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özellikle veri merkezlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu, enerji arz güvenliği ile çevresel etki arasında denge kurmak açısından önemlidir. Buna ek olarak, algoritmaların geliştirildiği erken aşamalarda çevresel etki kriterlerinin gözetilmesi, “yeşil yapay zeka” yaklaşımının kurumsallaşması açısından önem arz etmektedir. Yapay zekaya ilişkin çevresel verilerin şeffaf biçimde raporlanması da büyük önem taşımaktadır. Lacoste ve arkadaşlarının (2019) önerdiği gibi, büyük yapay zeka projeleri için karbon izleme ve raporlama uygulamaları zorunlu hale getirilmelidir. Bu tür düzenlemeler, yalnızca çevresel farkındalığı artırmakla kalmaz, aynı zamanda kamuoyunun ve politika yapıcıların bilinçli kararlar almasını mümkün kılar.

Bu çalışma, yapay zekanın çevresel etkilerini çok boyutlu olarak ele alsa da, bazı sınırlılıklar doğrultusunda gelecekte yapılacak araştırmalar için önemli açılımlar sunmaktadır. Öncelikle, ampirik veri eksikliği ve literatüre dayalı analizlerin ağırlığı, yerel ve sektörel düzeyde saha çalışmaları yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Gelecek araştırmalarda, yapay zeka uygulamalarının belirli sektörlerdeki (örneğin tarımda akıllı sulama sistemleri, ulaşımda filo optimizasyonu veya akıllı şehir sistemlerinde enerji yönetimi gibi) çevresel etkilerinin nicel ölçümlerle analiz edilmesi, daha spesifik ve uygulanabilir sonuçlara ulaşılmasını sağlayabilir. Ayrıca, yapay zeka sistemlerinin tüm yaşam döngüsünü dikkate alan yaşam döngüsü analizleri (LCA) ile karbon, su ve e-atık ayak izlerinin kıyaslamalı biçimde değerlendirilmesi, çevresel etkilerin daha bütüncül bir şekilde anlaşılmasına katkı sunacaktır. Bunun yanı sıra, gelecek çalışmalarda “Yeşil Yapay Zeka” prensiplerinin algoritma geliştirme süreçlerine nasıl entegre edilebileceği ve bu süreçlerin etik, ekonomik ve operasyonel açılardan nasıl optimize edilebileceği üzerine daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Buna paralel olarak, gelecek dönemlerde politika geliştirme süreçlerinde çevresel sürdürülebilirliği önceliklendiren yaklaşımların benimsenmesi önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda, yapay zeka teknolojilerinin çevresel etkilerini sınırlamak amacıyla yasal düzenlemelerin güçlendirilmesi, çevresel kriterlerin algoritma tasarım süreçlerine entegre edilmesini teşvik edecek stratejilerin oluşturulması gereklidir. Özellikle enerji ve su tüketimi açısından yüksek kaynak talebi oluşturan yapay zeka modelleri için karbon vergilendirme gibi ekonomik araçların devreye alınması, çevre dostu yaklaşımların yaygınlaşmasını destekleyebilir. Ayrıca, ülkeler arası veri paylaşımı ve standardizasyon süreçlerinin uluslararası iş birlikleri aracılığıyla kurumsallaştırılması, küresel ölçekte sürdürülebilir yapay zeka ekosistemlerinin oluşturulmasına katkı sunacaktır. Bu kapsamda, çok paydaşlı platformların geliştirilmesi ve disiplinler arası ortak araştırma merkezlerinin kurulması da hem bilimsel hem de uygulamaya

yönelik açılımlar açısından kritik rol oynayacaktır.

