



electronics

IMPACT
FACTOR
2.6

CITESCORE
6.1

İnceleme

Gelişmiş Çevresel İzleme için Yapay Zeka Ajanlarının Nesnelerin İnterneti ile Bütünleştirilmesi: Su Kalitesi ve İklim Verileri Uygulamaları

Tymoteusz Miller, Irmina Durlík, Ewelina Kostecka, Polina Kozlovskaya, Adrianna Łobodzińska, Sylwia Sokołowska ve Agnieszka Nowy

Özel Sayı

Akıllı Veri Analizi ve Uygulamalarında Gelişmeler, 3. Baskı

Düzenleyen

Dr. Chao Zhang, Dr. Wentao Li, Dr. Huiyan Zhang ve Dr. Tao Zhan



<https://doi.org/10.3390/electronics14040696>

İnceleme

Gelişmiş Çevresel İzleme için Yapay Zeka Ajanlarının Nesnelerin İnterneti ile Bütünleştirilmesi: Su Kalitesi ve İklim Verileri Uygulamaları

Tymoteusz Miller^{1,2,*} , Irmina Durlık³ , Ewelina Kostecka⁽⁴⁾ , Polina Kozlovska⁽⁵⁾, Adrianna Łobodzin'ska^{6,7} , Sylwia Sokolowska⁸  ve Agnieszka Nowy³ 

¹ Deniz ve Çevre Bilimleri Enstitüsü, Szczecin Üniversitesi, 71-141 Szczecin, Polonya

² Veri Bilimi ve Bilgi Fakültesi, INTI Uluslararası Üniversitesi, Nilai 71800, Negeri Sembilan, Malezya

³ Denizcilik Fakültesi, Szczecin Denizcilik Üniversitesi, 71-650 Szczecin, Polonya

⁴ Mekatronik ve Elektrik Mühendisliği Fakültesi, Szczecin Denizcilik Üniversitesi, 71-650 Szczecin, Polonya

⁵ Ekonomi, Finans ve Yönetim Fakültesi, Szczecin Üniversitesi, 71-101 Szczecin, Polonya

⁶ Biyoloji Enstitüsü, Szczecin Üniversitesi, 71-415 Szczecin, Polonya

⁷ Szczecin Üniversitesi Doktora Okulu, 71-412 Szczecin, Polonya

⁸ Polonya Biyoinformatik ve Veri Bilimi Derneği BioData, 71-214 Szczecin, Polonya

* Yazışmalar: tymoteusz.miller@usz.edu.pl

Özet: Yapay zeka (YZ) ajanlarının Nesnelerin İnterneti (IoT) ile entegrasyonu, gelişmiş veri toplama, derinlemesine analiz ve daha etkili karar verme olanağı sağlayarak çevresel izleme ve yönetimde dönüştürücü bir değişime işaret etmiştir. Bu kapsamlı literatür taraması, özellikle su kalitesi ve iklim verileriyle ilgili uygulamalara odaklanarak, çevre bilimlerinde yapay zeka ve IoT teknolojilerinin entegrasyonunu araştırmaktadır. Metodoloji, ilgili çalışmaların sistematik bir şekilde araştırılmasını ve seçilmesini, ardından mevcut araştırma eğilimlerini, faydalarını, zorluklarını ve boşluklarını sentezlemek için tematik, meta ve karşılaştırmalı analizleri içermektedir. İnceleme, yapay zekanın gelişmiş tahmine dayalı modelleme, gerçek zamanlı analitik ve otomatik karar verme yoluyla IoT'nin veri toplama yeteneklerini nasıl geliştirdiğini ve böylece çevresel izleme sistemlerinin doğruluğunu, güncelliğini ve verimliliğini nasıl artırdığını vurgulamaktadır. Belirlenen temel faydalar arasında gelişmiş veri hassasiyeti, maliyet verimliliği, ölçeklenebilirlik ve proaktif çevre yönetiminin kolaylaştırılması yer almaktadır. Bununla birlikte, bu entegrasyon, veri kalitesi, birlikte çalışabilirlik, güvenlik, teknik kısıtlamalar ve etik kaygılarla ilgili konular da dahil olmak üzere önemli engellerle karşılaşmaktadır. Gelecekteki gelişmeler, yapay zeka ve IoT teknolojilerindeki gelişmelere, blok zinciri ve uç bilişim gibi yeniliklerin dahil edilmesine, küresel çevresel izleme sistemlerinin potansiyel oluşumuna ve vatandaş bilimi girişimleri yoluyla halkın daha fazla katılımına işaret etmektedir. Bu zorlukların aşılması ve yeni teknolojik trendlerin benimsenmesi, YZ ve IoT'nin çevresel sürdürülebilirlik ve dayanıklılığın güçlendirilmesinde önemli bir rol oynamasını sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: yapay zeka (YZ) ajanları; Nesnelerin İnterneti (IoT); çevresel izleme; su kalitesi; iklim verileri; tahmine dayalı analitik; gerçek zamanlı karar verme; sürdürülebilir çevre yönetimi; YZ-IoT entegrasyonu; akıllı çevre sistemleri



Akademik Editörler: Wentao Li, Huiyan Zhang, Tao Zhan ve Chao Zhang

Alındı: 18 Ocak 2025

Revize: 31 Ocak 2025

Kabul edildi: 7 Şubat 2025

Yayınlanma tarihi: 11 Şubat 2025

Alıntı: Miller, T.; Durlık, I.; Kostecka, E.; Kozlovska, P.;

Łobodzin'ska, A.; Sokolowska, S.; Nowy, A. Gelişmiş Çevresel İzleme

için Yapay Zeka Ajanlarının

Nesnelerin İnterneti ile

Bütünleştirilmesi: Su Kalitesinde

Uygulamalar ve

İklim Verileri. *Electronics* **2025**, *14*, 696.

<https://doi.org/10.3390/electronics14040696>

Telif hakkı: © 2025 yazarlar tarafından.

Lisans sahibi MDPI, Basel, İsviçre. Bu

makale Creative Commons Attribution

(CC BY) lisansının hüküm ve koşulları

altında dağıtılan açık erişimli bir

makaledir (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

1.1. Arka plan

Modern dünya, ekosistemler [4,5], kamu sağlığı [6,7] ve küresel ekonomi [8-10] için ciddi riskler oluşturan çok sayıda çevresel sorunla [1-3] karşı karşıyadır.

İklim değışikliğı [11-13], su kirliliğı [14-16], ormansızlaşma [17-19] ve biyoçeşitlilik kaybı [20,21] gibi sorunlar, sanayileşme [22-24], kentleşme [25-27] ve sürdürülemez kaynak sömürüsü [28,29] nedeniyle daha önce görölmemiş bir hızda artmaktadır. Örneğın, artan küresel sıcaklıklar [30-33] hava modellerini değıştirerek kasırgalar, kuraklıklar ve seller gibi aşırı olaylara yol açmakta, bu da tarımsal verimliliğı bozmakta ve su güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Benzer şekilde, tarımsal akış, endüstriyel deşarjlar ve arıtılmamış kanalizasyon nedeniyle su kütlelerinin kirlenmesi [34,35] sadece su ekosistemlerine zarar vermekle kalmamakta, aynı zamanda bu su kaynaklarına bağılı topluluklar için önemli sağık tehlikeleri de oluşturmaktadır.

Bu karmaşık ve birbiriyle ilişkili zorlukları ele alırken, çevre bilimlerinde zamanında ve doğru karar verme çok önemlidir. Başarılı yönetim ve azaltma çabaları, gerçek zamanlı çevresel izleme, doğru eğilim tahmini ve ortaya çıkan tehditlere proaktif müdahalelere dayanmaktadır. Tipik olarak aralıklı veri toplama ve manuel analiz içeren geleneksel izleme yöntemleri, çevresel değışikliklerin hızlanması ve üretilen büyük miktarda veri göz önüne alındığında yetersiz kalmaktadır. Sonuç olarak, çevresel veri toplama ve analizinin doğruluğunu, verimliliğini ve ölçeklenebilirliğini artırabilecek yenilikçi teknolojik çözümlere acil bir talep vardır.

1.2. Çevresel İzlemede Teknolojinin Rolü

Çevresel izleme araçlarının [36-38] gelişimi, teknolojik ilerlemeler ve kapsamlı, gerçek zamanlı çevresel verilere duyulan ihtiyacın artmasıyla son yıllarda önemli ölçüde ilerleme kaydetmiştir. İlk çevresel izleme çalışmaları, saha araştırmaları, laboratuvar analizleri ve kağıt tabanlı kayıt tutmayı içeren büyük ölçüde manuel ve emek yoğundu [39,40]. Bu yaklaşımlar önemli bilgiler sunsa da, etkinlikleri sınırlı kapsam, seyrek veri toplama ve insan hatası riski nedeniyle kısıtlıydı. Dijital teknolojilerin ortaya çıkışı, otomatik veri toplama, depolama ve analiz olanağı sağlayarak çevresel izlemede devrim yaratmıştır [41,42]. Nesnelerin İnterneti (IoT), çeşitli çevresel parametrelerin sürekli izlenmesi için birbirine bağılı sensörlerin ve cihazların kullanılmasını sağlayarak bu evrimde kilit bir teknoloji haline gelmiştir [43-45]. IoT tabanlı sensörler hava ve su kalitesi, sıcaklık, nem ve toprak nemi gibi çeşitli çevresel parametreleri izleyebilir ve gerçek zamanlı verileri analiz için merkezi platformlara iletebilir [46-48]. IoT ile birlikte Yapay Zeka (AI) teknolojileri, çevresel sensörler tarafından üretilen büyük veri kümelerinin işlenmesi ve yorumlanması için gelişmiş yetenekler getirmiştir [49,50]. Makine öğrenimi algoritmaları kalıpları tespit edebilir, eğilimleri tahmin edebilir ve karmaşık çevresel verilerden eyleme geçirilebilir içgörüler çıkarabilir, böylece karar verme sürecini iyileştirebilir [51-53]. YZ güdümlü modeller kirlilik seviyelerini tahmin edebilir, iklim anormalliklerini öngörebilir ve kaynak yönetimi stratejilerini optimize ederek çevre bilimcilerin ve politika yapıcılarının ortaya çıkan zorluklara hızlı ve etkili bir şekilde yanıt vermelerini sağlayabilir. IoT ve yapay zekanın [54] birleşimi, her iki teknolojinin avantajlarından yararlanan sinerjik bir çerçeve oluşturmaktadır. IoT sürekli ve kapsamlı veri toplama için temel oluştururken, YZ ham verileri eyleme dönüştürülebilir içgörülere dönüştürmek için gereken analitik yetenekleri sunar. Bu entegrasyon, daha hızlı ve daha kesin kararlar alınmasını sağlayarak nihayetinde çevre yönetimi ve sürdürülebilirlik çabalarını geliştirir.

Bu makale, su kalitesi ve iklim verileriyle ilgili karar verme süreçlerinin iyileştirilmesine özel bir vurgu yaparak, yapay zeka (AI) ajanlarının ve Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) çevre bilimlerindeki entegrasyonunu incelemeyi amaçlamaktadır. Bu makale, bu teknolojiler arasındaki etkileşimi inceleyerek, birleşik uygulamalarının zamanımızın acil çevresel zorluklarını nasıl ele alabileceğini aydınlatmayı amaçlamaktadır. Makale spesifik olarak aşağıdaki hedeflere ulaşmayı amaçlamaktadır:

1. YZ ajanlarını çevre bilimleri bağlamında tanımlamak ve karakterize etmek, çeşitli türlerini, işlevlerini ve yeteneklerini vurgulamak.
2. Çevresel izlemeye uygulanabilir IoT teknolojilerinin bir özetini verin, su kalitesi ve iklim verilerini toplamak için kullanılan çeşitli sensörleri aydınlatın.
3. IoT ve yapay zeka arasındaki etkileşimi inceleyerek, entegrasyonlarının veri doğruluğunu nasıl artırdığını, gerçek zamanlı izlemeyi nasıl sağladığını ve proaktif karar vermeyi nasıl desteklediğini açıklayın.
4. Çevresel parametreleri izlemek ve yönetmek için yapay zeka ve IoT'nin başarılı bir şekilde uygulandığı vaka çalışmalarını ve pratik uygulamaları inceleyin.
5. Çevre bilimlerinde entegre AI-IoT sistemlerinin uygulanmasının avantajlarını, engellerini ve gelecekteki beklentilerini keşfedin.

2. Literatür Tarama Metodolojisi

Su kalitesi ve iklim izleme konularına odaklanarak çevre bilimlerinde yapay zeka ve IoT entegrasyonunu incelemek için sistematik bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. İnceleme, başlıca araştırma eğilimlerini, etkili uygulamaları, mevcut zorlukları ve gelecekteki potansiyel gelişmeleri vurgulamaktadır.

IEEE Xplore, SpringerLink, ScienceDirect, Wiley Online Library ve PubMed'de sistematik bir arama yapılmış, endüstri raporları (WHO, EPA, IEA) ve konferans bildirileri ile desteklenmiştir. Anahtar kelimeler arasında "AI ajanları", "IoT", "çevresel izleme" ve "tahmine dayalı analitik" yer aldı ve sonuçları iyileştirmek için Boolean operatörleri kullanıldı.

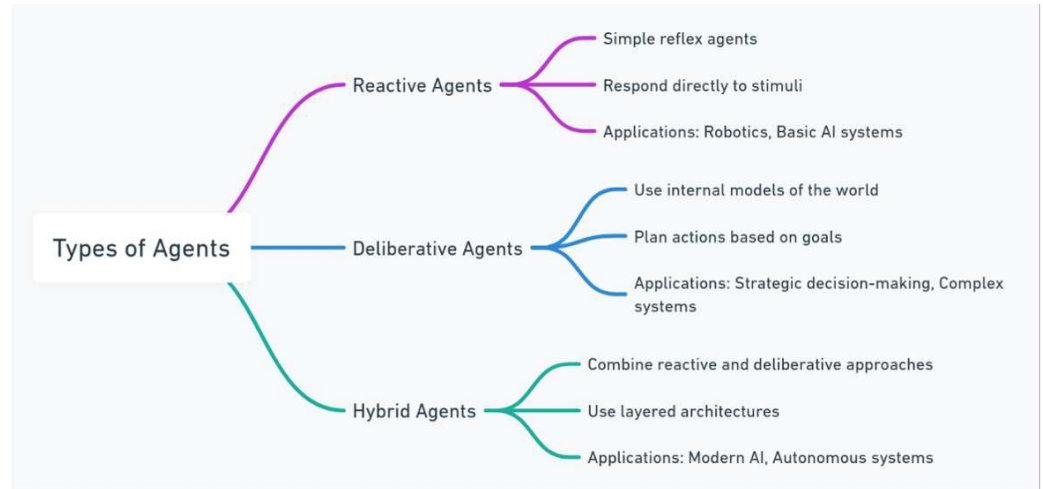
2010-2024 yılları arasında yayınlanan çalışmalar, hakemli araştırmalara öncelik verilerek çevre bilimlerinde AI-IoT entegrasyonunu ele almaları halinde dahil edilmiştir. Bilimsel olmayan kaynaklar, güncelliğini yitirmiş yayınlar ve ampirik doğrulaması olmayan sadece teorik çalışmalar hariç tutulmuştur. Geniş bir perspektif sağlamak için küresel araştırma çeşitliliği dikkate alınmıştır.

Başlıklar ve özetler seçim kriterlerine göre tarandı ve ardından tam metin analizi yapıldı. Çıkarılan veriler, çalışma hedeflerini, metodolojileri, kullanılan AI-IoT teknolojilerini, temel bulguları ve zorlukları içeriyordu. Tematik analiz, çalışmaları YZ teknikleri, IoT uygulamaları, faydaları ve sınırlamalarına göre kategorize ederken, karşılaştırmalı ve meta-analiz eğilimleri ve en iyi uygulamaları vurgulamıştır.

Sentez, AI-IoT entegrasyonu yoluyla gerçek zamanlı izleme, tahmine dayalı analitik ve otomatik karar verme süreçlerindeki gelişmeleri ortaya koymuştur. Bununla birlikte, veri kalitesi, birlikte çalışabilirlik, etik kaygılar ve uzun vadeli sürdürülebilirlik gibi zorluklar devam etmektedir. İnceleme, potansiyel yayın önyargısı, dil sorunları ve tamamen teorik ilerlemelerin hariç tutulması gibi sınırlamaları kabul etmektedir. Gelecekteki araştırmalar ölçeklenebilirlik, güvenlik, disiplinler arası işbirliği ve takviyeli öğrenme ve birleştirilmiş öğrenme gibi yeni ortaya çıkan yapay zeka tekniklerini ele almalıdır.

3. Çevre Bilimlerinde Yapay Zeka Ajanlarını Anlamak

Yapay zeka (YZ) ajanları, çevre bilimlerinin ilerlemesinde önemli araçlar haline gelmiştir [55-57]. Bu ajanlar, çeşitli yeteneklerinden yararlanarak izlemeyi iyileştirmekte [58-60], analizi kolaylaştırmakta [61-64] ve karar verme süreçlerini optimize etmektedir [55,65,66]; bunların hepsi karmaşık çevresel sorunların üstesinden gelmek için çok önemlidir. Bu bölüm, YZ ajanlarının tanımlarını, sınıflandırmalarını, işlevlerini ve çevresel ortamlardaki pratik uygulamalarını özetleyerek derinlemesine bir inceleme sunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çevre bilimlerinde yapay zeka ajanlarının sınıflandırılması.

3.1. YZ Ajanlarının Tanımı ve Türleri

Yapay zeka ajanları, çevrelerini algılayabilen, verileri işleyebilen ve önceden tanımlanmış hedeflere ulaşmak için eylemler gerçekleştirebilen kendi kendini yöneten sistemlerdir. Çevre bilimlerinde, büyük veri kümelerinin işlenmesini ve yorumlanmasını destekleyerek daha verimli ve zamanında karar verilmesini sağlarlar. Operasyonel mekanizmalarına ve karar verme yaklaşımlarına dayanarak, YZ ajanları genellikle üç ana tipe sınıflandırılır: reaktif ajanlar, serbest bırakıcı ajanlar ve hibrit ajanlar [67]. Reaktif ajanlar [68,69], önceden tanımlanmış kurallara dayalı olarak çevresel uyarılara doğrudan yanıt vererek çalışır. İç durumlarını koruma veya gelecekteki eylemleri planlama kapasiteleri yoktur, bu da davranışlarını tamamen sensörlerinden gelen mevcut girdiye bağımlı hale getirir. Çevresel uygulamalarda, reaktif ajanlar genellikle gerçek zamanlı izleme ve uyarı sistemleri için kullanılır [70]. Örneğin, reaktif bir YZ ajanı, sensör verileri su kirliliği seviyelerinde ani bir artış olduğunu gösterdiğinde bir alarmı etkinleştirebilir ve anında iyileştirici eylemleri kolaylaştırabilir [71]. Bu ajanlar basitlikleri ve hızları nedeniyle değerlidir, ancak uyarlanabilirlikleri sınırlıdır ve uzun vadeli planlama yeteneklerinden yoksundurlar. Öte yandan müzakereci ajanlar [72], çevrelerinin iç modellerine dayalı olarak gelecekteki eylemleri planlama ve muhakeme etme yeteneğine sahiptir. Reaktif ajanların aksine, müzakereci ajanlar, eylemlerinin zaman içindeki sonuçlarını göz önünde bulundurmalarına olanak tanıyan bir iç durumu muhafaza ederler [73]. Çevre bilimlerinde, iklim modellemesi ve ekosistem yönetimi gibi stratejik planlama ve uzun vadeli karar verme gerektiren görevler için müzakereci ajanlar kullanılmaktadır [74]. Örneğin, müzakereci bir YZ ajanı, gelecekteki sıcaklık paternlerini tahmin etmek ve uygun azaltma stratejileri önermek için geçmiş iklim verilerini değerlendirebilir [75]. Bu ajanlar karmaşıklıkları ve uyarlanabilirlikleri ile karakterize edilirler, ancak etkili çalışma için daha fazla hesaplama kaynağı ve kapsamlı veri gerektirirler [76]. Hibrit ajanlar [77,78] hem reaktif hem de müzakereci ajanların güçlü yönlerini bir araya getirerek anlık değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt vermelerini ve aynı zamanda uzun vadeli planlama yapmalarını sağlar. Bu ikili yetenek, hibrit ajanları hem gerçek zamanlı yanıt vermenin hem de stratejik öngörünün gerekli olduğu dinamik ve karmaşık çevresel sistemler [79] için özellikle uygun hale getirmektedir. Örneğin, akıllı bir sulama sistemine yerleştirilen hibrit bir YZ ajanı, mevcut toprak nem seviyelerine göre su dağıtımını gerçek zamanlı olarak ayarlayabilir ve aynı zamanda hava durumu tahminlerine ve mahsul büyüme modellerine dayalı olarak gelecekteki sulama [80] programlarını planlayabilir [81,82]. Hibrit ajanlar, birden fazla operasyonel modu entegre ederek çok yönlülük ve gelişmiş performans sunar, böylece çeşitli çevresel uygulamalarda üstün bir işlevsellik sağlar (Tablo 1).

Tablo 1. YZ aracı türlerinin karşılaştırılması.