Sonuç olarak, yapay zekanın çevresel etkilerini anlamak ve yönetmek, yalnızca bilimsel bir zorunluluk değil, aynı zamanda etik bir sorumluluktur. Bu bağlamda, teknoloji üreticileri, kamu politikası geliştiricileri ve araştırma kurumları arasında güçlü bir iş birliği ve sürekli diyalog gereklidir. Yapay zeka teknolojileri, doğru biçimde yönlendirildiğinde, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunan güçlü bir araca dönüşebilir. Ancak bu dönüşüm, yalnızca teknik çözümlerle değil; aynı zamanda hesap verebilirlik, düzenleme ve bilinçli kullanım ile mümkündür. Bu çalışma, hem mevcut durumun kapsamlı bir analizini sunarak literatüre katkı sağlamakta hem de yapay zekanın sürdürülebilir geleceğini inşa etmeye yönelik çok boyutlu stratejilerin geliştirilmesi için bir temel oluşturmaktadır. Geleceğin yapay zekası, yalnızca daha akıllı değil, aynı zamanda daha sorumlu ve daha sürdürülebilir olmak zorundadır.

Araştırma Etikleri / Research Ethics

Uygulanamaz.

Yazar Katkıları / Author Contributions

Kavramsallaştırma / *Conceptualization*: [Tülay Turan / Gökhan Turan / İbrahim Kırbaş], Metodoloji / *Methodology*: [Tülay Turan / Gökhan Turan / İbrahim Kırbaş], Formal Analiz / *Formal Analysis*: [Tülay Turan / Gökhan Turan / İbrahim Kırbaş], Araştırma / *Investigation* : Kaynaklar / *Resources*: [Tülay Turan / Gökhan Turan / İbrahim Kırbaş], Yazım - İlk Taslak Hazırlığı / *Writing - Original Draft Preparation* : [Tülay Turan / Gökhan Turan / İbrahim Kırbaş], Yazım - Gözden Geçirme ve Düzenleme / *Writing - Review & Editing* : [Tülay Turan / İbrahim Kırbaş], Görselleştirme / *Visualization*: [Tülay Turan / Gökhan Turan], Denetim / *Supervision* : [Tülay Turan / İbrahim Kırbaş], Proje Yönetimi / *Project Administration*: [-], Fon Sağlama / *Funding Acquisition* : [-]

Çıkar Çatışmaları / Competing Interests

Yazar(lar) çıkar çatışması olmadığını belirtmiştir(ler).

Araştırma Fonlaması / Research Funding

Bildirilmedi.

Veri Erişilebilirliği / Data Availability

Uygulanamaz.

Hakem Değerlendirmesi / Peer-review

Dış hakemler tarafından değerlendirildi.

Orcid

Tülay Turan  <https://orcid.org/0000-0002-0888-0343>

Gökhan Turan  <https://orcid.org/0000-0002-9698-8986>

İbrahim Kırbaş  <https://orcid.org/0000-0002-5560-638X>

Kaynakça

Aderibigbe, A. O., Ani, E. C., Ohenhen, P. E., Ohalet, N. C., Daraojimba, D. O. (2023). Enhancing energy efficiency with AI: A review

of machine learning models in electricity demand forecasting. *Engineering Science Technology Journal*, 4(6), 636–645. <https://>

- doi.org/10.51594/estj.v4i6.636
- Adewumi, A., Okoli, C. E., Usman, F. O., Olu-Lawal, K. A., Soyombo, O. T. (2024). Reviewing the impact of AI on renewable energy efficiency and management. *International Journal of Science and Research Archive*, 11(1), 1518–1527. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.11.1.0245>
- Ahmad Ibrahim, S. R., Yahaya, J., Sallehudin, H. . (2022). Green software process factors: A qualitative study. *Sustainability*, 14(18), 11180. <https://doi.org/10.3390/su141811180>
- Albers, S. (2019). Sustainable data centers: Balancing energy and water usage. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 4(2), 145–157. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2897700>
- Ali, S., Choi, B. (2020). State-of-the-art artificial intelligence techniques for distributed smart grids: a review. *Electronics*, 9(6), 1030. <https://doi.org/10.3390/electronics9061030>
- Alkrush, A. A., Salem, M. S., Abdelrehim, O., Hegazi, A. A. (2024). Data Centers Cooling: A Critical Review of Techniques, Challenges, and Energy Saving Solutions. *International Journal of Refrigeration*.
- Ardito, L., Procaccianti, G., Torchiano, M., Vetro, A. Understanding green software development: A conceptual framework. *IT Professional*, 17(4), 16–23. <https://doi.org/10.1109/mitp.2015.16>
- Austen, K. (2023). The thirsty future of artificial intelligence. *Nature*, 603(7901), 366–369. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00540-1>
- Austen, M. F., Subroto, A. (2023). Enabling practical decision making for sustainable green data center planning. *Jurnal Ekonomi*, 28(2), 1–15. <https://doi.org/10.24912/je.v28i2.1540>
- Azmi, F., Saleh, A. (2024). Utilizing machine learning techniques for power estimation in residential electricity consumption. *International Journal of Research and Review*, 11(6), 326–333. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20240637>
- Bahrami, M., Khashroum, Z. (2023). Review of machine learning techniques for power electronics control and optimization. *CR-PASE*, 9(3), 1–8. <https://doi.org/10.61186/crpase.9.3.2860>
- Basmadjian, R., De Meer, H., Lent, R., Giuliani, G. (2015). Cloud computing and its interest in saving energy: The use case of a private cloud. *Journal of Cloud Computing*, 4(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s13677-015-0032-4>
- Bayer, F. M., Pruckner, M. (2023). Multi-agent reinforcement learning for sustainable building climate control. *arXiv preprint arXiv:2309.06940*. <https://arxiv.org/abs/2309.06940>
- BBC News. (2024). The environmental challenges of AI. BBC News Science Technology. Erişim tarihi: 20 Aralık 2024, <https://www.bbc.com>
- Biglari, A., Tang, W. (2023). A review of embedded machine learning based on hardware, application, and sensing scheme. *Sensors*, 23(4), 2131. <https://doi.org/10.3390/s23042131>
- Bolte, L., Vandemeulebroucke, T., Wynsberghe, A. (2022). From an ethics of carefulness to an ethics of desirability: Going beyond current ethics approaches to sustainable AI. *Sustainability*, 14(8), 4472. <https://doi.org/10.3390/su14084472>
- Bouaouda, A., Afdel, K., Abounacer, R. (2024). Unveiling genetic reinforcement learning (GRLA) and hybrid attention-enhanced gated recurrent unit with random forest (HAGRU-RF) for energy-efficient containerized data centers empowered by solar energy and AI. *Sustainability*, 16(11), 4438. <https://doi.org/10.3390/su16114438>