AI Ajan Türü	Özellikler	İşlevler	Avantajlar	Tipik Uygulamalar
Reaktif	Önceden tanımlanmış kurallara göre çalışır; iç durum veya gelecek planlaması yoktur	Gerçek zamanlı izleme ve uyarı [70]	Basitlik, hız	Kirlilik tespiti [83,84], acil düzeltici önlemler
Müzakereci	İçsel durumu korumak; gelecekteki eylemler hakkında planlama ve muhakeme yeteneğine sahip olmak	İklim modellemesi, ekosistem yönetimi	Karmaşık muhakeme, uyarlanabilirlik	İklim tahmini, kaynak yönetimi [85]
Hibrit	Reaktif ve müzakereci yetenekleri birleştirir; hem acil hem de uzun vadeli görevlerin üstesinden gelir	Akıllı sulama sistemleri, otonom araçlar	Çok yönlülük, gelişmiş performans	Dinamik kaynak tahsisi, uyarlanabilir sistemler [40,86]

3.2. İşlevler ve Yetenekler

Çevre bilimlerinde, YZ ajanları izleme ve yönetim süreçlerinin verimliliğini, hassasiyetini ve etkinliğini artıran çeşitli işlevleri yerine getirmektedir [87]. Yetenekleri veri toplama ve işleme, tahmine dayalı analitik ve otomatik karar vermeyi kapsar ve her biri çevre yönetimine yönelik kapsamlı bir yaklaşıma katkıda bulunur [88]. Veri toplama ve işleme, YZ araçlarının temel işlevlerini temsil etmektedir. Bu ajanlar IoT cihazları ve sensör ağlarını kullanarak hava ve su kalitesi, sıcaklık, nem ve kirlilik konsantrasyonları gibi temel çevresel parametreler hakkında gerçek zamanlı veriler toplar [89-92]. Büyük hacimli verileri hızlı bir şekilde işleme yeteneği, YZ araçlarının daha fazla analiz için bilgileri filtrelemesine, temizlemesine ve düzenlemesine olanak tanır. Sensör [93] entegrasyonu, çeşitli kaynaklardan sorunsuz veri elde edilmesini sağlarken, otomatik veri temizleme, ham verilerdeki anormallikleri ve tutarsızlıkları tanımlar ve düzeltir, veri kalitesini ve güvenilirliğini korur [91,94,95]. Bu yüksek hızlı veri işleme kabiliyeti, çevre bilimcilerin doğru değerlendirmeler ve zamanında müdahaleler için gerekli olan güncel bilgilere erişebilmelerini sağlar. Tahmine dayalı analitik, YZ ajanlarının bir başka önemli yeteneğini temsil eder. Geçmiş ve güncel verileri analiz ederek, YZ ajanları gelecekteki çevresel koşulları ve eğilimleri tahmin edebilir. Bu öngörü gücü, doğal afetler, kirlilik artışları ve iklim anormallikleri gibi olayları öngörmek için çok önemlidir ve olumsuz etkileri azaltmak için proaktif önlemler alınmasını sağlar. Regresyon, sınıflandırma ve sinir ağları gibi makine öğrenimi modelleri, kalıpları tespit etmek ve toplanan verilerden tahminler oluşturmak için kullanılır. Senaryo simülasyonu, yapay zeka ajanlarının çeşitli ortam senaryoları oluşturmaya, potansiyel sonuçları değerlendirmesine ve karar verme sürecini bilgilendirmesine olanak tanır. Sürekli trend analizi, çevresel parametrelerde ortaya çıkan modellerin ve değişimlerin anında tespit edilmesini sağlayarak uzun vadeli planlama ve sürdürülebilirlik çabalarını destekler. Otomatik karar verme, veriye dayalı içgörüler ve öneriler sunarak çevre bilimlerinde YZ araçlarının rolünü güçlendirir. YZ algoritmaları mevcut seçenekleri değerlendirir ve önceden tanımlanmış kriterlere ve gerçek zamanlı veri girdilerine dayalı olarak en etkili eylemleri belirler. Bu işlevsellik, özellikle acil durum yönetimi ve kaynak dağıtımı gibi hızlı yanıt gerektiren durumlarda çok önemlidir. Yapay zeka tarafından desteklenen karar destek sistemleri, görselleştirme araçları aracılığıyla ilgili verileri ve analitik sonuçları sunarak insan karar vericilerin karmaşık bilgileri yorumlamasına yardımcı olur. Optimizasyon algoritmaları kaynak yönetimi, kirlilik kontrolü ve koruma için mümkün olan en iyi çözümleri belirler.

çaba sarf ederken, otonom eylemler, özellikle zamana duyarlı durumlarda insan müdahalesine gerek kalmadan önceden tanımlanmış önlemleri uygular.

Algoritma Seçim Kriterleri

YZ algoritmalarının çevresel izleme için uygunluğu üç temel kritere göre belirlenmiştir: veri türü, hesaplama verimliliği ve yorumlanabilirlik.

Veri türü algoritma seçiminde önemli bir rol oynamıştır. Rastgele ormanlar ve destek vektör makineleri (SVM'ler) gibi denetimli öğrenme yöntemleri, bilinen kirlilik seviyelerine sahip su kalitesi ölçümleri gibi etiketli veri kümeleri için kullanılmıştır. Buna karşılık, etiketsiz iklim veri kümelerinde anomali tespiti için K-Means gibi denetimsiz kümeleme teknikleri uygulanmış, hava kirliliği veya sıcaklık paternlerindeki sapmalar tespit edilmiştir. Konvolüsyonel sinir ağları (CNN'ler) gibi derin öğrenme mimarileri, özellikle uydu görüntülerinden özellik çıkarmanın gerekli olduğu uzaktan algılama uygulamalarında yüksek boyutlu veriler için seçilmiştir.

Hesaplama verimliliği, özellikle kaynakların kısıtlı olduğu ortamlarda kullanılan IoT tabanlı izleme çözümleri için bir diğer kritik faktördür. Rastgele ormanlar ve karar ağaçları, düşük hesaplama ek yükleri ve gerçek zamanlı işleme yetenekleri nedeniyle uç cihazlar için tercih edildi ve bu da onları cihaz üzerinde su kalitesi değerlendirmeleri için ideal hale getirdi. Buna karşılık, LSTM ağları, bulut tabanlı platformlarda çalışırken sensör okumalarındaki uzun vadeli bağımlılıkları yakalama yeteneklerinden yararlanılarak zaman serisi su kalitesi tahmini için seçilmiştir. CNN'ler, hesaplama açısından yoğun olmakla birlikte, derin özellik çıkarmanın önemli avantajlar sağladığı yüksek çözünürlüklü çevresel görüntü işleme için önceliklendirilmiştir.

Yorumlanabilirlik, paydaşların güvenini ve yapay zeka güdümlü karar vermede mevzuata uygunluğu sağlamak için çok önemlidir. SHAP (Shapley additive explanations) değerleri, kirlilik kaynağı tanımlamasında özellik katkılarını açıklamak için kullanıldı ve çevre politikasının uygulanmasında şeffaflık sağladı. Karar verme sorumluluğunun gerekli olduğu düzenleyici bağlamlarda, lojistik regresyon ve rastgele ormanlar açıklanabilirlikleri nedeniyle tercih edilirken, derin öğrenme modelleri öncelikle doğruluğun yorumlanabilirlik endişelerinden daha ağır bastığı durumlarda kullanılmıştır.

Örneğin, zaman serisi su kalitesi tahmini için LSTM ağlarına öncelik verilmiş, göl ve nehirlerdeki mevsimsel değişimler ve kirlilik eğilimleri etkili bir şekilde modellenmiştir [96-103]. Bu arada, IoT sensör verilerini hava kalitesi ölçümlerine göre gruplandırarak mekansal kirlilik sıcak noktalarını belirlemek için K-ortalama kümelemesi uygulanmıştır. Bu algoritmik seçimler, yapay zeka güdümlü çevresel izleme sistemlerinin doğruluk, verimlilik ve gerçek dünyada uygulanabilirlik açısından optimize edilmesini sağlamıştır.

3.3. Çevresel İzleme ve Yönetimde Yapay Zeka Ajanlarının Gerçek Dünya Uygulamaları

YZ ajanları, sürdürülebilirlik çabalarını geliştirme potansiyellerini ortaya koyan çeşitli çevresel uygulamalarda kullanılmıştır. Bunların kullanımı kaynak yönetimi, biyoçeşitliliğin korunması, kentsel planlama [96], emisyon tahmini [97] ve gelişmiş robotik alanlarına kadar uzanmakta ve çevre bilimlerinde YZ'nin uyarlanabilirliğini ve etkisini vurgulamaktadır. Kaynak yönetimi ve iklim değişikliğinin azaltılması alanında [98-100], YZ teknolojileri kaynak kullanımının optimize edilmesinde, çevresel eğilimlerin tahmin edilmesinde [101,102] ve karar verme süreçlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, Büyük Göller bölgesinde, YZ destekli bir su kalitesi izleme sistemi [103] pH, bulanıklık, çözünmüş oksijen ve kirlileti seviyeleri gibi parametreleri sürekli olarak ölçmek için IoT sensörlerini kullanmaktadır. YZ ajanları bu verileri gerçek zamanlı olarak işleyerek kirlilik olaylarını tanımlamakta ve gelecekteki su kalitesi eğilimlerini tahmin etmektedir. Bu yaklaşım, proaktif su kalitesi yönetimini büyük ölçüde geliştirerek kirlilikle ilgili zorlukların daha etkili bir şekilde azaltılmasına yardımcı olmuştur. Biyolojik çeşit-

liğin korunması da YZ entegrasyonundan faydalanmıştır [104,105]. YZ güdümlü dronlar ve kamera tuzakları, vahşi yaşamın izlenmesi, potansiyel tehditlerin tespit edilmesi ve koruma çabalarına yardımcı olmak için kullanılmaktadır [106]. Makine öğrenimi modelleri ekosistem sağlığını değerlendirerek biyoçeşitliliği korumak için sürdürülebilir yönetim stratejilerini desteklemektedir [107]. Bununla birlikte, koruma alanında yapay zekanın uygulanması, sorumlu kullanımı sağlamak ve hassas çevresel verileri korumak için ele alınması gereken etik ve siber güvenlik endişelerini gündeme getirmektedir. Kentsel planlama ve yeşil bina teknolojileri, Y Z uygulamaları yoluyla önemli ilerlemeler kaydetmiştir [108]. Kentsel ortamlarda, YZ algoritmaları sürdürülebilir kentsel genişlemeye rehberlik etmek için nüfus yoğunluğu, arazi kullanımı ve altyapı gelişimi ile ilgili verileri analiz etmektedir. Makine öğrenimi modelleri, enerji verimliliği, kaynak tüketiminin azaltılması ve karbon emisyonlarının düşürülmesi için bina tasarımlarını optimize etmektedir [109]. Ayrıca, yapay zeka sistemleri iç mekan ortamlarını izleyip kontrol ederek bina sakinleri için optimum hava kalitesi, sıcaklık ve aydınlatma sağlamaktadır. YZ destekli bu teknolojiler, sürdürülebilir kalkınmayı kentsel büyümeyle bütünleştiren, sakinlerin yaşam kalitesini artırırken çevresel etkiyi azaltan akıllı şehirlerin oluşturulmasını desteklemektedir [110,111]. YZ ayrıca CO₂ emisyonlarının tahmin edilmesinde de önemli bir rol oynamıştır [112,113]. Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (BBO) algoritması, emisyon eğilimlerini modellemek ve tahmin etmek için kullanılmış ve politika yapıcılara etkili çevre politikaları ve stratejileri formüle etmek için gerekli veri odaklı içgörüler sağlamıştır [114]. Bu strateji, emisyonları azaltmak ve iklim değişikliği etkilerine karşı koymak için hedeflenen girişimlerin uygulanmasını sağlayarak çevre yönetimi uygulamalarının hem verimli hem de sürdürülebilir kalmasını sağlar [115,116]. YZ'nin yenilikçi uygulamaları, YZ ajanlarının mikro ve nano ölçekli koloidal robotları derin takviye öğrenme yetenekleriyle donattığı robotik alanına kadar uzanmaktadır [117,118]. Bu robotlar, bilinmeyen ortamlarda verimli bir şekilde gezinebilmekte, bu da onları hassas cerrahi ve hedefli nano ilaç dağıtımında özellikle etkili kılmaktadır [119]. YZ güdümlü navigasyon, robotların engellerden kaçınmasını ve yerel duyuşal girdilere dayalı olarak seyahat süresini en aza indirmesini sağlayarak tıbbi müdahalelerin hassasiyetini ve etkinliğini artırır [120]. Açık dünya ortamlarında otonom YZ ajanları [121] üzerine yapılan araştırmalar, çevresel uygulamalarda bir başka sınırdır. Bu ajanlar, karmaşık görevlerin üstesinden gelmek ve yeni koşullara uyum sağlamak için takviyeli öğrenmeyi sembolik planlama ile birleştiren bütünleştirici çerçeveler kullanmaktadır. Bu tür yetenekler, öngörülemeyen ortamlarda çalışan ve etkili bir şekilde çalışmak için sağlam bir uyarlanabilirlik gerektiren otonom araçlar ve hizmet robotları gibi uygulamalar için çok önemlidir [122,123]. Bu otonom sistemler, dinamik ve gerçek dünya ortamlarında YZ entegrasyonunun en ileri noktasını temsil etmekte ve hem akıllı hem de esnek çözümler sunmaktadır [124,125]. Son olarak, YZ ajanları, son derece ayrıntılı ve sürükleyici eğitim deneyimleri sunmak için genişletilmiş gerçeklik (XR) uygulamalarına [126] dahil edilmektedir [127]. LEGO tuğla montajı gibi bağlamlarda, YZ ajanları geçmiş deneyimlere dayalı eylemlere karar vermek için büyük dil modelleri ve görme-dil entegrasyonu kullanır [128] ve XR ortamlarında kullanıcı etkileşimini geliştirir [129]. Bu entegrasyon, daha etkili ve sürükleyici eğitim deneyimlerini kolaylaştırmakta, kişiselleştirilmiş ve duyarlı YZ güdümlü rehberlik yoluyla öğrenme sonuçlarını ve kullanıcı katılımını iyileştirmektedir. YZ ajanları, çeşitli türleri ve sofistike yetenekleri sayesinde, daha etkili izleme, analiz ve karar verme sağlayarak çevre bilimlerini dönüştürmektedir. Reaktif, müzakereci ve hibrit araçların her biri, gerçek zamanlı kirlilik tespitinden stratejik iklim modellemesine kadar belirli çevresel uygulamalara uyarlanmış benzersiz avantajlar sunmaktadır. Sunulan vaka çalışmaları, su kalitesinin izlenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması, kentsel planlama, emisyon tahmini ve son teknoloji robotik alanlarındaki gelişmeleri sergileyerek YZ araçlarını IoT teknolojileri ile birleştirmenin somut avantajlarını göstermektedir. YZ ve IoT ilerlemeye devam ettikçe, entegrasyonlarının çevre bilimcilerin ve politika yapıcıların aşağıdakilerle mücadele etme yeteneğini daha da güçlendirmesi beklenmektedir.

acil çevre sorunları, akıllı ve ileri görüşlü yönetim yaklaşımlarıyla sürdürülebilirliği ve dayanıklılığı teşvik etmek.

3.4. Seçilmiş Vaka Çalışmalarının Eleştirel Analizi

YZ'nin biyoçeşitliliğin korunması, kentsel planlama ve CO₂ emisyon tahmininde uygulanması önemli bir potansiyel ortaya koymuştur, ancak kritik zorluklar devam etmektedir. Bu bölüm, seçilen vaka çalışmalarının derinlemesine bir değerlendirmesini sunmakta, güçlü yönlerini, sınırlamalarını ve iyileştirme alanlarını analiz etmektedir. Aşağıdaki karşılaştırmalı tablo, YZ odaklı çevresel izleme çözümlerinin etkinliği ve ölçeklenebilirliği hakkında yapılandırılmış bir bakış açısı sunarak temel bulguları özetlemektedir Tablo 2.

Tablo 2. Çevresel izlemede yapay zeka uygulamalarının karşılaştırmalı analizi.

Çalışma	Etki Alanı	Yapay Zeka Tekniği	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
Raihan (2023) [104]	Biyoçeşitlilik koruma	Makine öğrenimi	Koruma alanında yapay zekaya kapsamlı genel bakış; kaynak yönetimi için pratik uygulamalar	Ampirik doğrulamadan yoksun; YZ'nin benimsenme
			Klasik ve klasik olmayan	zorlukları üzerine sınırlı tartışma
Ullah, Saqib ve Xiong (2024) [105]	Biyoçeşitliliğin korunması	Ekosistem izleme için yapay zeka	modern koruma yaklaşımları; proaktif izlemeyi vurgular	Teorik odaklanma ile asgari gerçek dünya örnekleri; yetersiz analiz
				Yapay zeka sınırlamaları
Ayoola ve diğerleri (2024) [106]	Biyoçeşitliliğin korunması	Büyük Veri ve Yapay Zeka	Tahmine dayalı modelleme ve habitat izlemeyi vurgular; büyük veri yaklaşımlarını entegre eder	ABD'ye aşırı vurgu, genellenebilirliği sınırlandırıyor; etik ve düzenleyici yönlerle ilişkin tartışma yok
Jha ve diğerleri (2021) [110]	Kentsel planlama yapay zeka	Akıllı şehirler için	Yapay zekanın kentlerdeki rolüne ilişkin geniş bir inceleme planlama; tartışır akıllı altyapı ve sürdürülebilirlik	Büyük ölçüde kavramsal; gerçek dünya örneklerinden yoksun çalışmalar ve algoritmik detaylar
				Uygulamaya sınırlı odaklanma
Sanchez ve diğerleri (2023) [111]	Kentsel planlama yapay zeka	Sürdürülebilirlik için	Yapay zekanın şu alanlardaki rolüne odaklanır ekolojik ayak izlerini en aza indirmek; ileriye dönük perspektif	uygulama; etik/sosyal kaygıların yeterince araştırılmaması
				Sınırlı ölçeklenebilirlik
Chen ve diğerleri (2021) [112]	CO ₂ Emisyon tahminleri	Enerji verimliliği için yapay zeka	Güçlü metodolojik çerçeve; emisyon azaltımı için pratik öngörüler	tartışma; hesaplama kısıtlamalarının analizinden yoksundur
			Yorumlanabilir bir tahmin çerçevesi önerir; bütünsel yaklaşım enerji-emisyon bağlantısı	Tahmine odaklanır ancak politika entegrasyonundan yoksundur
Aras ve Hanifi Van (2022) [113]	CO ₂ emisyon tahminleri	Enerji ve emisyonlar için yapay zeka	Tahmine dayalı analitik için gelişmiş yapay zeka tekniklerini kullanır; politika kararlarını bilgilendirir	Ön baskı durum-bulgular henüz hakemli değil; etik ve hesaplamalı yönlerle ilişkin tartışma yok
Nazir ve diğerleri (2024) [114]	CO ₂ Emisyon tahminleri	Yapay zeka topluluk stratejileri		

Yapay zeka, özellikle yaban hayatı izleme, ekosistem yönetimi ve habitat koruma alanlarında biyoçeşitliliği koruma çabalarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Raihan (2023) [104], koruma alanındaki makine öğrenimi uygulamalarına kapsamlı bir genel bakış sunmakta ve bunların kaynak yönetimi stratejilerini optimize etmedeki rolünü göstermektedir. Çalışma pratik uygulamaları vurgularken, YZ'nin gerçek dünya koruma ortamlarındaki etkinliğini doğrulayan ampirik vaka çalışmalarından yoksundur. YZ'nin benimsenmesi, veri kullanılabilirliği ve etik kaygılarla ilgili zorlukların ele alınması, biyoçeşitlilik bilimine katkısını güçlendirecektir.

Ullah, Saqib ve Xiong (2024) [105], ekosistem izleme ve tehdit tanımlamayı vurgulayarak geleneksel ve yapay zeka odaklı koruma yaklaşımları arasında köprü kurmaktadır. Çalışma, YZ'yi klasik biyoçeşitlilik yöntemlerini tamamlayacak bir araç olarak etkili bir şekilde konumlandırmaktadır, ancak gerçek dünya uygulamaları ve pilot projelerden yoksun, oldukça teorik kalmaktadır. Daha ileri araştırmalar, YZ'nin algoritmik önyargılarını ve yorumlanabilirlik endişelerini ele almak için disiplinler arası işbirliklerini içeren pratik uygulamalara odaklanmalıdır.

Ayoola ve diğerleri (2024) [106], YZ'nin büyük veriye dayalı biyoçeşitlilik izlemedeki, özellikle de habitat koruma ve tür takibindeki rolünü incelemektedir. Bu çalışma, koruma planlaması için öngörücü modellemenin faydalarının altını çizmektedir, ancak ağırlıklı olarak ABD'ye odaklanmıştır ve bulgularının diğer ekolojik ve sosyo-ekonomik bağlamlara genelleştirilebilirliğini sınırlamaktadır. Daha çeşitli bir veri seti ve düzenleyici tartışma, çalışmanın küresel koruma çabalarına uygulanabilirliğini artıracaktır.

Kentsel planlama ve akıllı şehir gelişiminde YZ kullanımı, altyapıyı optimize etme, ekolojik ayak izlerini azaltma ve kentsel sürdürülebilirliği iyileştirme potansiyeline sahiptir. Jha ve diğerleri (2021) [110], YZ'nin kentsel tasarımdaki, özellikle de akıllı altyapı ve iç ortam optimizasyonundaki uygulamalarına ilişkin geniş bir kavramsal inceleme sunmaktadır. Ancak bu çalışma, ampirik doğrulama ve gerçek dünya vaka çalışmalarından yoksun, oldukça teorik kalmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, akıllı şehir planlamasında etkinliği kanıtlanmış olan biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (BBO) gibi belirli YZ algoritmalarına odaklanmalıdır.

Sanchez ve diğerleri (2023) [111], YZ'nin sürdürülebilir kentsel kalkınmadaki rolünü vurgulamakta ve YZ'nin kentsel ekolojik ayak izlerini nasıl en aza indirebileceğine dair ileriye dönük bir bakış açısı sunmaktadır. Çalışma, potansiyel YZ dönüşümlerini etkili bir şekilde tartışırken, pratik uygulama stratejileri ve vaka çalışmalarından yoksundur. Ayrıca, veri gizliliği, kentsel önyargı ve YZ güdümlü planlama kararlarında erişilebilirlik gibi kritik etik kaygıları göz ardı etmektedir. Bu eksikliklerin ampirik çalışmalar ve disiplinler arası çerçevelerle giderilmesi, YZ'nin kentsel sürdürülebilirlikteki rolünün daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayacaktır.

CO₂ emisyon modellemesine yönelik yapay zeka odaklı yaklaşımlar, enerji verimliliğini ve çevre politikası formülasyonunu geliştirmede umut verici sonuçlar ortaya koymuştur. Chen ve diğerleri (2021) [112], YZ destekli enerji ve karbon ayak izi modellemesi için metodolojik olarak sağlam bir çerçeve sunmakta ve emisyonların azaltılmasına yönelik pratik bilgiler sağlamaktadır. Bununla birlikte, çalışma ölçeklenebilirlik endişelerini veya YZ modellerini büyük metropol bölgelerinde konuşlandırmanın hesaplama maliyetlerini ele almamaktadır. Düşük güçlü YZ modelleri ve uç bilişim uygulamaları hakkındaki tartışmaların dahil edilmesi, çalışmanın uygulanabilirliğini artırabilir.

Aras ve Hanifi Van (2022) [113] enerji tüketimi ve emisyon modellemesi için yorumlanabilir bir tahmin çerçevesi önererek enerji-çevre etkileşimlerine bütünsel bir bakış açısı sunmaktadır. Çalışmanın yorumlanabilir YZ'ye yaptığı vurgu övgüye değer olsa da, öncelikle kentsel politika planlaması ve emisyon azaltma stratejileri ile entegrasyondan yoksun tahminlere odaklanmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, YZ'ye dayalı içgörülerin çevre politikalarını nasıl doğrudan bilgilendirebileceğini ve şekillendirebileceğini keşfetmelidir.

Nazir ve diğerleri (2024) [114], gelişmiş derin öğrenme metodolojilerini kullanarak CO₂ emisyon tahmini için yapay zeka topluluk stratejilerini araştırmıştır. Çalışmanın güçlü tahmine dayalı analitik yaklaşımı, onu politika yapımcılar için oldukça değerli kılmaktadır, ancak ön baskı durumu şu anlama gelmektedir

bulguları tam olarak doğrulanmamıştır. Ek olarak, YZ güdümlü emisyon modellemesinin hesaplama ve etik zorluklarını yeterince araştırmamakta ve pratik alaka düzeyini sınırlamaktadır. Bu teknik ve etik hususların ele alınması, emisyon tahmininde YZ'nin sorumlu bir şekilde kullanılmasını sağlamak için çok önemli olacaktır.

YZ'nin çevresel izleme ve karar verme süreçlerindeki artan rolüne rağmen, tüm vaka çalışmalarında çeşitli zorluklar devam etmektedir. Ortak bir sınırlama, gerçek dünyadaki ampirik doğrulamanın eksikliğidir ve birçok çalışma pilot uygulamalardan ziyade öncelikle teorik tartışmalara dayanmaktadır. Ayrıca, özellikle YZ önyargısı, şeffaflık ve yönetim çerçeveleri ile ilgili etik ve düzenleyici hususlar genellikle yeterince araştırılmamıştır. Gelecekteki araştırmalar, daha kapsamlı ve etkili YZ güdümlü çevresel çözümler oluşturmak için çevre bilimi, YZ geliştirme ve politika oluşturmayı entegre ederek disiplinler arası işbirliklerini vurgulamalıdır. Pilot projelerin, açık kaynaklı YZ çerçevelerinin ve uyarlanabilir öğrenme modellerinin yaygınlaştırılması, ölçeklenebilirliğin sağlanması için gerekli olacaktır. Çevresel izleme için yapay zeka uygulamalarında adalet ve uzun vadeli sürdürülebilirlik.