- Celestine, A. D. N., Sulic, M., Wieliczko, M., Stetson, N. T. (2021). Hydrogen-based energy storage systems for large-scale data center applications. *Sustainability*, 13(22), 12654. <https://doi.org/10.3390/su132212654>
- Chavali, D., Baburajan, B., Gurusamy, A., Dhiman, V. K., Katari, S. C. (2024). Regulating artificial intelligence: Developments and challenges. *International Journal of Pharmaceutical Science*, 2(3), 1250–1261.
- Chen, T., Wang, X., Giannakis, G. B. (2015). Cooling-aware energy and workload management in data centers via stochastic optimization. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10(2), 402–415.
- Cowls, J., Tsamados, A., Taddeo, M., Floridi, L. (2021). The AI gambit: Leveraging artificial intelligence to combat climate change—Opportunities, challenges, and recommendations. *AI Society*, 38(1), 283–307. <https://doi.org/10.1007/s00146-021-01294-x>
- Dayarathna, M., Wen, Y., Fan, R. (2016). Data center energy consumption modeling: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(1), 732–794. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2481183>
- Desislavov, R. (2021). Compute and energy consumption trends in deep learning inference. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2109.05472>
- Ferreira, L. L., Dupont, C., Stolf, P., Da Costa, G., Pierson, J. M. (2019). Towards energy-efficient, thermal-aware scheduling in data centers. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 23, 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2019.08.003>
- George, A. S., George, A. H., Martin, A. G. (2023). The environmental impact of ai: A case study of water consumption by chat gpt. *Partners Universal International Innovation Journal*, 1(2), 97–104.
- Ghamkhari, M., Mohsenian-Rad, H., Mohsenian-Rad, A. (2017). Optimal integration of renewable energy resources in data centers with behind-the-meter renewable generator. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 625–636. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2623678>
- Goudarzi, S., Anisi, M., Kama, N., Doctor, F., Soleymani, S., Sangaiah, A. (2019). Predictive modelling of building energy consumption based on a hybrid nature-inspired optimization algorithm. *Energy and Buildings*, 196, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.031>
- Gupta, U., Kim, Y. G., Lee, S., Tse, J., Lee, H. H. S., Wei, G. Y., Wu, C. J. (2021). Chasing carbon: The elusive environmental footprint of computing. *2021 IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA)*. <https://doi.org/10.1109/hpca51647.2021.00076>
- Gürsakal, N., Çelik, S., Batmaz, B. (2022). Problems and opportunities of artificial intelligence. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, 13(1), 203–225. <https://doi.org/10.54688/ayd.1104830>
- Hamid, M., Ganne, A. (2023). Artificial intelligence in energy markets and power systems. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. <https://doi.org/10.56726/irjmet35943>
- Hassan, Q., Sameen, A., Salman, H., Al-Jiboory, A., Jaszczur, M. (2023). The role of renewable energy and artificial intelligence towards environmental sustainability and net zero. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2970234/v1>
- He, W., Xu, Q., Zhao, S., Liu, S., Li, H. (2023). Performance analysis of data centers applying hybrid renewable energy power systems. *Energy Proceedings*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-10347>
- He, W., Xu, Q., Guo, R., Liu, S., Wang, Y., Guo, H., Jin, S. (2024). Com-