3.5. Yapay Zeka Teknikleri: Gerekçe ve Uygunluk

Çevresel izlemede yapay zeka tekniklerinin seçimi, veri karakteristiğine, yorumlanabilirlik gereksinimlerine, hesaplama kısıtlamalarına ve her uygulamanın kendine özgü zorluklarına bağlıdır. Denetimli, denetimsiz ve derin öğrenme yöntemleri arasındaki seçim, veri kümesinin doğası (etiketli veya etiketsiz), gerçek zamanlı işleme ihtiyacı ve modellerin uç veya bulut tabanlı sistemlere dağıtılmasının fizibilitesi tarafından yönlendirilir.

3.5.1. Tahmine Dayalı Modelleme için Denetimli Öğrenme

Rastgele ormanlar, destek vektör makineleri (SVM'ler) ve gradyan artırma gibi denetimli öğrenme algoritmaları, etiketli girdi verileri (örn. sensör okumaları) ve çıktı kategorileri (örn. kirlilik seviyeleri) arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenme yetenekleri nedeniyle çevresel izlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Su kalitesi tahmininde, bu modeller kimyasal bileşim verilerini (örn. pH, bulanıklık, çözünmüş oksijen) kirlilik risk seviyeleriyle eşleştirmede mükemmeldir. Geçmişteki kirlilik olayları üzerinde eğitime yeteneği, proaktif çevre yönetimine olanak tanıyan doğru tahminlere olanak tanır. Ayrıca, Rastgele Ormanlar gibi topluluk yöntemleri aşırı uyumu azaltarak sağlamlığı artırır ve gürültülü çevresel veriler için çok uygundur.

3.5.2. Anomali Tespiti için Denetimsiz Öğrenme

Etiketli veriler az olduğunda, denetimsiz öğrenme teknikleri gerekli hale gelir. K-ortalamalar kümeleme, DBSCAN ve oto kodlayıcılar, sıcaklık, nem veya atmosfer basıncındaki ani sapmaların aşırı hava olaylarının erken belirtilerini gösterebileceği iklim verilerindeki anormallikleri tespit etmek için özellikle yararlıdır. Bu modeller benzer veri noktalarını gruplandırarak normdan sapan örüntülerin tanımlanmasını sağlar. Örneğin, K-ortalamalar kümelemesi yaklaşan bir sıcak hava dalgasına işaret edebilecek beklenmedik sıcaklık artışlarını tespit edebilirken, normal hava kalitesi modellerine göre eğitilmiş otomatik kodlayıcılar olağandışı kirletici konsantrasyonlarını potansiyel tehlikeler olarak işaretleyebilir.

3.5.3. Karmaşık Özellik Çıkarımı için Derin Öğrenme

Uzaktan algılama ve uydu görüntüleri gibi yüksek boyutlu veri işleme gerektiren uygulamalar için derin öğrenme teknikleri geleneksel modellerden daha iyi performans göstermektedir. Konvolüsyonel sinir ağları (CNN'ler), spektral görüntülerden ormansızlaşma modellerini, arazi kullanım değişikliklerini ve su kirliliğini belirlemek için hiyerarşik özellik çıkarımından yararlandıkları hava görüntü analizinde özellikle etkilidir. Multispektral uydu görüntüleri üzerinde eğitilen CNN tabanlı modeller, sağlıklı ve stresli bitki örtüsü arasında ayrım yaparak kuraklığın etkisi ve yasadışı ormansızlaşma faaliyetleri hakkında bilgi sağlayabilir. Benzer şekilde, yeniden

Mevcut sinir ağları (RNN'ler) ve uzun kısa süreli bellek (LSTM) ağları, geçmiş sıcaklık ve yağış verilerine dayalı iklim eğilimi tahmini gibi zaman serisi tahminleri için çok uygundur.

3.5.4. Yorumlanabilirlik ve Hesaplama Kısıtlamalarının Dengelenmesi

Model seçimi yalnızca doğruluğa göre değil, aynı zamanda yorumlanabilirlik ve hesaplama fizibilitesine göre de belirlenir. Çevre bilimindeki karar vericiler genellikle müdahaleleri gerekçelendirmek için ebeveynler arası, açıklanabilir modellere ihtiyaç duyarlar. Karar ağaçları ve doğrusal regresyon modelleri basit kural tabanlı çıktılar sağlayarak mevzuata uygunluk ve politika oluşturma için tercih edilir. Buna karşılık, derin öğrenme modelleri yüksek doğruluk oranına sahip olsalar da genellikle "kara kutu" olarak görülmekte ve yorumlanabilirliğin çok önemli olduğu durumlarda benimsenmelerini sınırlamaktadır.

Ayrıca, hesaplama kısıtlamaları dağıtım fizibilitesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. IoT tabanlı gerçek zamanlı izleme istasyonları gibi uç bilişim uygulamaları, güç ve işlem sınırlamaları nedeniyle hafif modeller gerektirir. Karar ağaçları ve mantıksal regresyon, hızlı ve düşük güçlü çıkarım için uç cihazlarda yaygın olarak kullanılırken, bulut tabanlı mimariler ölçeklenebilir GPU kaynaklarından yararlanarak daha karmaşık derin öğrenme modellerini barındırabilir.

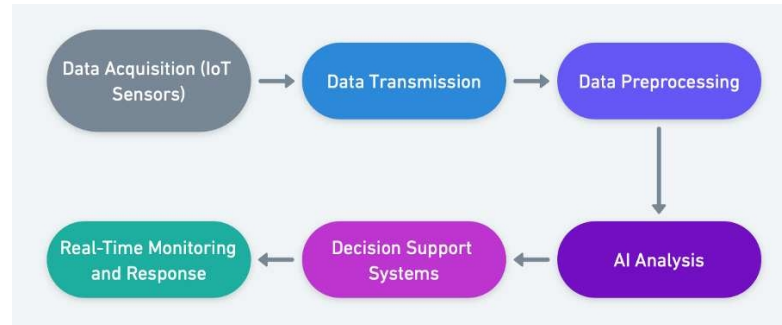
3.5.5. Gelişmiş Performans için Hibrit Yaklaşımlar

Giderek artan bir şekilde, birden fazla yapay zeka tekniğini birleştiren hibrit modeller çevresel izlemede üstün performans sunmaktadır. Örneğin, denetimsiz bir kümeleme yöntemi ilk olarak su kalitesi verilerindeki anormallikleri tespit edebilir ve bunlar daha sonra kirlilik kaynaklarını tahmin etmek için denetimli bir sınıflandırma modeline beslenir. Benzer şekilde, CNN'ler uydu görüntülerinden mekansal özellikler çıkarabilirken, geleneksel makine öğrenimi modelleri bu özellikleri sınıflandırma için kullanır ve yorumlanabilirlik ile hesaplama verimliliği arasında bir denge sağlar.

4. Geliştirilmiş Çevresel Karar Alma Süreci için Nesnelerin İnterneti ve Yapay

Zekadan **Yararlanma** Nesnelerin İnterneti (IoT) ve yapay zekanın (AI) birleşimi [130-132]

çevre bilimlerinde önemli ilerlemeler sağlamış [133] ve daha verimli ve veriye dayalı karar alma süreçleri. Birbirini tamamlayan yeteneklerden yararlanarak Bu teknolojilerin entegre sistemleri, gelişmiş veri toplama, gerçek zamanlı analiz ve eyleme geçirilebilir içgörülerin oluşturulmasını kolaylaştırır. Bu yakınsama, karmaşık çevresel zorlukların üstesinden daha yüksek doğruluk ve hızla gelme yeteneğini geliştirir. Bu bölümde IoT ve yapay zeka arasındaki sinerji incelenmekte, entegre sistemlerin iş akışı detaylandırılmakta ve gerçek zamanlı izleme ve duyarlı yönetim stratejilerinin avantajları araştırılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Entegre AI-IoT sistemi iş akışı. Entegre AI-IoT sistemi iş akışı.

IoT ve yapay zekanın birleşimi, çevresel izleme ve yönetim için güçlü bir çerçeve oluşturmaktadır [46,60,134]. IoT, birbirine bağlı sensörler ve cihazlardan oluşan bir ağ aracılığıyla kapsamlı çevresel verilerin sürekli ve otomatik olarak elde edilmesini sağlayan temel katman olarak işlev görür [135-137]. Bu sensörler sıcaklık [46,138], nem [46], hava ve su kalitesi [44,83], toprak nemi [138-140] ve kirlenici konsantrasyonları dahil olmak üzere çok çeşitli çevresel parametreleri yakalayıp çevresel koşullar hakkında bütünsel bir bakış açısı sunan gerçek zamanlı veri akışları üretmektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Entegre AI-IoT Sistemlerinin Bileşenleri Entegre AI-IoT Sistemlerinin Bileşenleri.

Bileşen	Açıklama	Entegre Sistemlerdeki Rolü
IoT sensörleri [46,83,139]	Sıcaklık, nem, pH, bulanıklık vb. gibi çevresel verileri toplayan cihazlar.	Çeşitli çevresel parametrelerden veri toplama
Veri iletimi [134,141,142]	Kablosuz iletişim standartları (ör. Wi-Fi, LoRaWAN, hücreli ağlar)	Toplanan verilerin merkezi havuzlara aktarılması
(Edge computing) (I) (143) (I)	Yerel veri işleme birimleri yakın veri kaynakları	Gecikmeyi ve bant genişliğini azaltmak için ön veri analizi
(AI) (algoritmalar) (I) (144) (-) (146) (I)	Makine öğrenme modelleri	Veri analizi, örüntü tanıma, tahmine dayalı modelleme
Karar destek sistemleri (KDS'ler) [145,147]	Veri sunan platformlar Paydaşlara yönelik içgörü ve tavsiyeler	Bilgilendirilmiş karar vermenin kolaylaştırılması
Görselleştirme araçları [148,149] Tabloları ve	Gösterge grafik arayüzler	Karmaşık verilerin erişilebilir bir formatta sunulması

Yapay zeka, IoT cihazlarından gelen ham verileri eyleme geçirilebilir içgörülere dönüştürerek bu yetenekleri güçlendirir. Makine öğrenimi algoritmaları ve gelişmiş veri analitiği sayesinde kalıpları tanımlar, anormallikleri tespit eder ve gelecekteki çevresel eğilimleri tahmin eder. Bu analitik yetenek, yapay zeka modellerinin kirlilik olaylarını veya iklim düzensizliklerini tahmin eden tahmine dayalı modelleme ve gerçek zamanlı veri girdilerini kullanarak en etkili yanıtları seçen otomatik karar verme gibi gelişmiş görevleri yerine getirmesine olanak tanır. Sonuç olarak, IoT ve AI arasındaki sinerji yalnızca veri zenginliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sistemi akıllı işleme yetenekleriyle donatarak ortaya çıkan çevresel zorluklara hızlı ve doğru bir şekilde yanıt vermeyi mümkün kılar.

4.1. Veri Kalitesi Zorlukları ve Ön İşleme

Yapay zeka güdümlü çevresel izlemenin doğruluğu, yüksek kaliteli girdi verilerine bağlıdır. Ancak IoT sensörleri, uydu görüntüleri ve izleme istasyonları genellikle eksik, gürültülü ve tutarsız veriler üretir. Eksik değerler sensör arızaları ve iletim hatalarından kaynaklanırken, sensör kayması ve insan hatası gürültüye neden olur. Uydu görüntüleri, IoT ağları ve meteoroloji istasyonları gibi farklı veri kaynaklarını entegre etmek, tutarlılığı sağlamak için uyumlaştırma gerektirir. Zamansal ve mekânsal boşluklar veri akışlarını daha da bozarak tahmine dayalı modellemeyi zorlaştırır.

Bu sorunları ele almak için, ön işleme teknikleri veri güvenilirliğini artırır. Eksik veri imputasyon yöntemleri arasında küçük boşluklar için ortalama, medyan veya mod değiştirme, sürekli veri kümeleri için zaman serisi interpolasyonu ve k-en yakın komşular veya oto kodlayıcılar kullanılarak makine öğrenimi tabanlı imputasyon yer alır. Hareketli ortalama yumuşatma ve Kalman filtreleri gibi gürültü azaltma teknikleri gerçek zamanlı sensör okumalarını iyileştirirken, aykırı değer tespiti

İzolasyon ormanı ve DBSCAN gibi yöntemler kirlilik ve su kalitesi verilerindeki anormallikleri belirler.

Normalleştirme ve standardizasyon veri kümeleri arasında tutarlılık sağlar. Min-max ölçeklendirme sıcaklık ve kirlilik seviyeleri gibi sensör okumalarını normalleştirirken, z-skor normalizasyonu dağılımları standartlaştırır. Temel bileşen analizi (PCA) gibi özellik mühendisliği teknikleri uydu görüntülerinde boyutluluğu azaltırken, Fourier trans- form ve dalgacık analizi iklim verilerinden örüntüler çıkarır.

Çok kaynaklı veri entegrasyonu, doğru YZ tahminleri için gereklidir. Veri füzyon teknikleri arasında ham sensör verilerini birleştiren düşük seviyeli füzyon, birden fazla veri kümesinden çıkarılan öznitelikleri birleştiren özellik seviyesi füzyon ve bağımsız YZ model çıktılarını bir araya getiren karar seviyesi füzyon yer alır. Mekânsal ve zamansal hizalama, uydu ve yer tabanlı sensör verilerini birbirine bağlayan coğrafi uyumlaştırma ile tutarlılığı sağlarken, zaman serisi senkronizasyonu iklim veri kümelerindeki tutarsızlıkları düzeltir. Ontoloji tabanlı veri standardizasyonu, çevresel alanlardaki formatları birleştirir ve uç bilişim, bulut tabanlı yapay zeka analizinden önce yerel ön işleme izin verir.

Etkili veri ön işleme, doğruluğu artırarak, gürültüyü azaltarak ve birlikte çalışabilirliği sağlayarak yapay zeka odaklı çevresel izlemeyi geliştirir. Gelecekteki araştırmalar, gelişmiş çevresel tahmin ve karar verme için otomatik ön işleme boru hatlarına, kendi kendine öğrenen imputasyon modellerine ve yapay zeka ile geliştirilmiş gerçek zamanlı veri füzyonuna odaklanmalıdır.

4.2. Entegre Sistemlerin İş Akışı

IoT ve yapay zekanın çevre bilimlerinde entegrasyonu, veri toplamadan karar vermeye sorunsuz bir geçiş sağlayan yapılandırılmış bir iş akışını takip eder. Süreç, IoT cihazlarının çevresel verileri sürekli olarak toplamak için stratejik olarak konumlandırıldığı veri toplama ile başlar. Bu sensörler Wi-Fi, LoRaWAN veya hücresel ağlar gibi iletişim protokollerini kullanarak bilgileri merkezi depolara veya bulut platformlarına iletir [136,150]. Bazı durumlarda, ilk veri işlemeyi kaynağın yakınında gerçekleştirmek, gecikmeyi ve bant genişliği tüketimini en aza indirmek için uç bilişimden yararlanılır.

Veriler elde edildikten sonra, yapay zeka modelleri için kalitesini ve kullanılabilirliğini artırmak için ön işleme [151] ve analize tabi tutulur. Bu aşama, gürültüyü ve doğru hataları ortadan kaldırmak, doğruluğu ve tutarlılığı sağlamak için veri temizlemeyi içerir. Veri entegrasyonu, çevresel koşullar hakkında kapsamlı bir bakış açısı sunan birleşik bir veri kümesi oluşturmak için çeşitli sensörlerden ve kaynaklardan gelen bilgileri birleştirir. Özellik mühendisliği, incelenen çevresel olayları karakterize eden en ilgili özellikleri çıkarır ve seçer [152].

Ön işlemeyi takiben, yapay zeka model eğitimi, rafine edilmiş veri kümesinden kalıpları öğrenmek için makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerini uygular ve doğru tahminler ve karar verme sağlar. Son olarak, gerçek zamanlı analitik, gelen veri akışlarını anlık olarak işler, anında içgörüler üretir ve proaktif yanıtları kolaylaştırır [153]. İş akışının son aşaması, paydaşların bilinçli kararlar almalarına yardımcı olmak için YZ modellerinin çıktılarından yararlanan karar destek sistemlerini (DSS'ler) içerir [145]. Görselleştirme araçları, etkileşimli gösterge tabloları aracılığıyla verileri ve YZ odaklı içgörülerini sunarak karmaşık bilgileri erişilebilir ve anlaşılır hale getirir [148]. Otomatik uyarılar ve bildirimler, önceden tanımlanmış eşiklere veya anormallik tespitine [60,154] dayalı olarak oluşturulur ve ortaya çıkan sorunlara hızlı yanıt verilmesini sağlar. Ayrıca, KDS'ler yapay zeka analizlerinden elde edilen eyleme geçirilebilir öneriler ve stratejik seçenekler sunarak politika yapıcılara, çevre yöneticilerine ve diğer paydaşlara karar alma süreçlerinde rehberlik eder. Kararların sonuçlarını sisteme geri dahil etmek için geri bildirim döngüleri oluşturulur ve devam eden öğrenme ve adaptasyon yoluyla YZ modellerinin doğruluğu ve güvenilirliği sürekli olarak artırılır.

4.3. Anlık İzleme ve Uyarlanabilir Yanıt

IoT ve yapay zekayı çevre bilimlerinde birleştirmenin en önemli faydalarından biri, gerçek zamanlı izleme ve hızlı yanıt verme yeteneğidir [155-157]. Bu yetenek, çevresel değişikliklerin anında tespit edilmesini ve düzeltici önlemlerin hızlı bir şekilde uygulanmasını kolaylaştırarak potansiyel olumsuz etkilerin en aza indirilmesine yardımcı olur. Gerçek zamanlı veri işleme, çevresel gözetim ve kontrolün doğruluğunu, yanıt verebilirliğini ve genel etkinliğini artıran birçok fayda sunar. Çevresel anormalliklerin [158] veya kirlilik olaylarının anında tespit edilmesini sağlayarak çevresel hasarın şiddetini azaltabilecek müdahalelerin zamanında yapılmasına olanak tanır [159]. YZ modelleri, analizlerini ve tahminlerini en son verilere dayanarak dinamik olarak uyarlayabilir ve çevresel koşullar değişse bile içgörülerin yeniden doğru ve alakalı olmasını sağlar. Bu uyarlanabilirlik, gelişmiş yanıt verebilirliği destekleyerek paydaşların hızla gelişen çevresel zorluklar karşısında çevik kararlar almasını sağlar [160-162]. Ayrıca, gerçek zamanlı üretim, veri toplama ve eylem arasındaki gecikmeleri en aza indirerek operasyonel verimliliği optimize eder, böylece kaynak tahsisini ve iş akışı yönetimini kolaylaştırır. Çeşitli hızlı müdahale senaryoları, anlık izleme ve veriye dayalı karar vermenin pratik faydalarını göstermektedir. Sel yönetiminde, nehir havzalarına ve sele eğilimli alanlara yerleştirilen IoT sensörleri su seviyeleri, yağış ve toprak doygunluğu hakkında veri toplamaktadır [163]. Yapay zeka modelleri, sel risklerini tahmin etmek, otomatik uyarıları tetiklemek ve sel etkilerini azaltmak için tahliye planlarını veya su yönlendirme stratejilerini başlatmak için bu verileri anlık olarak işler ve yorumlar [164,165]. Benzer şekilde, kentsel hava kalitesi kontrolünde IoT sensörleri kirlletici seviyelerini sürekli olarak izlemektedir. YZ algoritmaları PM_{2.5} veya NO₂ gibi kirleticilerdeki ani artışları tespit ettiğinde, halk sağlığını korumak için trafik kısıtlamaları veya endüstriyel emisyon kontrolleri gibi acil önlemler uygulanabilir [166,167]. Bir başka örnek ise ormanlık alanlara yerleştirilen IoT özellikli duman dedektörleri ve sıcaklık sensörlerinin yangın koşulları hakkında gerçek zamanlı veri sağladığı orman yangını tespittir [168,169] [170]. YZ ajanları bu verileri analiz ederek orman yangınlarının erken belirtilerini tespit etmekte, acil durum müdahale protokollerini etkinleştirmekte ve yangını kontrol altına almak için itfaiye kaynaklarını hızlı bir şekilde konuşlandırmaktadır [169,171]. Su kalitesi güvencesinde, IoT sensörleri pH [172], çözülmüş oksijen [172,173] ve su ekosistemlerindeki kirlletici konsantrasyonları gibi parametreleri izler [174-176]. Yapay zeka modelleri, kirlilik olaylarının göstergesi olan anormallikleri tespit ederek endüstriyel deşarjların durdurulması, ilgili makamların bilgilendirilmesi ve su kalitesini ve sucul yaşamı korumak için temizleme işlemlerinin başlatılması gibi acil iyileştirme eylemlerini teşvik eder. Enerji şebekesi yönetimi de anlık izleme ve yapay zeka entegrasyonundan faydalanmaktadır [177]. IoT sensörleri, akıllı şebekelerdeki enerji tüketimini ve üretimini gerçek zamanlı olarak takip etmektedir [146,178,179]. YZ sistemleri bu verileri enerji dağıtımını geliştirmek, talep dalgalanmalarını tahmin etmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarını verimli bir şekilde yönetmek, şebeke istikrarını sağlamak ve enerji israfını azaltmak için işler [105]. IoT ve YZ'nin entegrasyonu, kapsamlı veri toplamayı akıllı analiz ve eyleme geçirilebilir içgörülerle birleştirerek çevre bilimlerinde karar verme süreçlerini temelden geliştirmektedir [180,181]. Bu teknolojiler arasındaki sinerji, dinamik çevresel koşullara uyum sağlayabilen ve proaktif yönetim stratejilerini destekleyen esnek, anlık izleme sistemlerinin geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır [60]. Entegre AI-IoT sistemleri, veri toplamadan karar desteğine kadar iş akışını kolaylaştırarak çevre bilimcilerini, politika yapımcıları ve kilit paydaşları karmaşık sorunları daha etkili ve duyarlı bir şekilde ele alma konusunda güçlendirir. Teknoloji geliştikçe, IoT ve AI arasındaki sinerji, çevre yönetimine daha sürdürülebilir ve dirençli yaklaşımları teşvik ederek daha fazla yeniliği teşvik edecektir.

5. Çevresel Veri Odağı

Çevresel veriler, çevre bilimlerinde etkin gözetim ve bilinçli karar verme için temel taş işlevi görmektedir [182,183]. Çeşitli çevresel veri türleri arasında su kalitesi ve iklim verileri, ekosistemler, halk sağlığı [184,185] ve küresel iklim modelleri [186,187] üzerinde tespit edilen etkileri nedeniyle özellikle önemlidir. Bu bölümde, bu alanlarda izlenen kritik parametreler, veri analizinde yapay zekanın (AI) rolü ve kapsamlı ve sürekli izleme sağlamak için kullanılan Nesnelerin İnterneti (IoT) çözümleri incelenmektedir.