- parative performance analysis of two hybrid energy systems for data centers with different replenishment energy sources. *Energy Proceedings*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-11223>
- Hurson, A., Sarvestani, S., Wisely, M. (2016). Energy-aware virtual machine placement in cloud data centers. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 11, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2016.03.001>
- International Energy Agency. (2024). Electricity 2024: Executive summary. IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/electricity-2024/executive-summary>.
- International Telecommunication Union (ITU) United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). (2024). Global E-Waste Monitor 2024: Electronic waste rising five times faster than documented e-waste recycling. Retrieved from <https://unitar.org/about/news-stories/press/global-e-waste-monitor-2024-electronic-waste-rising-five-times-faster-documented-e-waste-recycling>.
- Kang, D. K., Yang, E. J., Youn, C. H. (2018). Deep learning-based sustainable data center energy cost minimization with temporal MACRO/MICRO scale management. *IEEE Access*, 7, 28888–28899. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2888839>
- Krumay, B., Brandtweiner, R. (2016). Measuring the environmental impact of ICT hardware. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 11(6), 1064–1076. <https://doi.org/10.2495/sdp-v11-n6-1064-1076>
- Kumar, R., Dahyalal, S., (2014). Review: Current status of recycling of waste printed circuit boards in India. *Journal of Environmental Protection*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.51002>
- Kumar, R., Khatri, S., Diván, M. (2022). Optimization of power consumption in data centers using machine learning based approaches: a review. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (Ijece)*, 12(3), 3192. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp3192-3203>
- Kummu, M., Guillaume, J. H., de Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., Ward, P. J. (2016). The world's road to water scarcity: Shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports*, 6(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/srep38495>
- Lacoste, A., Luccioni, A., Schmidt, V., Dandres, T. (2019). Quantifying the carbon emissions of machine learning. arXiv preprint arXiv:1910.09700. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1910.09700>
- Li, D. (2016). Review of recycling and processing of waste electronic equipment. *Proceedings of the 2016 International Conference on Electronics, Mechanical Engineering and Computer Science*. <https://doi.org/10.2991/icemct-16.2016.219>
- Li, G., Luo, T., Liu, R., Song, C., Zhao, C., Wu, S., Liu, Z. (2024). Integration of carbon dioxide removal (CDR) technology and artificial intelligence (AI) in energy system optimization. *Processes*, 12(2), 402. <https://doi.org/10.3390/pr12020402>
- Li, P., Yang, J., Islam, M. A., Ren, S. (2023). Making AI less “thirsty”: Uncovering and addressing the secret water footprint of AI models. *arXiv preprint arXiv:2304.03271*.
- Li, X., Zhuang, Y., Yang, S. X. (2017). Cloud computing for big data processing. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 23(4), 545–546.
- Liu, J., Yu, Q., Y. Y., Yang, Z. (2022). Can artificial intelligence improve the energy efficiency of manufacturing companies? Evidence from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2091. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042091>
- M, S., Alam, M. M., Hossain, M. S., Andersson, K. (2022). Sustainable data centers: A systematic review of energy and water efficiency techniques. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 33, 100623. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100623>
- Mallipeddi, R. (2022). Harnessing AI and IoT technologies for sustainable business operations in the energy sector. *Asia Pacific Journal of Energy and Environment*, 9(1), 735–749. <https://doi.org/10.18034/apjee.v9i1.735>
- Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Naeeni, S.K., Nouhi, N. (2023). The environmental impacts of AI and digital technologies. *Aitechbesosci*, 1(4), 3–15. <https://doi.org/10.61838/kman.aitech.1.4.3>
- Nishant, R., Kennedy, M., Corbett, J. (2020). Artificial intelligence for sustainability: Challenges, opportunities, and a research agenda. *International Journal of Information Management*. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102104>
- Oladoyinbo, T. O., Olabanji, S. O., Olaniyi, O. O., Adebisi, O. O., Okunleye, O. J., Ismaila Alao, A. (2024). (2024). Exploring the challenges of artificial intelligence in data integrity and its influence on social dynamics. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, 18(2), 1–10. <https://doi.org/10.9734/ajarr/2024/v18i2601>
- Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O., Sikhakhane, Z. Q. (2024). Reviewing the role of artificial intelligence in energy efficiency optimization. *Engineering Science Technology Journal*, 5(4), 1243–1256. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i4.1015>
- OpenAI. (2024). Training large language models and their environmental costs. *Scientific American*. Retrieved from <https://www.scientificamerican.com>
- Oró, E., Depoorter, V., Garcia, A., Salom, J. (2015). Energy efficiency and renewable energy integration in data centres. Strategies and modelling review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1035–1045. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.035>
- Osibo, B., Adamo, S. (2023). Data centers and green energy: Paving the way for a sustainable digital future. *International Journal of Latest Technology in Engineering Management Applied Science*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.51583/ijltemas.2023.121103>
- Othman, N., Mohammad, R., Kamaruddin, S. A. (2015). Prediction of electronic waste disposals from residential areas in Malaysia. *Jurnal Teknologi*, 74(1), 1–10. <https://doi.org/10.11113/jt.v74.4826>
- Peng, X., Bhattacharya, T., Cao, T., Mao, J., Tekreeti, T., Qin, X. (2022). Exploiting renewable energy and UPS systems to reduce power consumption in data centers. *Big Data Research*, 28, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2021.100306>
- Perucica, N., Andjelković, K. (2022). Is the future of AI sustainable? A case study of the European Union. *Transforming Government: People, Process and Policy*, 16(3), 1–20. <https://doi.org/10.1108/tg-06-2021-0106>
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Warner, A. (2015). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55(1), 147–170. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x>
- Qian, K., Mao, L., Liang, X., Ding, Y., Gao, J., Wei, X., Li, J. (2023). Towards Sustainable Urban Planning via Multi-Agent Reinforcement Learning. *arXiv preprint arXiv:2310.16772*. <https://arxiv.org/abs/2310.16772>