5.1. Su Kalitesi Verileri

Su kalitesinin izlenmesi [188,189], sucul ekosistem sağlığının korunması ve insan tüketimi ve endüstriyel uygulamalar için su kaynaklarının korunması için çok önemlidir. Su kalitesinin değerlendirilmesi, birlikte suyun genel durumuna ilişkin kapsamlı bir anlayış sunan birden fazla parametrenin değerlendirilmesini gerektirir [175,190].

5.1.1. İzlenen Temel Parametreler

Su kalitesinin izlenmesi, birkaç kritik parametrenin sürekli olarak değerlendirilmesini gerektirir. pH seviyesi suyun asiditesini veya alkalinitesini yansıtır [117,191], nötr pH değeri olan 7'den farklılıklar endüstriyel atık sular veya asit yağmurları gibi kaynaklardan gelen potansiyel kirliliğe işaret eder ve bu da su ekosistemlerini ve su uygunluğunu olumsuz etkileyebilir [192]. Bulanıklık, askıda kalan partiküllerin varlığını ölçerek suyun berraklığını değerlendirir. Yüksek bulanıklık seviyeleri toprak erozyonu, alg patlamaları veya endüstriyel atıklardan kaynaklanabilir, bu da suda yaşayan organizmalara zarar verebilir ve su arıtma süreçlerini zorlaştırabilir [193,194]. Çözünmüş oksijen (ÇO) sudaki oksijen konsantrasyonunu gösteren çok önemli bir parametredir [195,196] ve balıkların ve diğer su canlılarının hayatta kalması için hayati önem taşır. Düşük ÇO seviyeleri hipoksik koşullara yol açarak balıkları öldürebilir ve su ekosistemlerini bozabilir. Ayrıca, kurşun ve cıva gibi ağır metaller [197,198], nitrat ve fosfat gibi besin maddeleri, bakteri ve virüsler [199,200] dahil patojenler ve çeşitli organik bileşikler dahil olmak üzere kirleticilerin izlenmesi, tüketim, rekreasyon ve vahşi yaşam için su güvenliğinin sağlanması açısından çok önemlidir (Tablo 4).

Tablo 4. Su kalitesinde Su kalitesinde izlenen temel parametreler.

Parametre	Önem	(Ortak) (Ölçüm) Yöntemle
pH [192,201,202]	Asitlik veya alkaliniteyi gösterir; sapmalar kirlilik kaynaklarına işaret eder	pH metre, kolorimetrik testler
Bulanıklık [192,193,203,204]	Su berraklığını ölçer; yüksek seviyeleri asılı partikülleri gösterir	Bulanıklık ölçerler, nefelometreler
düşük Çözünmüş Oksijen [195,196] açılabilir	Sucul yaşam için gereklidir; seviyeleri şunlara yol açabilir hipoksik koşullar	DO ölçüm cihazları, titrasyon yöntemleri
Kirleticiler [197,200] içerir	Ağır metaller, besinler, patojenler, organik bileşikler	Spektroskopî, kromatografi, biyosensörler

5.1.2. Su Kalitesinde Yapay Zeka Uygulamaları

Yapay zeka, tahmin yeteneklerini geliştirerek ve tespit süreçlerini otomatikleştirerek su kalitesi izlemede devrim yaratmıştır [205]. Tahmine dayalı modelleme, geçmiş ve gerçek zamanlı verileri incelemek için yapay zeka destekli algoritmalar kullanır ve potansiyel kirlilik olaylarının öngörülmesini sağlar [206]. Verilerdeki kalıpları ve ilişkileri tanıyarak,

Bu modeller, endüstriyel dökülmeler veya tarımsal akış gibi kirlenme olaylarını tahmin edebilir ve etkilerini azaltmak için proaktif önlemler alınmasını sağlayabilir [207,208]. Ayrıca yapay zeka, bağlı IoT cihazlarından gelen sürekli veri akışlarını işleyerek otomatik algılama ve uyarıları kolaylaştırır [209,210]. Makine öğrenimi modelleri, pH veya DO gibi parametrelerdeki anormallikleri belirleme yeteneğine sahiptir ve çevre yetkililerine ve paydaşlara bildirimleri otomatik olarak tetikler. Bu, kirlilik kaynaklarını kontrol altına almak ve düzeltmek için hızlı müdahale eylemlerine olanak tanıyarak çevre ve halk sağlığı risklerini en aza indirir [211,212].

5.1.3. Su İzleme için IoT Cihazları

IoT cihazlarının konuşlandırılması, su kalitesinin kapsamlı ve sürekli olarak izlenmesinin ayrılmaz bir parçasıdır. Sağlam veri toplama ve gerçek zamanlı izleme sağlamak için çeşitli sensör türleri stratejik olarak yerleştirilir. pH sensörleri [213], asitlik seviyelerini sürekli olarak izlemek için su kütleleri içinde birden fazla derinliğe ve konuma kurulur. Bulanıklık sensörleri, su berraklığındaki değişiklikleri tespit etmek için potansiyel kirlilik kaynaklarının akış yukarısına ve akış aşağısına yerleştirilir [214]. Çözünmüş oksijen sensörleri, sucul yaşam için yeterli oksijen seviyelerini sağlamak amacıyla üreme alanları ve habitatlar gibi kritik bölgelere yerleştirilir [215,216]. Ayrıca, özel kirleticiler sensörleri, ağır metaller veya organik bileşikler gibi belirli kirleticileri tespit etmek için endüstriyel deşarj noktalarının ve tarımsal akış alanlarının yakınına yerleştirilir [217,218]. Örnek çalışmalar IoT ile entegre su kalitesi izleme sistemlerinin etkisini vurgulamaktadır. Örneğin, Büyük Göller bölgesinde entegre bir sistem pH, bulanıklık, çözünmüş oksijen ve kirleticiler hakkında veri toplamak için çeşitli noktalarda IoT sensörleri kullanmaktadır. Yapay zeka ajanları bu verileri gerçek zamanlı olarak analiz ederek kirlilik olaylarını tespit etmekte ve gelecekteki eğilimleri tahmin ederek iyileştirme stratejilerini bilgilendirmektedir [103]. Bu sistem, bölgenin su kalitesini proaktif olarak yönetme becerisini önemli ölçüde geliştirerek kirlilikle ilgili sorunların görülme sıklığını azaltmıştır. Benzer şekilde, tarımsal ortamlardaki akıllı sulama sistemleri, sulama suyu kalitesini izlemek için IoT özellikli toprak ve su sensörlerini kullanarak mahsullerin en uygun su koşullarını almasını sağlar. Yapay zeka algoritmaları, sulama uygulamalarını dinamik olarak ayarlamak için sensör verilerini analiz ederek besin akışını önler ve su israfını en aza indirir. Bu yöntem, su kaynaklarını korurken ve çevresel etkiyi en aza indirirken mahsul verimini artırır [103].

5.1.4. Su İzlemede Başarılı AI-IoT Entegrasyonları

AI-IoT sistemleri, çeşitli çevre izleme uygulamalarında başarıyla uygulanmış ve doğruluk, verimlilik ve gerçek zamanlı karar vermede önemli gelişmeler göstermiştir. Bu entegrasyonlar özellikle su kalitesi değerlendirmesi, kirlilik tespiti ve iklim etki analizinde etkili olmuştur. Aşağıdaki vaka çalışmaları, AI-IoT çözümlerinin çeşitli çevresel ortamlarda kayda değer uygulamalarını vurgulamaktadır.

AI-IoT entegrasyonunun dikkate değer bir uygulaması, sensör ağlarının sıcaklık, pH, bulanıklık ve çözünmüş oksijen seviyeleri gibi su parametreleri hakkında sürekli olarak veri topladığı gerçek zamanlı çevresel izlemedir. YZ güdümlü modeller, anormallikleri tespit etmek ve tehlikeli koşulları tahmin etmek için bu verileri işler. Örneğin, Khan ve diğerleri (2024) [134] tarafından yapılan bir çalışmada, akıllı şehirlerde IoT tabanlı bir su kalitesi izleme sistemi geliştirilmiş, kirlilik olaylarını tahmin etmek için düşük maliyetli sensörler ve makine öğrenimi algoritmalarından yararlanılarak kentsel su güvenliği artırılmıştır. Benzer şekilde, Ooko ve diğerleri (2024) [219] Afrika'daki kırsal evsel hava kirliliğinin izlenmesi ve tahmin edilmesinde AI-IoT çözümlerinin etkinliğini ve gerçek zamanlı su kirliliği takibi için potansiyel uygulamaları göstermiştir.

AI-IoT, kentsel uygulamaların ötesinde, toprak nemi, sıcaklığı ve besin seviyelerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayarak akıllı tarımı dönüştürmüştür. Konar (2024) [220] tarafından yapılan bir çalışmada, otomatik mahsul yönetimi için bir AI-IoT çerçevesi tanıtılmıştır

sulama ve gübreleme programlarını optimize etmek için tahmine dayalı analitiği entegre ederek kentsel tarımda [221]. Bu sistemler su verimliliğini artırarak kaynak tüketimini azaltırken tarımsal verimi en üst düzeye çıkarmıştır.

Uzak ve kaynakların sınırlı olduğu bölgelerde, dinamik AI-IoT mimarileri, ultra düşük güçlü IoT cihazlarında güncellenebilir AI modelleri sağlayarak uyarlanabilirliği artırmıştır. Alselek ve diğerleri (2024) [222], YZ modellerinin 5G özellikli IoT ağlarında dinamik olarak güncellendiği, ürün yazılımı değişikliklerine olan ihtiyacı ortadan kaldıran ve uzun vadeli dağıtım fizibilitesini artıran bir çerçeve önermiştir. Bu yenilik, özellikle YZ modellerinin gelişen çevresel koşullara dinamik olarak uyum sağlaması gereken afet eğilimli bölgelerdeki su izleme ağları için faydalıdır.

AI-IoT, biyoçeşitliliğin değerlendirilmesi ve korunmasında da etkili olmuştur. Rathoure ve diğerleri (2024) [223], deniz ve tatlı su ekosistemlerinde tür çeşitliliğini ve habitat sağlığını izlemek için IoT sensör ağlarının ve derin öğrenme modellerinin nasıl kullanıldığını göstermiştir. Bu sistemler gerçek zamanlı ekolojik içgörüler sağlayarak daha etkili koruma stratejilerine olanak tanımıştır [224].

5.2. İklim Verileri

İklim verileri, küresel iklim sisteminin durumunu ve dinamiklerini yansıtan çok çeşitli göstergeleri kapsamaktadır. İklim verilerinin hassas bir şekilde izlenmesi ve analiz edilmesi, iklim değişikliğinin anlaşılması, gelecekteki eğilimlerin tahmin edilmesi ve etkili azaltım ve uyum stratejilerinin geliştirilmesi için çok önemlidir [225-227].

5.2.1. Temel İklim Göstergeleri

Bazı temel iklim göstergeleri, iklim sisteminin çeşitli yönleri hakkında fikir vermektedir [228,229]. Hem yüzey hem de atmosferik sıcaklık ölçümleri, küresel ısınma eğilimlerini, sıcak hava dalgası olaylarını ve bunların ekosistemler ve insan nüfusları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Nem seviyeleri havadaki nem miktarını ölçer, hava modellerini, yağışları ve sis ve gök gürültülü fırtına gibi olayların oluşumunu etkiler. Yağmur ve kar yağışı da dahil olmak üzere yağış verileri su kaynakları yönetimi, tarım ve sel tahminleri için hayati önem taşır. Rüzgar hızını ve yönünü analiz eden rüzgar modelleri, hava sistemlerini, okyanus akıntılarını ve kirleticilerin ve aerosollerin dağılımını anlamak için gereklidir (Tablo 5).

Tablo 5. Temel iklim göstergeleri. Temel iklim göstergeleri.

İklim Göstergesi	Önem	İzleme Yöntemleri
değerlendirir [230,231]	Küresel Sıcaklığı ısınma eğilimleri ve sıcak hava dalgası	Termometreler, uydu sensörleri, meteoroloji istasyonları
etkileri (Nem [] (232) (.) (233) ()) modellerini etkiler	Hava durumu ve yağış	Higrometreler, meteoroloji balonları, yer tabanlı sensörler Yağmur göstergeleri, radar sistemleri,
Yağış [234,235]	Su kaynakları için hayati önem taşır yönetimi ve taşkın tahmini	uydu gözlemleri
Rüzgar modelleri [236]	Anlamak için gerekli hava sistemleri ve kirleticî dağılımı	Anemometreler, Doppler radarı, hava durumu uyduları

5.2.2. İklim Verisi Analizinde Yapay Zeka

İklim verilerinin analizinde, iklim modellerinin doğruluğunun artırılmasında ve önemli eğilimlerin ve anomalilerin belirlenmesinde yapay zekanın rolü çok önemlidir [100]. İklim modellemesi ve tahmini, karmaşık iklim etkileşimlerini simüle eden ve gelecekteki iklim senaryolarını daha hassas bir şekilde tahmin eden yapay zeka algoritmalarından, özellikle de derin öğrenme modellerinden yararlanmaktadır. Bu modeller, tarihsel kayıtlardan ve gerçek zamanlı gözlemlerden elde edilen geniş veri kümelerini birleştirerek sıcaklık değişiklikleri, yağış ve aşırı hava olaylarıyla ilgili tahminlerin doğruluğunu artırmaktadır [237]. Ayrıca, yapay zeka teknikleri iklim verilerindeki eğilimlerin ve anormalliklerin tanımlanmasını kolaylaştırmaktadır. Makine öğrenimi algoritmaları, kutup bölgelerindeki hızlı buz erimesi veya yağış düzenlerindeki öngörülemeyen değişimler gibi uzun vadeli kalıpları ve ani düzensizlikleri belirlemek için kapsamlı iklim veri kümelerini işler [238]. Bu içgörüler, odaklanmış iklim eylem girişimlerini bilgilendirmek ve iklimle ilgili ortaya çıkan sorunları ele almak için stratejiler geliştirmek için hayati önem taşımaktadır.

5.2.3. İklim İzleme için IoT Çözümleri

Sensörler ve uzaktan algılama cihazlarından oluşan bir sistem aracılığıyla iklim verilerinin kapsamlı ve sürekli toplanmasında IoT teknolojilerinin rolü çok önemlidir [239]. Sıcaklık, nem, yağış, rüzgar hızı ve diğer iklim göstergeleri hakkında canlı veri toplamak için çeşitli bölgelere IoT özellikli meteoroloji istasyonları ağı dağıtılmıştır. Bu meteoroloji istasyonları, iklim modellerinin ve tahminlerinin çözünürlüğünü ve doğruluğunu artıran granüler veriler sağlamaktadır [137]. Yere dayalı meteoroloji istasyonlarının [240] yanı sıra, uydu görüntüleme teknolojileri [241,242] ve iklim izleme araçlarıyla donatılmış insansız hava araçları [243] uzak ve erişilemeyen bölgelerden veri toplamaktadır. Bu cihazlar atmosferik bileşimi, deniz yüzeyi sıcaklıklarını ve buz örtüsünü ölçerek küresel iklim dinamiklerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. IoT çözümlerinin yapay zeka odaklı analitiklerle entegrasyonu, iklim verilerinin yalnızca kapsamlı bir şekilde toplanmasını değil, aynı zamanda verimli bir şekilde analiz edilmesini sağlayarak iklim bilimciler ve politika yapıcılar için zamanında ve eyleme geçirilebilir içgörüler sağlar [154]. Su kalitesi ve iklim verileri, ekosistemleri sürdürme, halk sağlığını koruma ve iklim değişikliğini ele alma çabalarını destekleyen çevresel izlemenin temel bileşenleridir. Bu teknolojilerin entegrasyonu, bu veri akışlarını kapsamlı ve gerçek zamanlı olarak izleme yeteneklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Yapay zeka odaklı tahmine dayalı modelleme ve otomatik algılama sistemleri, çevre yönetimi uygulamalarının duyarlılığını ve doğruluğunu artırırken, IoT özellikli sensör ağları sürekli ve ayrıntılı veri toplanmasını sağlar. Yapay zeka ve IoT bir araya geldiğinde, su kalitesini korumak, iklim etkilerini azaltmak ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemek için önleyici tedbirlere olanak tanıyarak daha bilinçli ve hızlı karar almayı sağlar.

6. Çevre Bilimlerinde IoT ve Yapay Zekayı Birleştirmenin Avantajları

Çevre bilimlerinde Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Yapay Zeka (AI) kombinasyonu, çevresel izleme ve yönetim uygulamalarının etkinliğini, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini büyük ölçüde artıran çok sayıda avantaj sunmaktadır [180]. Bu entegrasyon, veri toplama ve analizinin hassasiyetini ve doğruluğunu artırır, kaynak kullanımını optimize eder, ölçeklenebilir ve uyarlanabilir izleme sistemlerini destekler ve proaktif çevre yönetimini mümkün kılar [60,238]. Bu faydalar, karmaşık çevresel zorlukların üstesinden gelmek ve sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmek için kilit öneme sahiptir (Tablo 6).

Tablo 6. AI-IoT entegrasyonundan elde edilen faydaların karşılaştırmalı analizi.

Fayda	Açıklama	Çevre Bilimleri Üzerindeki Etkisi
Geliştirilmiş doğruluk ve hassasiyet [211,244]	Geliştirilmiş veri kalibrasyonu, gürültü azaltma ve yüksek çözünürlüklü içgörüler yapay zeka güdümlü veri işleme yoluyla	Daha güvenilir ve ayrıntılı çevresel değerlendirmeler
Verilerin ve kararların güncelliğinin iyileştirilmesi [245,246]	Gerçek zamanlı veri işleme ve otomatik karar verme, çevresel değişikliklere hızlı yanıt vermeyi kolaylaştırır	Daha hızlı ve daha etkili müdahaleler, çevresel etkilerin azaltılması
Maliyet verimliliği ve kaynak optimizasyonu [247,248]	Otomasyon işgücü maliyetlerini azaltır, yapay zeka enerji ve kaynak kullanımını optimize eder ve kestirimci bakım operasyonel giderler	Daha sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir çevre girişimleri
İzleme sistemlerinin ölçeklenebilirliği ve esnekliği [246]	IoT ağları, uç bilişim ve modüler tasarım ile desteklenerek kolayca genişletilebilir ve yeni parametrelere uyarlanabilir	Artan veri hacimlerini ve çeşitli izleme ihtiyaçlarını karşılama becerisi
Proaktif çevre yönetiminin kolaylaştırılması [249]	Erken uyarı sistemleri, öngörücü bakım ve stratejik planlama yapay zeka içgörülerıyla etkinleştirildi	Reaktif yönetimden proaktif yönetime geçiş, sürdürülebilirlik ve dayanıklılığın artırılması

6.1. Geliştirilmiş Doğruluk ve Hassasiyet

IoT ve AI kombinasyonu, çevresel veri toplama ve analizinin doğruluğunu ve hassasiyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Yüksek hassasiyetli sensörlerle donatılmış IoT cihazları, bir dizi çevresel parametre hakkında sürekli olarak ayrıntılı ve kapsamlı veriler toplamaktadır [211]. Bu sensörler sıcaklık, nem, hava ve su kalitesi, toprak nemi ve kirleticiler gibi değişkenleri olağanüstü bir hassasiyetle takip etmektedir [244]. Yapay zeka algoritmaları, bu sensörler tarafından üretilen devasa hacimdeki verileri analiz ederek geleneksel analiz tekniklerinin gözden kaçırabileceği karmaşık örüntüleri ve korelasyonları ortaya çıkarır. Bu sofistike veri işleme, ölçümlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlayarak çevresel değerlendirmelerdeki hata payını büyük ölçüde en aza indirir. Örneğin, Büyük Göller bölgesinde konuşlandırılanlar gibi su kalitesi izleme sistemlerinde [103], IoT sensörleri pH, bulanıklık, kirleticiler ve çözünmüş oksijen seviyeleri hakkında canlı veri toplar [250]. YZ ajanları bu verileri sürekli olarak analiz ederek kirlilik olaylarına işaret edebilecek küçük sapmaları bile tespit eder. Bu hassasiyet seviyesi, erken tespit ve hızlı iyileştirme eylemlerine olanak tanır ve su kaynaklarının güvenliğini sağlar.

6.2. Veri ve Kararların Zamanlılığında İyileşme

Zamanındalık, ortaya çıkan sorunlara gecikmeli müdahalelerin sorunları daha da kötüleştirebileceği ve önemli çevresel ve halk sağlığı etkilerine yol açabileceği çevre bilimlerinde kritik bir faktördür. IoT teknolojisi ve YZ'nin entegrasyonu, verilerin yalnızca gerçek zamanlı olarak toplanmasını değil, aynı zamanda hızlı bir şekilde işlenmesini ve analiz edilmesini sağlayarak hızlı karar vermeyi kolaylaştırır [246]. IoT cihazları sürekli olarak veri iletir ve YZ sistemleri bu bilgileri anlık olarak işleyecek şekilde tasarlanmıştır ve veri toplama ile eyleme geçirilebilir içgörüler arasındaki gecikmeleri ortadan kaldırır [147]. YZ'nin otomatik karar verme yetenekleri, sistemlerin belirli çevresel koşullara otonom olarak yanıt vermesini sağlayarak zamanlılığı daha da artırır. Örneğin, kentsel hava kalitesinin yönetilmesinde, YZ algoritmaları aşağıdakilerden gelen verileri işler

Kirletici seviyelerini gerçek zamanlı olarak izleyen IoT sensörleri [156]. Kirletici seviyeleri güvenli eşikleri aştığında, YZ sistemi trafik sinyallerini ayarlamak, kirlilik kontrol mekanizmalarını etkinleştirmek veya halk sağlığı uyarıları yayınlamak gibi önlemleri otonom olarak başlatabilir [251]. Bu hızlı yanıt verme özelliği, müdahalelerin zamanında ve etkili olmasını sağlayarak halk sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltır.

6.3. Maliyet Verimliliği ve Kaynak Optimizasyonu

IoT ve yapay zekanın entegre edilmesi, süreçleri düzene sokarak, manuel müdahale ihtiyacını en aza indirerek ve operasyonel verimliliği artırarak önemli maliyet tasarruflarına ve kaynakların optimum kullanımına yol açmaktadır [247]. Otomatik veri toplama ve analizi, kapsamlı manuel izleme çabalarına olan bağımlılığı en aza indirir, böylece işgücü maliyetlerini düşürür ve insan kaynaklarını daha stratejik görevlere yönlendirir [248]. Ek olarak, IoT altyapısının yapay zeka güdümlü öngörücü bakımı, ekipman arızalarını öngörür ve zamanında bakım planlar, maliyetli kesinti sürelerini önler ve izleme sistemlerinin ömrünü uzatır. Enerji verimliliği, maliyet tasarrufunun gerçekleştirildiği bir başka alandır. Yapay zeka algoritmaları, IoT teknolojisinin çalışmasını optimize ederek enerji tüketimini etkin bir şekilde yönetebilir [252]. Örneğin, akıllı sulama sistemlerinde YZ, toprak neminin canlı verilerine dayanarak ihtiyaç duyulan kesin su miktarını belirler, su ve enerji kullanımını azaltır [81]. Bu katranlı yaklaşım sadece değerli kaynakları korumakla kalmaz, aynı zamanda çiftçiler için işletme maliyetlerini düşürerek tarımsal üretkenliği ve sürdürülebilirliği artırır. Ayrıca, yapay zeka sistemleri, potansiyel çevresel risk veya kaynak kıtlığı alanlarını belirlemek için verileri analiz ederek kaynakların verimli bir şekilde tahsis edilmesini kolaylaştırır. Bu bilinçli tahsis, su, enerji ve finansman gibi sınırlı kaynakların en çok ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılmasını, etkilerinin en üst düzeye çıkarılmasını ve sürdürülebilir çevre yönetimi uygulamalarının teşvik edilmesini sağlar [253].

6.4. İzleme Sistemlerinin Ölçeklenebilirliği ve Esnekliği

IoT ve yapay zekayı birleştirmenin önemli bir avantajı, çevresel izleme sistemlerine sağladığı eşsiz ölçeklenebilirlik ve esnekliktir. IoT ağları, daha geniş coğrafi alanları kapsamak veya ek çevresel parametreleri izlemek için daha fazla sensör eklenerek kolayca genişletilebilir [254]. Bu ölçeklenebilirlik, izleme sistemlerinin performanstan ödün vermeden genişleyen çevresel izleme ihtiyaçlarına paralel olarak büyüebilmesini sağlar. IoT cihazlarının ve yapay zeka algoritmalarının modüler tasarımı, belirli çevresel gereksinimlere göre özelleştirmeye ve genişletmeye olanak tanır [255]. Örneğin, başlangıçta su kalitesini izlemek için tasarlanan bir izleme sistemi, belirli kirleticileri tespit etmek için ek sensörler içerecek veya gerektiğinde iklim veri parametrelerini entegre edecek şekilde sorunsuz bir şekilde uyarlanabilir. Bu esneklik, çevresel koşullar ve izleme hedefleri zaman içinde geliştikçe izleme sistemlerinin ilgili ve etkili kalmasını sağlar. Ayrıca, uç bilişimin IoT cihazlarıyla birleşmesi bu sistemlerin ölçeklenebilirliğini ve esnekliğini artırmaktadır [256]. Sistem, ilk veri işlemeyi uçta, veri kaynağına yakın bir yerde gerçekleştirerek gecikmeyi azaltır ve bant genişliği tüketimini düşürerek daha hızlı ilk analizlere ve daha verimli veri işlemeye olanak tanır [257]. Bu merkezi olmayan yaklaşım, büyük ölçekli sensör ağlarının çeşitli ve uzak konumlarda konuşlandırılmasını destekleyerek kapsamlı ve gerçek zamanlı çevresel izleme sağlar.

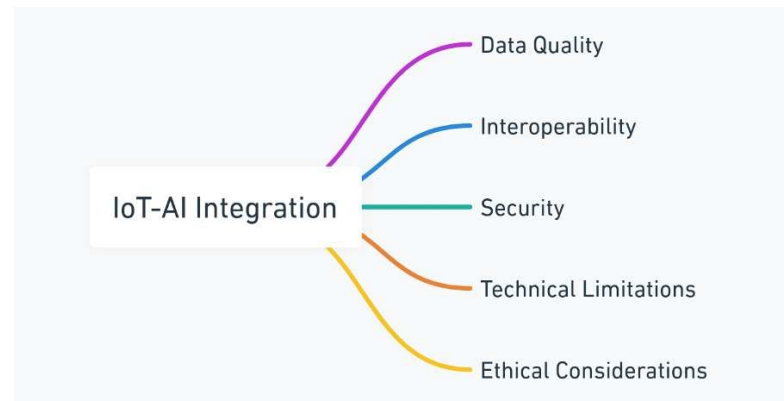
6.5. Proaktif Çevre Yönetiminin Kolaylaştırılması

IoT ve yapay zekayı entegre etmenin belki de en dönüştürücü faydası, proaktif çevre yönetiminin kolaylaştırılmasıdır [258]. Bu proaktif yaklaşım, odağı çevresel sorunlara verilen reaktif tepkilerden, bu sorunları büyümeden önce öngörmeye ve önlemeye kaydırmaktadır. Canlı veri toplama ve tahminler, paydaşların gelecekteki çevresel tehlikeleri erken tespit etmelerini ve etkilerini azaltmak için önleyici tedbirler uygulamalarını sağlar [259].

Erken uyarı sistemleri, seller, orman yangınları veya kirlilik olayları gibi potansiyel çevresel tehlikelerin işaretlerini tam olarak gelişmeden önce tespit ederek proaktif yönetimi örneklendirmektedir. Örneğin, sele eğilimli bölgelerdeki su seviyelerini ve yağış yoğunluğunu izleyen IoT sensörleri, yapay zeka modellerinin sel risklerini tahmin etmek için analiz ettiği gerçek zamanlı veriler sağlar [260]. Bu tahmin, otomatik uyarıların etkinleştirilmesine ve tahliye planlarının veya su yönlendirme stratejilerinin başlatılmasına olanak tanıyarak sel etkilerinin şiddetini etkili bir şekilde azaltmaktadır [261]. Acil durum müdahalesine ek olarak, proaktif çevre yönetimi stratejik planlama ve dinamik kaynak yönetimini de kapsar [258]. Yapay zeka odaklı analitik, uzun vadeli çevresel eğilimler hakkında içgörüler sunarak iklim esnekliği ve kaynakların korunmasını amaçlayan sürdürülebilir politika ve stratejilerin formülasyonunu desteklemektedir. Örneğin, yenilenebilir enerji yönetiminde [262], YZ sistemleri, canlı veri tüketimine ve öngörücü tahminlere dayalı olarak enerjinin dağıtımını ve depolanmasını optimize ederek yenilenebilir kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar ve ağın istikrarını artırır [263]. Ayrıca, proaktif yönetim, YZ'nin IoT sensörlerinden gelen verilere dayanarak bakım ihtiyaçlarını tahmin ettiği, altyapı arızalarını önlediği ve önemli çevresel izleme sistemlerinin sürekli çalışmasını sağladığı altyapı bakımına kadar uzanmaktadır [157]. Bu öngörü yalnızca çevresel yönetim uygulamalarının güvenilirliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda uzun vadeli sürdürülebilirliği ve gelişen çevresel zorluklara karşı dayanıklılığı da teşvik eder [254]. Bu teknolojilerin çevre bilimine entegrasyonu, çevresel izleme ve yönetim kabiliyetlerini derinden geliştiren bir dizi fayda sunmaktadır. Gelişmiş doğruluk ve hassasiyet güvenilir ve ayrıntılı veri toplanmasını sağlarken, iyileştirilmiş zamanlılık hızlı ve bilinçli karar vermeyi kolaylaştırır. Maliyet verimliliği ve kaynak optimizasyonu, çevresel girişimleri daha sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir hale getirirken, AI-IoT sistemlerinin ölçeklenebilirliği ve uyarlanabilirliği, çeşitli ortamlarda esnek ve kapsamlı izleme sağlar. En önemlisi, proaktif çevre yönetimine geçiş, çevresel zorlukların öngörülmesini ve azaltılmasını sağlayarak sürdürülebilir ve dirençli bir geleceği teşvik etmektedir. IoT ve AI teknolojileri geliştikçe, bunların birleşik entegrasyonu, çağımızın karmaşık ve sürekli değişen çevresel zorluklarının üstesinden gelmede, sürdürülebilirliği, dayanıklılığı ve veriye dayalı ve bilinçli karar vermeyi destekleyen yenilikleri teşvik etmede şüphesiz çok önemli olacaktır.

7. Zorluklar ve Dikkat Edilmesi Gerekenler

IoT ve AI teknolojilerinin dönüştürücü bir şekilde benimsenmesine rağmen, etkili ve sorumlu bir dağıtım sağlamak için ele alınması gereken birçok zorluk ve husus vardır. Bu bölümde veri kalitesi ve güvenilirliği, sistem entegrasyonu ve birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve gizlilik sorunları, teknik ve altyapı sınırlamalarının yanı sıra etik ve düzenleyici kaygılarla ilgili temel zorluklar incelenmektedir (Tablo 7) (Şekil 3).



Şekil 3. Yapay Zeka-IoT AI-IoT entegrasyonundaki zorluklara genel bakış.

Tablo 7. AI-IoT entegrasyonundaki zorluklara genel bakış.

Meydan Okuma	Açıklama	Potansiyel Çözümler
Veri kalitesi ve güvenilirliği [264-267]	IoT sensörleri şunları yapmalıdır doğru, tutarlı ve eksiksiz veri sağlamak; sensör kayması ve çevresel parazitlerle başa çıkmak	Düzenli kalibrasyon, sağlam veri temizleme protokolleri, yedeklilik
Entegrasyon ve birlikte çalışabilirlik [268-271]	Heterojen IoT cihazlarının ve yapay zeka sistemlerinin farklı protokoller ve veri formatlarıyla birleştirilmesi; eski sistem uyumluluğu	Standartlaştırılmış protokoller, ara katman çözümleri, ölçeklenebilir çerçeveler
Güvenlik ve gizlilik endişeleri [150,272-274]	Verilerin siber saldırılara ve yetkisiz erişime karşı güvence altına alınması; hassas çevresel ve kişisel bilgilerin korunmasının sağlanması.	Gelişmiş şifreleme, kimlik doğrulama mekanizmaları, yönetmeliklere uyum
Teknik ve altyapı kısıtlamaları [221,275]	Uzak bölgelerde güvenilir bağlantı ve güç kaynağı; yapay zeka modelleri için yeterli hesaplama kaynakları; IoT altyapısının bakımı	Enerji hasadı çözümleri, uç bilişim, sağlam bakım planları
Etik ve düzenleyici hususlar [224,276,277]	Yapay zeka modellerindeki önyargılarla mücadele etmek, şeffaflık ve yorumlanabilirlik sağlamak, veri toplama için bilgilendirilmiş onay almak ve veri koruma düzenlemelerine uymak	Adalet duyarlı algoritmalar, açıklanabilir yapay zeka teknikleri, net yönetim çerçeveleri

7.1. Veri Kalitesi ve Güvenilirliği

Yapay zeka destekli çevresel izleme sistemlerinin etkinliği, IoT cihazları tarafından toplanan verilerin kalitesine ve güvenilirliğine bağlıdır [266]. Yüksek kaliteli veriler doğru analiz, güvenilir tahminler ve güvenilir karar verme sağlarken, düşük veri kalitesi hatalı sonuçlara ve etkisiz müdahalelere yol açabilir. Hassas ölçümlerin sürdürülmesi için sensör doğruluğunun ve düzenli kalibrasyonun sağlanması şarttır. Zaman içinde sensörler sapabilir veya bozulabilir [264], bu da veri bütünlüğünü korumak için sürekli bakım gerektirir. Ek olarak, veri tutarlılığı ve bütünlüğü kritik öneme sahiptir; eksik veya tutarsız veriler [267] YZ modellerinin performansını olumsuz etkileyerek yanlış değerlendirmelere yol açabilir. Çevresel faktörler de sensör performansına müdahale edebilir [265], çünkü zorlu veya değişken koşullarda konuşlandırılan IoT cihazları fiziksel hasara veya aşırı hava koşullarına maruz kalabilir ve böylece veri güvenilirliğini tehlikeye atabilir. Veri kümesindeki anormallikleri, aykırı değerleri ve hataları tespit edip düzeltmek ve kullanılan verilerin genel kalitesini korumak için sağlam veri doğrulama ve temizleme protokolleri gereklidir.

7.2. Entegrasyon ve Birlikte Çalışabilirlik Sorunları

IoT ve AI teknolojilerinin çeşitli platformlar ve sistemler arasında sorunsuz entegrasyonunun sağlanması, birleşik çevresel izleme çözümlerinin geliştirilmesi için gereklidir. Bununla birlikte, bu entegrasyon genellikle heterojen cihazların, farklı veri formatlarının ve değişen iletişim protokollerinin varlığı nedeniyle engellenmektedir [268]. IoT cihazları tipik olarak farklı iletişim standartlarını kullanır ve bu da verilerin birleşik bir YZ sisteminde toplanmasını zorlaştırabilir [269]. Ayrıca, mevcut çevresel izleme altyapıları, modern IoT ve YZ teknolojileriyle doğal olarak uyumlu olmayan eski sistemlere bağlı olabilir [270], bu da dikkatli planlama ve olası sistem yükseltmeleri gerektirir.

sorunsuz entegrasyon için. Bu entegrasyonun ölçeklenebilirliği de zorluklara yol açmaktadır; IoT cihazlarının sayısı arttıkça, artan sayıda sensörden gelen verilerin yönetilmesi ve birleştirilmesi daha karmaşık hale gelmektedir [271]. Etkili yapay zeka modeli eğitimi ve dağıtımı sağlamak için, standartlaştırılmış veri formatları oluşturmak ve çeşitli IoT cihazları ve platformları arasında tutarlı veri semantiği sağlamak, kapsamlı ve tutarlı çevresel analizi kolaylaştırmak çok önemlidir.

Birlikte Çalışabilirlik Zorlukları

Heterojen IoT cihazları ve YZ sistemleri arasındaki birlikte çalışabilirlik, özellikle farklı sensör ağlarının, iletişim protokollerinin ve veri formatlarının sorunsuz bir şekilde entegre edilmesi gereken çeşitli çevresel bağlamlarda, çevresel izlemede önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Birçok çevresel izleme sistemi, her biri farklı veri aktarım standartlarını kullanan birden fazla tedarikçinin IoT cihazlarına dayanmakta ve bu da YZ odaklı analizi engelleyen uyumluluk sorunlarına yol açmaktadır.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için FIWARE [269] gibi ara katman platformları, veri formatlarını ve API'leri standartlaştırmak için kullanılmış ve çeşitli IoT ekosistemleri arasında sorunsuz iletişim sağlanmıştır. Örneğin, Güneydoğu Asya'da konuşlandırılan çok sensörlü bir sel izleme ağında, Satıcı A'dan pH sensörleri ve Satıcı B'den bulanıklık sensörleri dahil olmak üzere farklı kaynaklardan gelen veriler JSON-LD şemaları kullanılarak uyumlu hale getirilmiş ve yapay zeka modellerinin verileri tutarlı bir şekilde yorumlayıp analiz edebilmesi sağlanmıştır [165].

Altyapı esnekliği, YZ modellerinin uç ve bulut bilişim sistemlerinde sorunsuz model yürütmeyi kolaylaştıran Docker gibi kontainerize ortamlarda konuşlandırılmasıyla daha da geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, IoT uç cihazlarında gerçek zamanlı YZ işlemine izin verirken, hesaplama kaynakları mevcut olduğunda ölçeklenebilirlik ve platformlar arası dağıtım sağladı.

Bu gelişmelere rağmen, birlikte çalışabilirlikle ilgili bazı zorluklar devam etmektedir. Zigbee ve LoRaWAN gibi satıcıya özgü iletişim protokolleri, ağlar arası entegrasyonu sağlamak için uyarlanabilir geçit yolları gerektirmekte ve sistem karmaşıklığını artırmaktadır. Ayrıca, eski atık su arıtma tesisleri gibi birçok çevresel izleme altyapısı, modern API desteğinden yoksun olan ve özel olarak oluşturulmuş entegrasyon katmanları gerektiren eski SCADA (Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama) sistemleri üzerinde çalışmaktadır [275].

Gelecekteki araştırmalar, birleşik IoT birlikte çalışabilirlik çerçeveleri geliştirmeye, açık kaynak veri alışverişi standartlarını entegre etmeye ve eski ve yeni nesil IoT izleme sistemleri arasında uyumluluğu artırmak için AI odaklı protokol uyarlama katmanları oluşturmaya odaklanmalıdır. Bu zorlukları ele alarak, AI-IoT entegrasyonu çeşitli çevresel uygulamalarda daha ölçeklenebilir, uyarlanabilir ve etkili hale gelebilir.

7.3. Güvenlik ve Gizlilik Endişeleri

IoT cihazlarının yaygın kullanımı ve topladıkları büyük miktarda veri, önemli güvenlik ve gizlilik zorlukları ortaya çıkarmaktadır [272]. IoT cihazları genellikle uzak veya korumasız konumlara yerleştirilir, bu da onları hem fiziksel kurcalamaya hem de siber saldırılara karşı hassas hale getirir. Veri bütünlüğünü korumak ve yetkisiz erişimi önlemek için güçlü şifreleme, kimlik doğrulama ve erişim kontrol mekanizmalarının uygulanması çok önemlidir [273]. Ayrıca, çevresel veriler yanlışlıkla bireyler veya kuruluşlar hakkında hassas bilgileri yakalayabilir ve bu da gizlilik endişelerini artırabilir. Örneğin, tarım alanlarındaki IoT sensörleri, uygun şekilde korunmadığı takdirde istismar edilebilecek özel tarım tekniklerini ortaya çıkaran veriler toplayabilir [274]. Ayrıca, YZ güdümlü sistemler veri ihlalleri, fidye yazılım saldırıları [150] ve YZ modellerini yanlış sonuçlar üretecek şekilde manipüle edebilen düşmanca makine öğrenimi saldırıları gibi çeşitli siber güvenlik tehditleriyle karşı karşıyadır. Veri ile uyumluluk

koruma düzenlemeleri ve kapsamlı güvenlik önlemlerinin uygulanması, hassas çevresel verilerin korunması ve paydaşların güveninin korunması için hayati önem taşımaktadır.

7.4. Teknik ve Altyapı Kısıtlamaları

Çevre bilimlerinde entegre IoT ve YZ sistemlerinin konuşlandırılması, genellikle etkinliklerini ve ölçeklenebilirliklerini engelleyebilecek teknik ve altyapı sınırlamaları ile kısıtlanmaktadır. Güvenilir İnternet bağlantısı, IoT cihazlarından YZ sistemlerine gerçek zamanlı veri aktarımı için çok önemlidir [275]; ancak uzak veya az gelişmiş bölgelerde, sınırlı bant genişliği ve bağlantı zorlukları veri akışını bozabilir ve sistem performansını düşürebilir [221]. Ayrıca, birçok IoT cihazı, istikrarlı bir güç kaynağına erişimin zor olduğu ortamlarda çalışır, bunun yerine pillere veya yenilenebilir enerji kaynaklarına güvenir ve bu da sürekli çalışmayı sağlamak için verimli enerji yönetimi gerektirir. Yapay zeka modelleri, özellikle derin öğrenme tabanlı olanlar, hem eğitim hem de çıkarım için önemli hesaplama kaynakları gerektirir ve bu da kısıtlı kaynaklara sahip ortamlarda sınırlayıcı bir faktör olabilir. Bu modellerin bu tür ortamlarda konuşlandırılması, hesaplama taleplerini yerel olarak ele almak için optimize edilmiş algoritmalar ve muhtemelen uç bilişim çözümleri gerektirir. Ayrıca, AI-IoT sistemlerinin sürekli bakımı ve teknik desteğinin sağlanması, donanım arızalarının yönetimi, yazılım güncellemeleri ve teknik aksaklıkların derhal ele alınmasını içeren sürdürülebilir operasyonları için kritik öneme sahiptir.

7.5. Etik Hususlar

IoT ve YZ'nin çevre bilimlerinde entegrasyonu, sorumlu ve adil teknoloji kullanımını sağlamak için ele alınması gereken çeşitli etik zorlukları gündeme getirmektedir. Önemli bir endişe, YZ modellerinin eğitim verilerinden önyargıları istemeden sürdürdüğü ve potansiyel olarak haksız veya ayrımcı çevresel yönetim kararlarına yol açtığı algoritmik önyargıdır [276]. Bu önyargıların azaltılması, adalete duyarlı algoritmaların uygulanmasını ve çeşitli ve temsili veri kümelerinin kullanılmasını gerektirir.

Açıklanabilir YZ (XAI) yeteneklerinin geliştirilmesi, karar alma süreçlerinde hesap verebilirliğin sağlanması, YZ odaklı tavsiyelerin doğrulanması ve güven oluşturulması için çok önemlidir, çünkü karmaşık YZ modelleri, özellikle de derin öğrenme sistemleri, genellikle "kara kutular" olarak işlev görür ve paydaşların kararların nasıl alındığını anlamasını zorlaştırır.

Ayrıca, AI-IoT sistemleri dolaylı olarak insan denekleri içerebilecek çevresel verileri topladığında gizlilik endişeleri ortaya çıkmaktadır. Bu, tarımsal arazi sahiplerinden, endüstriyel tesislerden veya topluluk su kaynaklarından gelen verileri içerir. Bireylerin haklarını korumak ve etik veri toplama uygulamalarını sağlamak için bilgilendirilmiş onay ve açık veri kullanım politikaları oluşturulmalıdır [224].

Hesap verebilirlik bir diğer kritik faktördür. Otomatik kirlilik tespiti ve kaynak tahsisi gibi çevresel izlemede yapay zeka odaklı karar verme, olası hataları veya istenmeyen sonuçları ele almak için açık hesap verebilirlik mekanizmaları gerektirir. YZ güdümlü eylemlerden kimin sorumlu olduğunu tanımlayan yönetim çerçevelerinin oluşturulması, sorumlu dağıtımı sağlamak için çok önemli olacaktır.

7.6. Düzenleyici Hususlar

Çevre bilimlerinde YZ ve IoT'yi yöneten gelişen düzenleyici ortam, veri gizliliği, güvenlik, çevre koruma ve etik YZ kullanım yasalarına uyulmasını gerektirmektedir [277]. Avrupa'daki Genel Veri Koruma Yönetmeliği (GDPR) ve sektöre özgü kılavuzlar gibi çeşitli uluslararası ve bölgesel düzenlemeler, veri toplama, işleme ve paylaşma konusunda katı gereklilikler getirmektedir.

Veri koruma yasaları, özellikle IoT sensörleri endüstriyel emisyonları, su kullanımını veya hava kalitesini izlediğinde, verilerin kötüye kullanımının yasal ve mali sonuçları olabileceği durumlarda, çevresel verilerin güvenli bir şekilde depolanması ve işlenmesi ihtiyacını vurgulamaktadır. Güçlü en-

Hassas bilgileri korumak için şifreleme, anonimleştirme ve güvenli erişim kontrolleri uygulanmalıdır.

Farklı AI-IoT sistemleri arasında birlikte çalışabilirlik, uyumluluk ve güvenliği sağlamak için standartlaştırılmış düzenleyici çerçeveler de gerektirir. Açık düzenlemeler olmadan, veri formatları, iletişim protokolleri ve uyumluluk standartlarındaki tutarsızlıklar, sektörler arasında sorunsuz entegrasyonu engelleyebilir. Düzenleyici kurumlar, otomatik karar verme sistemlerinde adaleti, güvenliği ve hesap verebilirliği sağlayan ortak YZ yönetim politikalarının oluşturulmasını giderek daha fazla savunmaktadır.

Ayrıca, çevresel düzenlemeler kirlilik kontrollerini, sürdürülebilir kaynak kullanımını ve emisyon takibini uygulamak için yapay zeka destekli uyumluluk izleme araçlarını içermektedir. Yapay zeka destekli uyum mekanizmaları, yasal risklerden kaçınmak için mevcut çevre yasaları ve endüstri standartlarıyla uyumlu olmalıdır.

Paydaşlar, standartlaştırılmış protokoller ve işbirliğine dayalı politika oluşturma yoluyla bu düzenleyici zorlukları proaktif olarak ele alarak, AI-IoT sistemlerinin güvenli, şeffaf ve yasal olarak uyumlu bir şekilde konuşlandırılmasını sağlayabilirler [254]. Etkili düzenleyici çerçeveler yalnızca riskleri azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda YZ güdümlü çevresel izleme çözümlerinde inovasyonu ve güveni de teşvik edecektir.