- org/abs/2310.16772
- Ramli, M. A., Jambari, D. I. (2018). Cooling system optimization in data centers: A review. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 10(1–4), 1–6.
- Rojek, I., Mroziński, A., Kotlarz, P., Macko, M., Mikołajewski, D. (2023). AI-based computational model in sustainable transformation of energy markets. *Energies*, 16(24), 8059. <https://doi.org/10.3390/en16248059>
- Rolnick, D., Donti, P., Kaack, L., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Bengio, Y. (2022). Tackling climate change with machine learning. *ACM Computing Surveys*, 55(2), 1–96. <https://doi.org/10.1145/3485128>
- Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N., Etzioni, O. (2020). Green AI. *Communications of the ACM*, 63(12), 54–63. <https://doi.org/10.1145/3381831>
- Şerban, A., Lytras, M. (2020). Artificial intelligence for smart renewable energy sector in Europe—smart energy infrastructures for next generation smart cities. *IEEE Access*, 8, 77364–77377. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2990123>
- Shin, D. (2019). Toward fair, accountable, and transparent algorithms: Case studies on algorithm initiatives in Korea and China. *Javnost-The Public*, 26(3), 274–290.
- Sirbu, A., Babaoğlu, O. (2015). Towards sustainable cloud computing: A survey on achieving energy efficiency in software architectures. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 6, 65–85. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2015.01.001>
- Stanford University. (2024). Artificial Intelligence Index Report 2024. Stanford Institute for Human-Centered AI. Retrieved from https://aiindex.stanford.edu/wp-content/uploads/2024/04/HAI_2024_AI-Index-Report.pdf.
- Sun, X., Ansari, N., Wang, R. (2016). Optimizing resource utilization of a data center. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2822–2846.
- Sun, Z., Cao, H., Stojmenovic, M., Stojmenovic, I. (2016). Reducing the energy cost in cloud computing by using energy aware algorithms. *IEEE Communications Letters*, 20(8), 1524–1527. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2574999>
- Tamburrini, G. (2022). The AI carbon footprint and responsibilities of AI scientists. *Philosophies*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.3390/philosophies7010004>
- Uzaman, F. U., Alam, M. M., Hossain, M. S., Andersson, K. (2019). Towards sustainable data centers: A review and synthesis. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 21, 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.12.002>
- Villiers, C., Dimes, R., Molinari, M., (2023). How will AI text generation and processing impact sustainability reporting? Critical analysis, a conceptual framework and avenues for future research. *Sustainability Accounting Management and Policy Journal*. <https://doi.org/10.1108/sampj-02-2023-0097>
- Wang, H., Tang, D. (2022). Challenges and opportunities for the energy management of sustainable data centers in smart grids. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 984(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/984/1/012005>
- Wang, X., Ji, K., Xie, T. (2023). AI carbon footprint management with multi-agent participation: A tripartite evolutionary game analysis based on a case in China. *Sustainability*, 15(11), 9013. <https://doi.org/10.3390/su15119013>
- Xiao, D. (2023). Neuroscience-inspired continuous learning: A sustainable approach to AI energy challenge. <https://doi.org/10.31219/osf.io/twn9q>
- Xu, H., Wei, Q., Liu, Y. (2019). The exploring of electronic waste recycling in Chongqing. *Proceedings of the 2019 International Conference on Humanities and Social Science Research*. <https://doi.org/10.2991/ichssr-19.2019.146>
- Yang, C., Huang, Q., Li, Z., Liu, K., Hu, F. (2017). Big Data and cloud computing: innovation opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, 10(1), 13–53.
- Yang, J., Xiao, W., Jiang, C., Hossain, M. S., Muhammad, G., Amin, S. U. (2019). AI-powered green cloud and data center. *IEEE Access*, 7, 28888–28899. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888976>
- Zhang, S., Ding, Y., Liu, B., Pan, D. A., Chang, C. C., Volinsky, A. A. (2015). Challenges in legislation, recycling system and technical system of waste electrical and electronic equipment in China. *Waste Management*, 45, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.015>
- Zhang, J., Sang, L., Xu, Y., Sun, H. (2023). A Multi-agent Safe Reinforcement Learning Framework for Carbon-Constrained Demand Response. *arXiv preprint arXiv:2311.15594*. <https://arxiv.org/abs/2311.15594>
- Zhao, Y., Fariñas, J. (2022). Artificial intelligence and sustainable decisions. *European Business Organization Law Review*, 23(2), 215–234. <https://doi.org/10.1007/s40804-022-00262-2>
- Zhou, G. L., Zhu, Y. R., Mao, L. N. (2014). Design of the electronic waste recycle network system based on GIS. *Applied Mechanics and Materials*, 518, 381–385. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.518.381>
- Zu, Y. X., Jia, S. S., Li, Z., Jia, Y. (2012). Study on the layout and structure of the waste electronic products recycling network. *Advanced Materials Research*, 518–523, 3613–3617. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.518-523.3613>