7.7. Çevre Bilimleri için AI-IoT Benimsemesinde Sosyoekonomik Faktörler

Yapay zeka ve IoT'nin çevresel izlemeye entegrasyonu yalnızca teknolojik bir ilerleme değildir; aynı zamanda erişilebilirliği, ölçeklenebilirliği ve uzun vadeli sürdürülebilirliği belirleyen sosyoekonomik faktörlerden de etkilenir. Bu teknolojilerin başarılı bir şekilde uygulanması finansal yatırım, ekonomik fizibilite, politika teşvikleri, kamu algısı ve işgücünün hazır olmasına bağlıdır.

Çevre bilimlerinde AI-IoT sistemlerini konuşlandırmanın maliyeti, özellikle gelişmekte olan bölgeler için önemli bir engel olmaya devam etmektedir. Sensör ağları, bulut bilişim altyapısı ve YZ modeli geliştirme için yüksek ilk yatırım maliyetleri, yaygın olarak benimsenmesini engelleyebilir. Büyük şirketler ve devlet kurumları sofistike YZ güdümlü çevresel izleme sistemlerini karşılayabilirken, daha küçük belediyeler ve gelişmekte olan ülkeler genellikle bu tür çözümleri geniş ölçekte uygulayacak mali kaynaklardan yoksundur.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için, pahalı bulut tabanlı işleme bağımlılığını azaltmak amacıyla uç bilişim ve düşük güçlü IoT cihazları gibi uygun maliyetli alternatifler araştırılmaktadır. Ayrıca, kamu-özel sektör ortaklıkları ve devlet destekli girişimler, yapay zeka odaklı çevresel izleme projelerini sübvans ederek finansal boşlukları kapatabilir.

Çevre bilimlerinde AI-IoT çözümlerinin kabulü aynı zamanda halkın güvenine ve farkındalığına da bağlıdır. Yapay zeka odaklı izleme sistemleri daha fazla doğruluk ve verimlilik sunarken, veri gizliliği, iş değiştirme ve karar verme şeffaflığı ile ilgili endişeler benimsemeye karşı direnç yaratabilir.

Örneğin, otomatikleştirilmiş çevresel izleme sistemleri, insan liderliğindeki denetimlerin yerini alabilir ve geleneksel izleme sektörlerinde iş kayıplarına ilişkin endişeleri artırabilir. Buna ek olarak, topluluklar, kamu yararı yerine şirket çıkarlarını desteklediğini düşündükleri takdirde YZ odaklı karar alma sürecine karşı çıkabilirler. Bu endişeleri şeffaf YZ yönetimi, katılımcı karar alma ve halkın katılımı kampanyaları yoluyla ele almak, güven oluşturmaya ve YZ odaklı çevresel çözümlere eşit erişim sağlamaya yardımcı olabilir.

Çevre bilimlerinde AI-IoT çözümlerinin yaygın olarak benimsenmesi, AI odaklı içgörülerini yönetebilecek, sürdürebilecek ve yorumlayabilecek yetenekli bir işgücü gerektirmektedir. Bununla birlikte, birçok bölgede yapay zeka, makine öğrenimi, IoT entegrasyonu ve çevresel veri analitiği konularında uzman profesyonel eksikliği yaşanmaktadır.

Eğitim programlarına, mesleki eğitime ve disiplinler arası yeniden arama girişimlerine yapılacak yatırımlar bu beceri açıklarının kapatılmasına yardımcı olabilir. Üniversiteler arasında işbirliği,

endüstrileri ve devlet kurumları, çevre bilimcilerini YZ okuryazarlığı ile daha fazla donatabilir ve YZ profesyonellerini çevresel uygulamalarda uzmanlaşmaya teşvik edebilir.

AI-IoT çözümleri sürdürülebilir çevre yönetimi için umut vaat etse de, faydalarının eşit olmayan bir şekilde dağılması riski vardır. Yüksek gelirli ülkeler ve teknolojik olarak gelişmiş endüstriler, üstün çevresel izleme için yapay zekadan yararlanabilirken, düşük gelirli bölgeler kaynak eksikliği nedeniyle iklim değişikliği ve kirliliğe karşı savunmasız kalmaktadır.

AI-IoT teknolojilerine eşit erişimin sağlanması, gelişmekte olan ülkelerin düşük maliyetli AI odaklı çevresel izleme sistemlerini benimsemelerini sağlayan açık kaynak girişimleri, teknoloji paylaşım anlaşmaları ve finansman modelleri gerektirmektedir. YZ ve IoT, bu teknolojileri daha kapsayıcı hale getirerek yalnızca çevresel sürdürülebilirliğe değil, aynı zamanda küresel ekonomik ve sosyal dayanıklılığa da katkıda bulunabilir.

8. Gelecek Yönelimler ve Ortaya Çıkan Eğilimler

İzleme ve karar verme süreçlerinin hassasiyeti ve verimliliği, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve yapay zeka (AI) gibi teknolojilerin katkıları sayesinde çevre bilimlerinde önemli gelişmeler kaydetmiştir. Bununla birlikte, teknolojik ortam hızla gelişmeye devam etmekte ve gelecekte daha da büyük ilerlemeler ve yenilikçi uygulamalar vaat etmektedir. Bu bölümde, özellikle su kalitesi ve iklim verilerine vurgu yapılarak, çevre bilimlerinde daha fazla devrim yaratmaya hazır olan gelecekteki beklenen yönler ve ortaya çıkan eğilimler araştırılmaktadır (Tablo 8).

Tablo 8. Çevre bilimleri için yapay zeka ve IoT teknolojilerinde ortaya çıkan trendler.

Yükselen Trend	Açıklama	Potansiyel Uygulamalar	Beklenen Etki
Gelişmiş makine öğrenimi teknikleri [266,278-280]	Derinlemesine iyileştirmeler Daha karmaşık çevresel veri analizi için öğrenme, transfer öğrenme, birleştirilmiş öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme	Gelişmiş iklim modellemesi, uyarlanabilir kaynak yönetimi	Daha yüksek öngörü doğruluğu ve uyarlanabilirlik
IoT teknolojilerinin evrimi [221,274-276,281]	Daha sağlam ve verimli çevre için LPWAN, gelişmiş sensörler, enerji hasadı, minyatürleştirme ve uç bilişimin geliştirilmesi izleme sistemleri	Büyük ölçekli sensör ağları, uzaktan ve gerçek zamanlı izleme	Artan veri ayrıntı düzeyi ve operasyonel verimlilik
Blockchain ve edge ile entegrasyon Hesaplama [224,238,254,277]	Veri bütünlüğü ve izlenebilirliği için blok zincirinden ve merkezi olmayan işleme için uç bilişimden yararlanma	Güvenli veri paylaşımı, gerçek zamanlı analiz	Gelişmiş güvenlik, azaltılmış gecikme süresi ve iyileştirilmiş ölçeklenebilirlik
Küresel çevresel izleme ağlar [278-280]	Senkronize veri toplama ve analizi için standartlaştırılmış küresel ağların kurulması	Kapsamlı iklim izleme, afet müdahale koordinasyonu	Küresel çabaların birleştirilmesi çevresel zorluklar
Toplum katılımı ve vatandaş bilimi [281-285]	Vatandaş odaklı veri toplama, eğitim programları, etkileşimli platformlar ve işbirliğine dayalı araştırma fırsatları aracılığıyla toplulukları güçlendirmek	Genişletilmiş veri toplama, artırılmış kamu bilinci	Demokratikleştirilmiş çevresel izleme ve artan halkın katılımı

8.1. Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi Tekniklerindeki Gelişmeler

Makine öğrenimi algoritmaları sürekli olarak gelişmekte ve çevre bilimine uygulanabilecek giderek daha gelişmiş araçlar ve metodolojiler sağlamaktadır [63,286].

Evrişimli sinir ağları ve tekrarlayan sinir ağları da dahil olmak üzere derin öğrenme mimarilerindeki gelişmeler, örüntü tanıma ve tahmine dayalı modellemenin doğruluğunu artırarak çeşitli alanlarda daha kesin sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu gelişmeler, iklim izleme için uydu görüntüleri ve su kalitesi değerlendirmesi için sensör verileri de dahil olmak üzere karmaşık çevresel verilerin daha iyi yorumlanmasına olanak sağlamaktadır [280,287]. Transfer öğrenimi ve etki alanı uyarlaması, belirli veriler üzerinde eğitilen yapay zeka modellerinin farklı ancak ilgili alanlarda kullanılmak üzere uyarlanmasını sağlayan önemli teknikler olarak ortaya çıkmaktadır. Bu, özellikle belirli bölgelerdeki veya parametrelerdeki veri kıtlığının, daha bol veri kümeleri üzerinde eğitilmiş mevcut modellerden yararlanılarak ele alınabileceği çevre bilimlerinde faydalıdır [288]. Açıklanabilir YZ (XAI), YZ modellerinin nasıl tahminlerde bulunduğu dair içgörüler sağlayan bir diğer önemli gelişmedir [289]. YZ sisteminin bu şeffaflığı, çevresel karar verme sürecinde güvenin sağlanması ve hesap verebilirliğin sağlanması için çok önemlidir [290]. Merkezi olmayan bir makine öğrenimi yaklaşımı olarak ilgi çeken federasyon öğrenimi [291], modellerin yerel veri örneklerini tutan birden fazla cihaz veya sunucuda, verilerin kendisinin değiş tokuş edilmesine gerek kalmadan eğitilmesini sağlar [292]. Bu, çeşitli kaynaklardan toplanan hassas çevresel veriler için çok önemli olan veri gizliliğini ve güvenliğini artırır. Buna ek olarak, takviyeli öğrenme, akıllı sulama sistemlerinde su dağıtımını optimize etmek [279] veya akıllı şebekelerdeki yenilenebilir enerji [278] kaynaklarını yönetmek gibi dinamik ve uyarlanabilir çevresel yönetim görevleri için araştırılmaktadır.

8.2. Çevresel Uygulamalar için IoT Teknolojilerinin Evrimi

LoRaWAN [274,276] ve NB- IoT'yi [221,275] içeren düşük güçlü geniş alan ağları (LPWAN) [293] tarafından sağlanan minimum enerji tüketimi ile uzun menzilli iletişim, bu teknolojileri uzak veya ulaşılması zor alanlarda büyük ölçekli sensör ağlarının konuşlandırılması için ideal hale getirmekte ve çevresel izleme için sağlam, verimli ve çok yönlü çözümler sunmaktadır. Çevre sensörlerinin hassasiyetini, doğruluğunu ve çok işlevliliğini artıran gelişmiş sensör teknolojileri de geliştirilmektedir. Sudaki biyolojik kirleticileri tespit etmek için biyosensörler ve ayrıntılı iklim verileri toplamak için gelişmiş meteorolojik sensörler gibi yenilikler çevresel izlemenin kapsamını genişletmektedir [281]. Enerji hasadı ve sürdürülebilir güç çözümleri, IoT dağıtımının kritik zorluklarından biri olan güç kaynağı sorununu ele almaktadır. Güneş, rüzgar ve kinetik enerji hasadındaki gelişmeler, IoT cihazlarının geleneksel güç kaynaklarına dayanmadan sürdürülebilir bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu, özellikle çevreye duyarlı veya uzak konumlardaki uzun vadeli dağıtımlar için faydalıdır [294]. Ek olarak, IoT cihazlarının minyatürleştirilmesi ve entegrasyonuna yönelik eğilim [255], minimum çevresel ayak izi ile yoğun sensör ağlarının konuşlandırılmasına izin vermektedir. Bu, su kalitesi ve iklim verilerindeki karmaşık mekansal ve zamansal değişimleri tespit etmek için çok önemli olan ayrıntılı ve kapsamlı çevresel izleme sağlar. Uç bilişim de IoT teknolojilerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmekte ve kaynakta ön veri işleme ve analizine olanak sağlamaktadır. Bu da gecikme süresini ve bant genişliği kullanımını azaltarak daha hızlı ilk analizlere ve daha verimli veri işlemeye olanak sağlıyor. Uç bilişimin IoT ile entegrasyonu, çevresel izleme sistemlerinin ölçeklenebilirliğini ve esnekliğini artırarak artan veri hacimlerine ve çeşitli çevresel koşullara uyum sağlayabilmelerini sağlar.

8.3. Diğer Teknolojilerle Entegrasyon

IoT ve yapay zekanın gelişmekte olan teknolojilerle birleşimi, çevre bilimleri üzerindeki etkilerini önemli ölçüde artıracaktır. Kayda değer bir örnek, IoT cihazları tarafından toplanan çevresel verilerin bütünlüğünü ve şeffaflığını sağlayabilen blok zinciri teknolojisi [254]. Merkezi olmayan defteri sayesinde blok zinciri, çeşitli paydaşlar arasında verilerin güvenli bir şekilde paylaşılmasını kolaylaştırarak çevre bilimlerinde güven ve hesap verebilirliği teşvik etmektedir.

izleme ve raporlama. Ayrıca, blok zinciri tabanlı akıllı sözleşmeler, bağlılığı sağlamak ve kaynak yönetimi verimliliğini artırmak için IoT cihazlarından gelen verileri ve yapay zeka analizlerini kullanarak çevre politikalarını ve anlaşmalarını otomatikleştirebilir ve uygulayabilir.

Daha önce tartışıldığı gibi, uç bilişim, merkezi olmayan veri işlemeyi mümkün kılarak AI-IoT sistemlerinin işlevselliğini geliştirir. Bu entegrasyon, gerçek zamanlı analitik ve karar verme süreçlerinin veri kaynağına daha yakın bir yerde gerçekleşmesini sağlayarak merkezi bulut sistemlerine olan bağımlılığı azaltmakta ve esnekliği artırmaktadır. Ayrıca, artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) teknolojileri, karmaşık çevresel verilerin sürükleyici görselleştirmelerini sağlamak için IoT ve AI ile birleştirilmektedir [224,295]. Bu teknolojiler, paydaşların çevresel koşullar ve eğilimlerle etkileşime girmesini ve bunları yorumlamasını kolaylaştırarak daha etkili karar almayı desteklemektedir.

Henüz ilk aşamalarında olmasına rağmen, kuantum bilişim çevresel modelleme ve simülasyona dönüşüm potansiyeli sunmaktadır [296]. Kuantum algoritmaları, karmaşık çevresel sorunları geleneksel bilgisayarlardan çok daha hızlı bir şekilde çözmeye yeteneğine sahiptir ve daha hassas iklim modelleri, yenilenebilir enerji sistemlerinin daha iyi optimizasyonu ve büyük ölçekli çevresel simülasyonlar imkanı sunmaktadır [238,277]. Kuantum iletişim gelişmeye devam ettikçe, IoT ve yapay zeka ile entegrasyonu çevre bilimleri alanında çığır açan ilerlemelere yol açabilir.

8.4. Küresel Çevresel İzleme Ağları için Potansiyel

IoT ve AI tarafından desteklenen küresel çevresel izleme ağlarının kurulması, gezegen ölçeğinde kapsamlı ve senkronize veri toplama ve analizi vaat etmektedir. Standartlaştırılmış protokoller ve veri formatları geliştirmek, çeşitli sensör ağlarını entegre etmek ve farklı bölgeler ve ülkeler arasında sorunsuz veri alışverişi sağlamak için gereklidir [279]. Uluslararası işbirliği, küresel izleme çabalarını kolaylaştıran ve çeşitli kaynaklardan gelen verilerin merkezi veya birleştirilmiş veri havuzlarında toplanmasını sağlayan ortak standartlar oluşturmak için çok önemlidir [280]. Uluslararası çevre ajansları, araştırma kurumları ve hükümetler arasında veri paylaşımını ve işbirliğini mümkün kılan ortak platformlar küresel izleme çabalarının etkinliğini artırabilir [278]. Bu platformlar, yapay zeka odaklı analizlerden elde edilen en iyi uygulamaların, teknolojilerin ve içgörülerin paylaşılmasını sağlayarak küresel çevre sorunlarının üstesinden gelmek için işbirliğine dayalı, birleşik bir yaklaşımı teşvik eder. YZ tarafından üretilen içgörülerin yanı sıra çevresel verileri görselleştiren gerçek zamanlı küresel gösterge panoları sayesinde paydaşlar hayati bilgilere anında erişebilir ve bu da iklim değişikliği, su kıtlığı ve diğer acil çevresel endişeler gibi kritik sorunları ele almak için dünya çapındaki çabaları destekler.

Ayrıca, küresel izleme ağları afet müdahale çabalarının koordine edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Yapay zeka algoritmaları, çeşitli bölgelerden gelen verileri analiz ederek doğal afetlerin yayılmasını ve potansiyel etkisini tahmin edebilir, acil durum müdahale eylemlerini kolaylaştırmaya ve geliştirmeye yardımcı olabilir. Bu kapsamlı yaklaşım, kaynakların verimli bir şekilde tahsis edilmesini sağlar ve toplulukların çevresel krizlerin etkilerini ele almak ve hafifletmek için daha iyi hazırlanmasını sağlar.

8.5. Toplum Katılımının ve Vatandaş Biliminin Geliştirilmesi

Toplulukları güçlendirmek ve vatandaşları çevresel izlemeye dahil etmek, IoT ve AI teknolojilerinin benimsenme gücünü ve erişimini önemli ölçüde değiştirebilir. Vatandaş odaklı veri toplama, çevresel verilerin kapsamını ve ayrıntı düzeyini genişleterek farklı konumlardan değerli içgörüler sağlar [285]. Bireyleri IoT cihazları kullanmaya ve çevresel izleme projelerine veri katkısında bulunmaya teşvik eden girişimler akıllı telefonlardan, giyilebilir sensörlerden ve DIY IoT kitlerinden yararlanabilir. Bu, veri toplamaya yaygın katılımı mümkün kılabilir ve topluluk arasında sahiplenme ve hesap verebilirlik duygusunu teşvik edebilir.

Üyeler. Çevresel izleme için IoT ve YZ araçlarının nasıl kullanılacağı konusunda eğitim ve kaynak sağlayan eğitim programları ve atölye çalışmaları, daha fazla katılım ve katılımı teşvik etmek için çok önemlidir. Bu programlar vatandaşları sensörleri yerleştirmek, verileri yorumlamak ve YZ odaklı analizlere katkıda bulunmak için gereken becerilerle donatarak çevresel izleme sistemlerinin genel etkinliğini artırır [284]. Vatandaşların çevresel verileri görüntülemesini, keşfetmesini ve bunlarla etkileşime girmesini sağlayan ilgi çekici platformlar ve mobil uygulamalar katılımı önemli ölçüde artırabilir [283]. Bu platformlar gerçek zamanlı güncellemeler, kişiselleştirilmiş içgörüler ve toplum odaklı girişimler için fırsatlar sunarak çevresel verileri genel halk için daha erişilebilir ve eyleme geçirilebilir hale getirir. Vatandaşların gözlemlerini paylaşmalarını, iyileştirmeler önermelerini ve karar alma süreçlerine katkıda bulunmalarını sağlayan geri bildirim sistemleri, çevresel izleme sistemlerinin toplumun ihtiyaçlarına ve bakış açılarına hitap etmesini sağlamaya yardımcı olur [281]. Tanıma programları, ödüller veya topluluk projelerine katkılar yoluyla katılımı teşvik etmek, vatandaş bilimi girişimlerine daha fazla katılımı motive edebilir. Bu artan katılım, daha kapsamlı veri toplanmasına yol açar ve bir çevre yönetimi kültürünü teşvik eder. Vatandaşları veri analizine ve çözüm geliştirmeye dahil eden işbirlikçi araştırma fırsatları, bilim toplulukları ile halk arasındaki boşluğu doldurarak çevresel sorunların daha iyi anlaşılmasını ve yenilikçi çözümlerin birlikte oluşturulmasını teşvik eder. Çevre biliminin geleceği, yapay zeka ve IoT teknolojilerinde süregelen ilerlemelerden ve ortaya çıkan trendlerden derinden etkilenecektir. Yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri ilerlemeye devam ettikçe, çevresel izleme sistemlerinin analitik yeteneklerini ve tahmin yeteneklerini geliştireceklerdir. Aynı zamanda, IoT teknolojilerinin gelişimi daha sağlam, verimli ve uyarlanabilir veri toplama yöntemleri sunacaktır. Blok zinciri ve uç bilişim gibi ek teknolojilerin dahil edilmesi, bu sistemlerin hem işlevselliğini hem de güvenliğini artıracaktır. Ayrıca, küresel çevresel izleme ağlarının potansiyel olarak oluşturulması, dünya ölçeğinde kapsamlı ve koordineli veri toplama vaadinde bulunmaktadır.

Toplumun daha fazla katılımını teşvik etmek ve vatandaş bilimi girişimlerini desteklemek, çevresel izlemeyi demokratikleştirecek [282], IoT ve YZ teknolojilerinin etkisini ve erişimini genişletecektir. Bu eğilimler ilerledikçe, IoT ve YZ'nin entegre kullanımı çevresel sürdürülebilirliği, dayanıklılığı ve veriye dayalı karar vermeyi teşvik etmenin merkezinde yer alacaktır. Ortaya çıkan bu yönelimleri benimsemek, çevre bilimcilerini, politika yapıcılarını ve toplulukları, zamanımızın acil çevresel zorluklarını ele alırken birlikte çalışmaları için güçlendirecek ve daha sürdürülebilir ve dirençli bir geleceğe yol açacaktır.

8.6. Araştırma Boşlukları ve Gelecek Yönelimleri

Çevresel izleme için AI-IoT entegrasyonundaki önemli gelişmelere rağmen, bu teknolojilerin ölçeklenebilirliğini, güvenilirliğini ve toplumsal etkisini sınırlayan bazı kritik boşluklar devam etmektedir. Bu zorlukların ele alınması, YZ güdümlü çevresel çözümlerin uzun vadeli etkinliğini sağlamak için çok önemli olacaktır.

En büyük boşluklardan biri uzun vadeli sistem sürdürülebilirliğidir. Çok sayıda çalışma başarılı kısa vadeli AI-IoT dağıtımlarını gösterirken, sensör kayması, model bozulması ve donanım esnekliği ile ilgili uzunlamasına veriler yetersiz kalmaktadır. Çoğu YZ modeli statik veri kümeleri üzerinde eğitilir, ancak gerçek dünyadaki çevresel izleme sistemleri, uzun süreler boyunca sensör yanlışlıklarını tespit etmek ve düzeltmek için uyarlanabilir mekanizmalar gerektirir [264]. Gelecekteki araştırmalar, gelişen çevre koşullarında doğruluğu korumak için otomatik yeniden kalibrasyon tekniklerini içeren kendi kendini iyileştiren YZ mimarilerini keşfetmelidir.

Bir diğer önemli zorluk ise gerçek zamanlı açıklanabilirliktir. SHAP (Shapley Additive Explanations) gibi yöntemler statik YZ tahminleri için şeffaflık sağlarken, IoT veri akışı için açıklanabilir YZ (XAI) teknikleri henüz gelişmemiştir [290]. Çevresel

izleme uygulamaları, YZ modellerinin neden gerçek zamanlı uyarılar verdiğini veya belirli kirlilik olaylarını sınıflandırdığını açıklayabilen dinamik yorumlanabilirlik çerçevelerine ihtiyaç duyar. Uç tabanlı XAI yaklaşımları, veri toplama noktasında yorumlanabilir içgörüler sağlayarak cihaz üzerinde karar verme sürecini iyileştirebilir.

Sosyo-teknik yönetim, özellikle veri gizliliği düzenlemelerini (ör. GDPR) kirlilik şeffaflığına yönelik kamu yararı ile dengeleme konusunda yeterince araştırılmamış bir başka alandır [224]. AI-IoT sistemleri büyük ölçekli çevresel veriler üretirken, çok az sayıda yönetim çerçevesi, mevzuata uygunluk, topluluk katılımı ve etik hususların AI dağıtım stratejilerine nasıl entegre edilmesi gerektiğini ele almaktadır. Gelecekteki çalışmalar, katılımcı tasarım yaklaşımlarına öncelik vermeli ve çevresel izleme teknolojilerinin etkilenen topluluklar, politika yapımcılar ve endüstri paydaşlarıyla işbirliği içinde geliştirilmesini sağlamalıdır.

Bu boşlukları gidermek için gelecekteki çabalar üç temel önceliğe odaklanmalıdır: (1) gizliliği koruyan YZ işbirlikleri için beslemeli öğrenme, ham çevresel verileri açığa çıkarmadan merkezi olmayan model eğitimi mümkün kılmak; (2) senaryo testi için Dijital İkizler, araştırmacıların büyük ölçekli dağıtımdan önce çeşitli çevresel koşullarda YZ-IoT sistem performansını simüle etmelerine olanak sağlamak; ve (3) marjinal toplulukların bakış açılarını içeren kapsayıcı YZ çerçeveleri, çevresel izleme sistemlerinin tüm popülasyonlara eşit şekilde fayda sağlamasını sağlamak. Bu zorlukları ele alarak, AI-IoT çözümleri daha esnek, şeffaf ve sosyal açıdan sorumlu hale gelebilir ve küresel ölçekte sürdürülebilir çevre yönetimini destekleyebilir.

9. Mevcut İncelemelerle Karşılaştırmalı Analiz

Son zamanlarda yapılan birkaç çalışma, su kalitesi ve iklim verilerine odaklanarak çevresel izleme için yapay zeka ve IoT'nin entegrasyonunu araştırmıştır. Bu incelemeler değerli içgörüler sunarken, mevcut çalışma metodolojik ilerlemeleri, disiplinler arası uygulamaları ve vaka çalışmalarının yapılandırılmış bir değerlendirmesini içeren daha geniş bir perspektif sunarak kendini ayırmaktadır. Aşağıdaki karşılaştırmalı analiz, temel farklılıkları ve yeni katkıları vurgulamaktadır.

Bu Çalışmanın Yeni Katkıları

Öncelikle kirlilik izleme için makine öğrenimini inceleyen Popescu'nun (2024) [60] aksine, bu çalışma birden fazla çevresel alanda AI-IoT uygulamalarının yapılandırılmış bir analizini sunmaktadır. Mevcut incelemelerde yalnızca kısmen ele alınan ön işleme zorlukları, veri uyumlaştırma ve çok kaynaklı sensör füzyonu konularını ele alarak gerçek zamanlı AI-IoT entegrasyonunu genişletmektedir.

Khan (2024) [134], GRU- Autoencoder kullanarak gerçek zamanlı YZ güdümlü trend tahminine odaklanmakta ve çevresel izleme için uyarlanabilir YZ tekniklerini göstermektedir. Bununla birlikte, bu çalışma uzun vadeli ekosistem izlemeyi değerlendirerek ve YZ modelinin ölçeklenebilirliğini tartışarak daha da ileri gitmektedir. Khan'ın kısa vadeli veri tahminleriyle sınırlı olan çalışmasının aksine, bu çalışma tarihsel iklim analizini ve ekosistem tabanlı YZ modellemesini bir araya getirerek çevre yönetimine kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır.

Arabelli (2024) [297] çevresel değişim tespitinde YZ-IoT verimliliğine ilişkin vaka çalışmaları sunmakta, ancak etik kaygıları, yönetim çerçevelerini veya mevzuata uygunluğu araştırmamaktadır. Buna karşılık, bu çalışma çevresel izleme için veri yönetimini, gizlilik kaygılarını ve açıklanabilir YZ'yi (XAI) inceleyerek YZ güdümlü karar vermenin düzenleyici standartlarla uyumlu olmasını sağlamaktadır.

Arowolo (2024) [298], uzun vadeli ekosistem analizi için AI-IoT uygulamalarını vurgulamaktadır, ancak tahmin modelleri ve veri ölçeklenebilirliğinin derinlemesine bir değerlendirmesi yoktur. Bu çalışma, YZ modellerinin karşılaştırmalı bir analizini sunarak, hibrit uygulamaları keşfederek bu boşluğu doldurmaktadır.

Derin öğrenmeyi geleneksel tahmine dayalı analitikle birleştiren yaklaşımlar, yapay zeka tabanlı çevresel izlemeyi daha sağlam ve uyarlanabilir hale getiriyor.

Panduman (2024) [155], IoT uygulamalarında YZ'ye odaklanan SEMAR platformunu tanıtmaktadır. Sistem düzeyinde bir yaklaşım sunarken, birlikte çalışabilirlik zorluklarını, çok kaynaklı veri uyumunu veya çevreye özgü YZ uygulamalarını tartışmamaktadır. Bu çalışma, heterojen kaynaklardan sorunsuz veri entegrasyonu sağlayarak çevresel zorluklara uyarlanmış YZ tekniklerine daha geniş bir bakış açısı sunmaktadır.

Manongga (2024) [299], gerçek zamanlı hava kalitesi izleme için yüksek doğruluk ve ölçeklenebilirlik gösteren AIKU modelini önermektedir. Bununla birlikte, su kalitesi, iklim izleme veya çoklu çevresel YZ uygulamalarına genişlemeden hava kirliliği ve kablosuz sensör ağlarına odaklanmaya devam etmektedir. Bu çalışma, hidrolojik ve meteorolojik bağlamlarda YZ uygulamalarını ele alarak hava izlemenin ötesine geçmekte ve daha kapsamlı bir çevresel bakış açısı sağlamaktadır.

Bu karşılaştırmalı analiz, özellikle su kalitesi ve iklim izleme için YZ-IoT entegrasyonu, vaka çalışması temelli değerlendirmeler, ön işleme teknikleri ve etik hususlar olmak üzere bu çalışmanın yeni katkılarını vurgulamaktadır. Belirli YZ uygulamalarına odaklanan mevcut incelemelerin aksine, bu çalışma YZ model karşılaştırmalarını, çok kaynaklı veri entegrasyonunu ve mevzuata uygunluğu tartışarak bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, çevresel izleme için açıklanabilir YZ'nin (XAI) yanı sıra sınırlı hesaplama altyapısına sahip bölgeler için düşük kaynaklı YZ dağıtımını daha fazla keşfedebilir.

10. Sonuçlar

Yapay zeka (AI) ajanlarının Nesnelerin İnterneti (IoT) ile entegrasyonu, çevre bilimlerinde dönüştürücü bir ilerlemeye işaret etmekte ve çevresel verilerin izlenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesi için olağanüstü olanaklar sunmaktadır. Bu makale, özellikle su kalitesi ve iklim verilerine odaklanarak, kritik çevresel zorlukların üstesinden gelmede YZ ve IoT'nin çok yönlü uygulamalarını vurgulamıştır. Bu teknolojiler sinerjik bir şekilde çevresel izlemenin hassasiyetini ve güvenilirliğini artırırken, bilinçli karar vermeyi kolaylaştırarak sürdürülebilir ve dirençli çevre yönetimi uygulamalarına zemin hazırlamaktadır.

Kapsamlı izleme ve veri toplama, çeşitli çevresel bağlamlara yerleştirilen IoT sensörleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu sensörler pH değerleri, bulanıklık seviyeleri, su sistemlerindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonları gibi granüler verilerin yanı sıra sıcaklık, nem, yağış ve rüzgar modelleri gibi iklim parametrelerini sürekli olarak toplar. Bu cihazlar tarafından sağlanan verilerin önemli hacmi ve çeşitliliği, yapay zeka odaklı analiz için sağlam bir temel oluşturarak çevre bilimcileri için yüksek kaliteli bilgilere gerçek zamanlı erişim sağlar.

Yapay zeka ajanları, IoT cihazları tarafından toplanan verileri işlemek ve yorumlamak için gelişmiş makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerini kullanır. Tahmine dayalı modelleme ve otomatik eşleştirilmiş algılama sistemleri sayesinde bu teknolojiler kirlilik olaylarını, iklim anormalliklerini ve diğer çevresel değişimleri öngörmektedir. Bu yetenek, paydaşların proaktif önlemler almasını sağlayarak olumsuz etkileri en aza indirir ve çevre yönetimi stratejilerinin genel etkinliğini artırır.

Operasyonel verimlilik ve maliyet optimizasyonu, yapay zeka ve IoT entegrasyonunun diğer faydalarıdır. Veri toplama ve analizinin otomatikleştirilmesi, manuel çabalara olan bağımlılığı azaltır, operasyonel maliyetleri en aza indirir ve kaynakların verimli bir şekilde tahsis edilmesini sağlar. Ayrıca, IoT altyapısının yapay zeka destekli öngörücü bakımı, maliyetli ekipman arızalarını önler ve izleme sistemlerinin ömrünü uzatır.

AI-IoT sistemlerinin ölçeklenebilirliği ve esnekliği, onları değişen çevresel koşullara ve ortaya çıkan zorluklara uyarlanabilir hale getirir. Bu sistemler sensörü genişletebilir

ağları ve gerektiğinde yeni parametreleri dahil ederek zaman içinde etkinliklerini ve geçerliliklerini korurlar. Bu uyarlanabilirlik proaktif çevre yönetimine olanak tanıyarak odağı reaktif tepkilerden stratejik, ileri görüşlü çözümlere kaydırır. Gerçek zamanlı veri işleme, erken uyarı sistemlerini, dinamik kaynak yönetimini ve bilinçli planlamayı destekleyerek sürdürülebilirliği ve dayanıklılığı teşvik eder.

Önemli avantajlarına rağmen, yapay zeka ve IoT'nin çevre bilimlerinde entegrasyonu, veri kalitesinin sağlanması, sorunsuz entegrasyonun sağlanması, güvenlik ve gizliliğin korunması, teknik sınırlamaların ele alınması ve etik ve düzenleyici kaygıların yönetilmesi gibi zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için sağlam çerçevelerin, standartlaştırılmış protokollerin ve işbirliğine dayalı girişimlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

İleriye dönük olarak, yapay zeka ve IoT teknolojilerindeki gelişmeler, blok zinciri ve uç bilişim gibi yeniliklerle birleştiğinde, çevresel izleme ve yönetimi geliştirmek için muazzam bir potansiyele sahiptir. Küresel çevresel izleme ağlarının kurulması ve vatandaş bilimi girişimleri yoluyla toplulukların katılımının sağlanması, veri toplamayı demokratikleştirecek ve çevre yönetimine yönelik kapsayıcı yaklaşımları teşvik edecektir. Bu teknolojiler geliştikçe, sinerjik uygulamaları, sürdürülebilirliği, dayanıklılığı ve bilinçli karar vermeyi destekleyen yenilikleri teşvik ederek, acil çevre sorunlarının ele alınmasında önemli bir rol oynayacaktır.

Yapay zeka ve IoT'nin yakınsaması çevre bilimlerinde önemli bir dönüm noktasıdır. Çevreciler ve veri bilimciler bu teknolojilerden yararlanarak hayati kaynakları izlemek ve korumak için stratejiler geliştirebilirler. Karmaşık çevresel zorlukların üstesinden gelirken, entegre AI-IoT çerçevesi, sürdürülebilir ve esnek yönetim uygulamalarını ilerletmek için bir köşe taşı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yenilikleri benimsemek, bizi gelecekteki zorlukları öngörme ve azaltma araçlarıyla donatarak gelecek nesiller için daha sağlıklı, daha sürdürülebilir bir dünya sağlar.

Yazar Katkıları: Kavramsallaştırma, T.M. ve I.D.; metodoloji, T.M. ve I.D.; araştırma, T.M., I.D., E.K., P.K., A.L., S.S. ve A.N.; kaynaklar, T.M., I.D., E.K., P.K., A.L., S.S. ve A.N.; yazım-orijinal taslak hazırlama, T.M., I.D. ve E.K.; yazım-inceleme ve düzenleme, T.M., I.D., E.K., P.K., A.L., S.S. ve A.N.; görselleştirme, T.M. Tüm yazarlar makalenin yayınlanan versiyonunu okumuş ve kabul etmiştir.

Finansman: Bu araştırma herhangi bir dış finansman almamıştır.

Kurumsal İnceleme Kurulu Beyanı: Geçerli değil. **Bilgilendirilmiş**

Onam Beyanı: Geçerli değil.

Veri Kullanılabilirlik Beyanı: Yeni veri oluşturulmamıştır.

Çıkar Çatışmaları: Yazar Sylwia Sokolowska, Polonya Biyoinformatik ve Veri Bilimi Derneği BioData tarafından istihdam edilmiştir. Diğer yazarlar, araştırmanın potansiyel bir çıkar çatışması olarak yorumlanabilecek herhangi bir ticari veya finansal ilişkinin yokluğunda yürütüldüğünü beyan eder.

Referanslar

1. Brauch, H.G. Giriş: Küreselleşme ve Çevresel Zorluklar: Güvenliği 21. Yüzyılda Yeniden Kavramsallaştırmak. In *Global- ization and Environmental Challenges*; Brauch, H.G., Spring, Ü.O., Mesjasz, C., Grin, J., Dunay, P., Behera, N.C., Chourou, B., Kameri- Mbote, P., Liotta, P.H., Eds.; Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008; Volume 3, pp. 27-43, ISBN 978-3-540-75976-8.
2. Crompton, T.; Kasser, T. *Çevresel Zorlukların Üstesinden Gelmek: İnsan Kimliğinin Rolü*; WWF-UK: Surrey, UK, 2009; ISBN 978-1-900322-64-5.
3. Conca, K.; Dabelko, G.D. (Eds.) *Green Planet Blues: Critical Perspectives on Global Environmental Politics*, 6. baskı; Taylor & Francis Group: New York, NY, ABD; Londra, Birleşik Krallık, 2020; ISBN 978-0-429-32220-4.

4. Arthington, A.H.; Bunn, S.E.; Poff, N.L.; Naiman, R.J. Nehir Ekosistemlerini Sürdürmek için Çevresel Akış Kuralları Sağlama Zorluğu. *Ecol. Appl.* **2006**, *16*, 1311-1318. [\[CrossRef\]](#)
5. Palomino, J.; Muellerklein, O.C.; Kelly, M. Çevresel Zorlukları Ele Almak için İşbirliğine Dayalı Jeo-uzamsal Araçların Ortaya Çıkan Ekosisteminin İncelenmesi. *Hesaplamalı. Çevre. Urban Syst.* **2017**, *65*, 79-92. [\[CrossRef\]](#)
6. Hu, Y.; Cheng, H.; Tao, S. Çin'de Endüstriyel Hayvancılık ve Kümes Hayvancılığının Çevresel ve İnsan Sağlığı Sorunları ve Bunların Azaltılması. *Environ. Int.* **2017**, *107*, 111-130. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Mwangi, W.; De Figueiredo, P.; Criscitiello, M.F. Tek Sağlık: İnsan, Hayvan ve Çevre Sağlığı Ekseninde Küresel Zorlukların Ele Alınması. *PLoS Pathog.* **2016**, *12*, e1005731. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Mellor, J.W. Çevre Sorunlarının İç İç Geçmesi Yoksulluk. *Çevre. Bilim Politikası Sürdürülebilirlik. Dev.* **1988**, *30*, 6-30. [\[CrossRef\]](#)
9. Mabogunje, A.L. Yoksulluk ve Çevresel Bozulma: Küresel Ekonomideki Zorluklar. *Çevre. Bilim Politikası Sürdürülebilirlik. Dev.* **2002**, *44*, 8-19. [\[CrossRef\]](#)
10. Masron, T.A.; Subramaniam, Y. Yoksulluk Çevresel Bozulmaya Neden Olur mu? Gelişmekte Olan Ülkelerden Kanıtlar. *J. Poverty* **2019**, *23*, 44-64. [\[CrossRef\]](#)
11. Patz, J.A.; Frumkin, H.; Holloway, T.; Vimont, D.J.; Haines, A. İklim Değişikliği: Küresel Sağlık için Zorluklar ve Fırsatlar. *JAMA* **2014**, *312*, 1565. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
12. Solecki, W. New York'ta Kentsel Çevre Sorunları ve İklim Değişikliği Eylemi. *Environ. Urban.* **2012**, *24*, 557-573. [\[CrossRef\]](#)
13. Roberts, D.; O'Donoghue, S. Güney Afrika, Durban'da Kentsel Çevre Sorunları ve İklim Değişikliği Eylemi. *Environ. Urban.* **2013**, *25*, 299-319. [\[CrossRef\]](#)
14. Zhou, Y.; Khu, S.-T.; Xi, B.; Su, J.; Hao, F.; Wu, J.; Huo, S. Çin'deki Su Kirliliği Sorunlarının Durumu ve Zorlukları: Avrupa Deneyiminden Öğrenmek. *Environ. Earth Sci.* **2014**, *72*, 1243-1254. [\[CrossRef\]](#)
15. Han, D.; Currell, M.J.; Cao, G. Çin'in Su Kirliliğine Karşı Savaşında Derin Zorluklar. *Çevre. Pollut.* **2016**, *218*, 1222-1233. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
16. Tang, W.; Pei, Y.; Zheng, H.; Zhao, Y.; Shu, L.; Zhang, H. Çin'in Su Kirliliği Kontrolünün Yirmi Yılı: Deneyimler ve Zorluklar. *Chemosphere* **2022**, *295*, 133875. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Carr, D.L.; Suter, L.; Barbieri, A. Nüfus Dinamikleri ve Tropikal Ormansızlaşma: Tartışmanın Durumu ve Kavramsal Zorluklar. *Popul. Environ.* **2005**, *27*, 89-113. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Haigh, M.J.; Jansky, L.; Hellin, J. Headwater Deforestation: Çevre Yönetimi için Bir Zorluk. *Glob. Environ. Chang.* **2004**, *14*, 51-61. [\[CrossRef\]](#)
19. Kumar, R.; Kumar, A.; Saikia, P. Ormansızlaşma ve Ormanların Bozulmasının Çevre Üzerindeki Etkileri. *Çevresel Bozulma içinde: Challenges and Strategies for Mitigation*; Singh, V.P., Yadav, S., Yadav, K.K., Yadava, R.N., Eds.; Water Science and Technology Library; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022; Volume 104, pp. 19-46, ISBN 978-3-030-95541-0.
20. Rands, M.R.W.; Adams, W.M.; Bennun, L.; Butchart, S.H.M.; Clements, A.; Coomes, D.; Entwistle, A.; Hodge, I.; Kapos, V.; Scharlemann, J.P.W.; vd. Biyoçeşitliliğin Korunması: 2010'un Ötesindeki Zorluklar. *Bilim* **2010**, *329*, 1298-1303. [\[CrossRef\]](#)
21. Arora, N.K.; Fatima, T.; Mishra, I.; Verma, M.; Mishra, J.; Mishra, V. Çevresel Sürdürülebilirlik: Zorluklar ve Uygulanabilir Çözümler. *Çevre. Sürdürülebilirlik* **2018**, *1*, 309-340. [\[CrossRef\]](#)
22. Kim, J.W. Doğu Asya'da Sanayileşmenin Çevresel Etkileri ve Sürdürülebilir Kalkınmaya Yönelik Stratejiler. *Sürdürülebilirlik. Sci.* **2006**, *1*, 107-114. [\[CrossRef\]](#)
23. Perreault, T.A.; Bridge, G.; McCarthy, J. (Eds.) *The Routledge Handbook of Political Ecology*; Routledge International Handbooks; Routledge: Londra, Birleşik Krallık; Taylor & Francis Group: New York, NY, ABD, 2015; ISBN 978-1-138-79433-7.
24. Patnaik, R. Sanayileşmenin Çevre Üzerindeki Etkisi ve Sürdürülebilir Çözümler-Güney Hindistan Bölgesinden Yansımalar. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2018**, *120*, 012016. [\[CrossRef\]](#)
25. Keiner, M.; Koll-Schretzenmayr, M.; Schmid, W.A. *Managing Urban Futures: Gelişmekte Olan Ülkelerde Sürdürülebilirlik ve Kentsel Büyüme*; Routledge: Londra, Birleşik Krallık, 2016; ISBN 978-1-315-24982-7.
26. Dodman, D. Çevre ve Kentleşme. *International Encyclopedia of Geography* içinde; Richardson, D., Castree, N., Goodchild, M.F., Kobayashi, A., Liu, W., Marston, R.A., Eds.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2017; pp. 1-9, ISBN 978-0-470-65963-2.
27. Akash, M.; Akter, J.; Tamanna, T.; Kabir, M.R. Dakka Şehrinde Kentleşme ve Çevresel Zorluklar. *SSRN Electron. J.* **2018**, 145-157. [\[CrossRef\]](#)
28. Iyiola, A.O.; Akinsorotan, O.A.; Ojeleye, A.E.; Fajimolu, A.O. Afrika'daki Çevre Kaynaklarına Genel Bir Bakış: Ortaya Çıkan Sorunlar ve Sürdürülebilir Faydalanma. *Afrika'nın Biyolojik Kaynakları ve Çevresinin Sürdürülebilir Kullanımı ve Korunması*; Izah, S.C., Ogwu, M.C., Eds.; Sustainable Development and Biodiversity; Springer: Singapur, 2023; Cilt 32, s. 543-570, ISBN 978-981-19-6973-7.
29. Numbere, A.O.; Maduik, E.M. Nijer Deltası, Nijerya'daki Orman ve Su Kaynaklarının Sürdürülebilir Olmayan Kullanımının Etkisi. *Afrika'da Biyoçeşitlilik içinde: Potentials, Threats and Conservation*; Chibueze Izah, S., Ed.; Sustainable Development and Biodiversity; Springer: Singapur, 2022; Cilt 29, s. 239-265, ISBN 978-981-19-3325-7.

30. Nukusheva, A.; Ilyassova, G.; Rustembekova, D.; Zhamiyeva, R.; Arenova, L. Uluslararası Toplumun Karşılaştığı Küresel Isınma Sorunu: Uluslararası Hukuk Boyutu. *Int. Çevre. Anlaşmalar Politika Hukuk Ekonomi*. **2021**, *21*, 219-233. [\[CrossRef\]](#)
31. Xiong, J.; Yang, Y. İklim Değişikliği ve Hidrolojik Aşırılıklar. *Curr. Clim. Chang. Rep.* **2024**, *11*, 1. [\[CrossRef\]](#)
32. Sulistiawati, L.Y. Endonezya'da İklim Değişikliği ile İlgili Davalar. *İletişim. Earth Environ.* **2024**, *5*, 522. [\[CrossRef\]](#)
33. Malik, I.H.; Ford, J.D. Himalayalar'da İklim Değişikliği Hassasiyetinin İzlenmesi. *Ambio* **2025**, *54*, 1-19. [\[CrossRef\]](#)
34. Du Plessis, A. Birincil Su Kalitesi Zorlukları, Kirleticiler ve Dünyanın En Kirli Yerleri. *Water as an Inescapable Risk* içinde; Springer Water; Springer International Publishing: Cham, İsviçre, 2019; s. 79-114, ISBN 978-3-030-03185-5.
35. Singh, N.; Poonia, T.; Siwal, S.S.; Srivastav, A.L.; Sharma, H.K.; Mittal, S.K. Kentsel Alanlarda Su Kirliliğinin Zorlukları. *Current Directions in Water Scarcity Research* içinde; Elsevier: Amsterdam, Hollanda, 2022; Cilt 6, s. 173-202, ISBN 978-0-323-91838-1.
36. McDonald, T.L. Çevresel İzleme Yöntemlerinin Gözden Geçirilmesi: Anket Tasarımları. *Çevre. Monit. Assess.* **2003**, *85*, 277-292. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Lovett, G.M.; Burns, D.A.; Driscoll, C.T.; Jenkins, J.C.; Mitchell, M.J.; Rustad, L.; Shanley, J.B.; Likens, G.E.; Haeuber, R. Who Needs Environmental Monitoring? *Ön. Ekoloji. Environ.* **2007**, *5*, 253-260. [\[CrossRef\]](#)
38. Kumar, A.; Kim, H.; Hancke, G.P. Çevresel İzleme Sistemleri: Bir İnceleme. *IEEE Sens. J.* **2013**, *13*, 1329-1339. [\[CrossRef\]](#)
39. Namies'nik, J. Çevresel Analiz ve İzlemedeki Eğilimler. *Kritik. Rev. Anal. Chem.* **2000**, *30*, 221-269. [\[CrossRef\]](#)
40. Bourgeois, W.; Romain, A.-C.; Nicolas, J.; Stuetz, R.M. Çevresel İzleme için Sensör Dizilerinin Kullanımı: İlgi Alanları ve Sınırlamalar. *J. Environ. Monit.* **2003**, *5*, 852. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
41. Brammer, J.R.; Brunet, N.D.; Burton, A.C.; Cuerrier, A.; Danielsen, F.; Dewan, K.; Herrmann, T.M.; Jackson, M.V.; Kennett, R.; Larocque, G.; vd. Katılımcı Çevresel İzlemede Dijital Veri Girişinin Rolü. *Conserv. Biol.* **2016**, *30*, 1277-1287. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
42. Trevathan, J.; Johnstone, R. Akıllı Çevresel İzleme ve Değerlendirme Teknolojileri (SEMAT)- Düşük Maliyetli, Uzaktan Sucul Çevresel İzleme için Yeni Bir Paradigma. *Sensörler* **2018**, *18*, 2248. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
43. Abraham, S.; Beard, J.; Manijacob, R. Nesnelerin İnterneti (IoT) Kullanılarak Uzaktan Çevresel İzleme. Proceedings of the 2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), San Jose, CA, USA, 19-22 October 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017; pp. 1-6.
44. Ullo, S.L.; Sinha, G.R. IoT ve Sensörler Kullanarak Akıllı Çevre İzleme Sistemlerindeki Gelişmeler. *Sensörler* **2020**, *20*, 3113. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
45. Chamara, N.; Islam, M.D.; Bai, G.; Shi, Y.; Ge, Y. Mahsul ve Çevre İzleme için Ag-IoT: Geçmiş, Bugün ve Gelecek. *Tarım Sist. Syst.* **2022**, *203*, 103497. [\[CrossRef\]](#)
46. Fang, S.; Xu, L.D.; Zhu, Y.; Ahati, J.; Pei, H.; Yan, J.; Liu, Z. Nesnelerin İnternetine Dayalı Bölgesel Çevre İzleme ve Yönetimi için Entegre Bir Sistem. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2014**, *10*, 1596-1605. [\[CrossRef\]](#)
47. Kishorebabu, V.; Sravanthi, R. IOT Kullanarak Çevresel Parametrelerin Gerçek Zamanlı İzlenmesi. *Wirel. Pers. İletişim.* **2020**, *112*, 785-808. [\[CrossRef\]](#)
48. Narayana, T.L.; Venkatesh, C.; Kiran, A.; J, C.B.; Kumar, A.; Khan, S.B.; Almusharraf, A.; Quasim, M.T. Gerçek Zamanlı Gelişmeler IoT ve Sensörler Kullanarak Çevresel Parametrelerin Akıllı İzlenmesi. *Heliyon* **2024**, *10*, e28195. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
49. Essamlali, I.; Nhaila, H.; El Khaili, M. Su Kalitesi İzleme için Makine Öğrenimi ve IoT'deki Gelişmeler: Kapsamlı Bir İncelemesi. *Heliyon* **2024**, *10*, e27920. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
50. Forhad, H.M.; Uddin, M.R.; Chakrovorty, R.S.; Ruhul, A.M.; Faruk, H.M.; Kamruzzaman, S.; Sharmin, N.; Jamal, A.S.I.M.; Haque, M.M.-U.; Morshed, A.M. Su Arıtma Tesislerinde (WTPs) IoT Tabanlı Gerçek Zamanlı Su Kalitesi İzleme Sistemi. *Heliyon* **2024**, *10*, e40746. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
51. Hino, M.; Benami, E.; Brooks, N. Çevresel İzleme için Makine Öğrenimi. *Nat. Sürdürülebilirlik.* **2018**, *1*, 583-588. [\[CrossRef\]](#)
52. Jesus, G.; Casimiro, A.; Oliveira, A. Çevresel İzleme Sistemlerinde Güvenilir Aykırı Değer Tespiti için Makine Öğrenimini Kullanma. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.* **2021**, *5*, 1-30. [\[CrossRef\]](#)
53. Kubec'ka, J.; Knattrup, Y.; Engsvang, M.; Jensen, A.B.; Ayoubi, D.; Wu, H.; Christiansen, O.; Elm, J. Atmosferik Küme Oluşumunu Modellemek için Mevcut ve Gelecekteki Makine Öğrenme Yaklaşımları. *Nat. Comput. Sci.* **2023**, *3*, 495-503. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
54. Esenogho, E.; Djouani, K.; Kurien, A.M. Yeni Nesil Smartgrid için Yapay Zeka Nesnelerin İnterneti ve 5G'nin Entegrasyonu: Trendler Zorluklar ve Beklentiler Üzerine Bir Araştırma. *IEEE Erişim* **2022**, *10*, 4794-4831. [\[CrossRef\]](#)
55. Cortés, U.; Sánchez-Marré, M.; Ceccaroni, L.; R-Roda, I.; Poch, M. Yapay Zeka ve Çevresel Karar Destek Sistemleri. *Appl. Intell.* **2000**, *13*, 77-91. [\[CrossRef\]](#)
56. Haupt, S.E.; Pasini, A.; Marzban, C. (Eds.) *Artificial Intelligence Methods in the Environmental Sciences*; Springer: Dordrecht, Hollanda, 2009; ISBN 978-1-4020-9117-9.
57. Shuford, J. Disiplinlerarası Perspektifler: Sürdürülebilir Çözümler için Yapay Zekayı Çevre Bilimi ile Birleştirmek. *J. Artif. Intell. Gen. Sci. (JAIGS)* **2024**, *1*, 106-123. [\[CrossRef\]](#)

58. Himeur, Y.; Rimal, B.; Tiwary, A.; Amira, A. Çevresel İzleme için Yapay Zeka ve Veri Füzyonu Kullanımı: Bir İnceleme ve Gelecek Perspektifleri. *Enf. Fusion* **2022**, *86-87*, 44-75. [CrossRef]
59. Szramowiat-Sala, K. Çevresel İzlemede Yapay Zeka: Kirliliğin Önlenmesi ve Toksikite Ölçümleri için Yapay Sinir Ağları ve Makine Öğrenimi Uygulaması. 2023. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://www.preprints.org/manuscript/202307.1298> (23 Aralık 2024 tarihinde erişilmiştir).
60. Popescu, S.M.; Mansoor, S.; Wani, O.A.; Kumar, S.S.; Sharma, V.; Sharma, A.; Arya, V.M.; Kirkham, M.B.; Hou, D.; Bolan, N.; vd. Çevre Kirliliğinin İzlenmesi ve Yönetimi için Yapay Zeka ve IoT Odaklı Teknolojiler. *Ön. Environ. Sci.* **2024**, *12*, 1336088. [CrossRef]
61. Yetilmmezsoy, K.; Özkaya, B.; Çakmakçı, M. Çevre Mühendisliği için Yapay Zeka Tabanlı Tahmin Modelleri. *Neural Netw. Dünya* **2011**, *21*, 193-218. [CrossRef]
62. Bagheri, M.; Bazvand, A.; Ehteshami, M. Çöp Sızıntı Suyunun Yeraltı Suyuna Nüfuzunun Yönetimi ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi için Yapay Zeka Uygulaması. *J. Clean. Prod.* **2017**, *149*, 784-796. [CrossRef]
63. Maganathan, T.; Senthilkumar, S.; Balakrishnan, V. Çevre Bilimi için Makine Öğrenimi ve Veri Analitiği: Bir İnceleme, Beklentiler ve Zorluklar. *IOP Konf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, *955*, 012107. [CrossRef]
64. Kosovic, I.N.; Mastelic, T.; Ivankovic, D. Güneş Radyasyonunu Tahmin Etmek İçin Nesnelerin İnternetinden Elde Edilen Çevresel Veriler Üzerinde Yapay Zeka Kullanımı: Kapsamlı Analiz. *J. Clean. Prod.* **2020**, *266*, 121489. [CrossRef]
65. Suguna, S.K.; Dhivya, M.; Paiva, S. (Eds.) *Artificial Intelligence (AI): Son Trendler ve Uygulamalar*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA; Taylor & Francis Group: Londra, İngiltere; New York, NY, ABD, 2021; ISBN 978-1-003-00562-9.
66. Wankhede, V.A.; Agrawal, R.; Kumar, A.; Luthra, S.; Pamucar, D.; Stevic, Ž. Belirsiz Ortamda Sürdürülebilir Mühendislik Karar Verme için Yapay Zeka: Bir İnceleme ve Geleceğe Yönelik Öneriler. *J. Glob. Oper. Strateg. Sourc.* **2024**, *17*, 384-401. [CrossRef]
67. Wooldridge, M.; Jennings, N.R. Akıllı Ajanlar: Teori ve Uygulama. *Knowl. Eng. Rev.* **1995**, *10*, 115-152. [CrossRef]
68. Kabanza, F.; Barbeau, M.; St-Denis, R. Reaktif Ajanlar için Kontrol Kuralları Planlama. *Artif. Intell.* **1997**, *95*, 67-113. [CrossRef]
69. Rebera, A.P. Reaktif Tutumlar ve Yapay Zeka Ajanları-Sorumluluk ve Kontrol Boşluklarını Anlamlandırmak. *Philos. Technol.* **2024**, *37*, 126. [CrossRef]
70. Hayes-Roth, B. Gerçek Zamanlı Yapay Zeka Tekniklerinin Uyarlanabilir Akıllı Ajanlara Entegre Edilmesi. *Artificial Intelligence in Real-Time Control* içinde 1994; Elsevier: Oxford, İngiltere, 1995; s. 1-11, ISBN 978-0-08-042236-7.
71. Mounce, S.R.; Boxall, J.B.; Machell, J. Patlamalarının ve Diğer Anormal Akışların Tespitine Yönelik Çevrimiçi Bir Yapay Zeka Sisteminin Geliştirilmesi ve Doğrulanması. *J. Water Resour. Plan. Manag.* **2010**, *136*, 309-318. [CrossRef]
72. Ontañón, S.; Plaza, E. Çoklu Etmen Sistemlerinde Tartışma Yoluyla Öğrenme ve Ortak Müzakere. Proceedings of the 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Honolulu, HI, USA, 14-18 May 2007; ACM: New York, NY, USA, 2007; pp. 1-8.
73. Corchado, J.M.; Laza, R. Vaka Tabanlı Akıl Yürütme Teknolojisi ile Müzakereci Ajanlar Oluşturma. *Int. J. Intell. Syst.* **2003**, *18*, 1227-1241. [CrossRef]
74. Boddy, M.; Dean, T.L. Zaman Kısıtlı Ortamlarda Problem Çözümü için Müzakere Çizelgeleme. *Artif. Intell.* **1994**, *67*, 245-285. [CrossRef]
75. Singh, M.; Arora, V.; Kulshreshta, K. Yapay Zeka ve Çevre: İklim Değişikliğine Yenilikçi Yaklaşımlar. In *Practice, Progress, and Proficiency in Sustainability*; Singh, B., Kaunert, C., Vig, K., Dutta, S., Eds.; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2024; pp. 1-22, ISBN 979-8-3693-6336-2.
76. Zhao, T.; Wang, S.; Ouyang, C.; Chen, M.; Liu, C.; Zhang, J.; Yu, L.; Wang, F.; Xie, Y.; Li, J.; vd. Jeobilim için Yapay Zeka: İlerleme, Zorluklar ve Perspektifler. *İnovasyon* **2024**, *5*, 100691. [CrossRef]
77. Guessoum, Z. Bir Hibrit Ajan Modeli: Reaktif ve Bilişsel Davranış. Üçüncü Uluslararası Otonom Merkezi Olmayan Sistemler Sempozyumu Bildirileri (ISADS 97), Berlin, Almanya, 9-11 Nisan 1997; IEEE Computer Society Press: Los Alamitos, CA, ABD, 1997; s. 25-32.
78. Palanca, J.; Rincon, J.A.; Carrascosa, C.; Julian, V.J.; Terrasa, A. Esnek Ajan Mimarisi: SPADE'de Reaktif ve Müzakereci Davranışlarının Karıştırılması. *Elektronik* **2023**, *12*, 659. [CrossRef]
79. De Paola, A.; Ferraro, P.; Lo Re, G.; Morana, M.; Ortolani, M. Akıllı Binalarda Enerji Tasarrufu için Sis Tabanlı Hibrit Akıllı Sistem. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Hesaplama*. **2020**, *11*, 2793-2807. [CrossRef]
80. Janssen, M.; De Vries, B. Perspektifler Savaşı: İklim Değişikliğine Uyarlanabilir Tepkiler Veren Çok Ajanlı Bir Model. *Ecol. Econ.* **1998**, *26*, 43-65. [CrossRef]
81. Figueiredo, J.; Botto, M.A.; Rijo, M. Sulama Kanallarına Uygulanan Öngörülü Denetleyicili SCADA Sistemi. *Kontrol Müh. Pratik.* **2013**, *21*, 870-886. [CrossRef]
82. Ayala-Cabrera, D.; Herrera, M.; Izquierdo, J.; Pérez-García, R. Multi-Agent ve Kümeleme Yaklaşımları Kullanılarak GPR Veri Analizi: Su Temini Sistemlerinin Teknik Yönetimi için Bir Araç. *Sayısal. Signal Process.* **2014**, *27*, 140-149. [CrossRef]

83. Asha, P.; Natrayan, L.; Geetha, B.T.; Beulah, J.R.; Sumathy, R.; Varalakshmi, G.; Neelakandan, S. Yapay Zeka Teknikleri Kullanılarak Hava Kirliliğinin İzlenmesi için IoT Destekli Çevresel Toksikoloji. *Environ. Res.* **2022**, *205*, 112574. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
84. Nti, E.K.; Cobbina, S.J.; Attafuah, E.E.; Senanu, L.D.; Amenyeku, G.; Gyan, M.A.; Forson, D.; Safo, A.-R. İleri Teknolojiler Kullanılarak Su Kirliliğinin Kontrolü ve Yeniden Canlandırılması: Çevre Sağlığına Yönelik Yapay Zeka Seçeneklerinin Ortaya Çıkarılması Koruma, Sürdürülebilirlik ve Su Güvenliği. *Heliyon* **2023**, *9*, e18170. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
85. Castelfranchi, C.; Dignum, F.; Jonker, C.M.; Treur, J. Deliberative Normative Agents: İlkeler ve Mimari. *Akıllı Ajanlar VI* içinde. *Agent Theories, Architectures, and Languages*; Jennings, N.R., Lespérance, Y., Eds.; Lecture Notes in Computer Science; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2000; Volume 1757, pp. 364-378. [\[CrossRef\]](#)
86. Hare, M.; Deadman, P. Further Towards a Taxonomy of Agent-Based Simulation Models in Environmental Management. *Matematik. Comput. Simul.* **2004**, *64*, 25-40. [\[CrossRef\]](#)
87. Sánchez-Fibla, M.; Moulin-Frier, C.; Solé, R. Yapay Akıllı Ajanlar ile Çevresel Aşırılıkların İşbirlikçi Kontrolü. *J. R. Soc. Arayüz* **2024**, *21*, 20240344. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
88. Bezborodova, O.E.; Bodin, O.N.; Paschenko, D.V. Çoklu Ajan Sistemlerinde Akıllı Ajan Hiyerarşilerini Kullanarak Veri Toplama ve İşleme Verimliliğini Artırma. *IOP Konf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2021**, *1061*, 012009. [\[CrossRef\]](#)
89. Grzonka, D.; Jakóbik, A.; Kołodziej, J.; Pillana, S. Bulut Performansını ve Güvenliğini İzlemek ve İyileştirmek için Çoklu Ajan Sistemi ve Yapay Zeka Kullanımı. *Future Gener. Hesaplama. Syst.* **2018**, *86*, 1106-1117. [\[CrossRef\]](#)
90. Zhang, X.; Shu, K.; Rajkumar, S.; Sivakumar, V. Çevresel İzleme Sistemi ve Gerçek Ekonomide Yapay Zeka Uygulamalarının Derin Entegrasyonu Üzerine Araştırma. *Çevre. Etki Değerlendirmesi. Rev.* **2021**, *86*, 106499. [\[CrossRef\]](#)
91. Luzolo, P.H.; Elrawashdeh, Z.; Tchappi, I.; Galland, S.; Outay, F. Multi-Agent Systems ve Artificial Intelligence'in Things ile birleştirilmesi: Teknik Zorluklar ve Kazanımlar. *Internet Things* **2024**, *28*, 101364. [\[CrossRef\]](#)
92. Vald, G.; Sermet, M.; Mount, J.; Shrestha, S.; Samuel, D.J.; Cwiertny, D.; Demir, I. Enhanced Water Quality Analytics için Diyaloğa Dayalı Yapay Zeka Ajanlarının Entegrasyonu: Yeni Bir Veri Uzman Sisteminin Geliştirilmesi. 2024, *baskıda*.
93. Hart, J.K.; Martinez, K. Çevresel Sensör Ağları: Yer Sistemi Biliminde Bir Devrim mi? *Earth-Sci. Rev.* **2006**, *78*, 177-191. [\[CrossRef\]](#)
94. El Khediri, S.; Benfradj, A.; Thaljaoui, A.; Moulahi, T.; Ullah Khan, R.; Alabdulatif, A.; Lorenz, P. Yapay Zekanın (YZ) Sensör Ağları ile Entegrasyonu: Eğilimler, Zorluklar ve Gelecek Yönelimler. *J. King Saud Univ.-Comput. Inf. Sci.* **2024**, *36*, 101892. [\[CrossRef\]](#)
95. Janga, B.; Asamani, G.; Sun, Z.; Cristea, N. Yer Bilimlerinde Uzaktan Algılama için Pratik Yapay Zeka Üzerine Bir İnceleme. *Uzaktan Algılama*. **2023**, *15*, 4112. [\[CrossRef\]](#)
96. Solomou, S.; Sengupta, U. Karmaşık Kentsel Davranışların Yapay Zeka ile Simülasyonu: Geliştirilmiş Akıllı Ajanların Kentsel Simülasyon Modellerine Dahil Edilmesi. *Şehir Planı.* **2024**, *10*, 8561. [\[CrossRef\]](#)
97. Bouziane, S.E.; Khadir, M.T.; Dugdale, J. Enerji Tüketimine Bağlı Karbon Emisyonlarını Tahmin Etmek için İşbirlikçi Tahmine Dayalı Çoklu Ajan Sistemi. *Multiagent Grid Syst.* **2021**, *17*, 39-58. [\[CrossRef\]](#)
98. Jones, J.; Harris, E.; Febriansah, Y.; Adiwijaya, A.; Nuril Hikam, I. Sürdürülebilir Kalkınma için Yapay Zeka: Doğal Kaynak Yönetimi, Tarım ve Atık Yönetimi Uygulamaları. *Int. Trans. Artif. Intell. (ITALIK)* **2024**, *2*, 143-149. [\[CrossRef\]](#)
99. Kumar, S.; Verma, A.K.; Mirza, A. Yapay Zeka ve İklim Değişikliğinin Azaltılması. *Dijital Dönüşüm, Yapay Zeka ve Toplum; Yapay Zeka, Etik ve Multidisipliner Uygulamaların Sınırları* içinde; Springer: Singapur, 2024; pp. 147-160, ISBN 978-981-97-5655-1.
100. Amiri, Z.; Heidari, A.; Navimipour, N.J. İklim Değişikliğinin Azaltılması için Yapay Zeka Teknikleri ve Stratejilerinin Kapsamlı Araştırması. *Enerji* **2024**, *308*, 132827. [\[CrossRef\]](#)
101. Alawi, O.A.; Kamar, H.M.; Alsuwaiyan, A.; Yaseen, Z.M. Delhi'deki Hava Kirliticilerinin Zamansal Eğilimleri ve Tahmine Dayalı Modellemesi: Yapay Zeka Modellerinin Karşılaştırmalı Çalışması. *Sci. Rep.* **2024**, *14*, 30957. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
102. Reza, S.A.; Chowdhury, M.S.R.; Hossain, S.; Hasanuzzaman, M.; Shawon, R.E.R.; Chowdhury, B.R.; Rana, M.S. Küresel Plastik Atık Yönetimi: Eğilimlerin Analizi, Ekonomik ve Sosyal Etkiler ve Yapay Zeka Kullanarak Tahmine Dayalı Modelleme. *J. Environ. Agric. Çalışması.* **2024**, *5*, 42-58. [\[CrossRef\]](#)
103. Lee, C.C.; Barnes, B.B.; Sheridan, S.C.; Smith, E.T.; Hu, C.; Pirhalla, D.E.; Ransibrahmanakul, V.; Adams, R. Using Machine Learning to Model and Predict Water Clarity in the Great Lakes. *J. Great Lakes Res.* **2020**, *46*, 1501-1510. [\[CrossRef\]](#)
104. Raihan, A. Orman Yönetimi ve Biyoçeşitliliğin Korunmasında Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi Uygulamaları. *Nat. Kaynak. Conserv. Res.* **2023**, *6*, 3825. [\[CrossRef\]](#)
105. Ullah, F.; Saqib, S.; Xiong, Y.-C. Biyoçeşitliliğin Korunmasında Yapay Zekanın Entegrasyonu: Klasik ve Modern Yaklaşımları Arasında Köprü Kurmak. *Biodivers. Conserv.* **2024**. [\[CrossRef\]](#)
106. Ayoola, V.B.; Idoko, I.P.; Eromonsei, S.O.; Afolabi, O.; Apampa, A.R.; Oyeboji, O.S. ABD'de Biyoçeşitliliğin Korunması ve Kaynak Yönetiminin Geliştirilmesinde Büyük Veri ve Yapay Zekanın Rolü. *World J. Adv. Res. Rev.* **2024**, *23*, 1851-1873. [\[CrossRef\]](#)
107. Silvestro, D.; Gorla, S.; Sterner, T.; Antonelli, A. Yapay Zeka ile Biyoçeşitliliğin Korunmasının Geliştirilmesi. *Nat. Sürdürülebilirlik.* **2022**, *5*, 415-424. [\[CrossRef\]](#)

108. Kamrowska-Zaluska, D. Yapay Zeka Tabanlı Araçların ve Kentsel Büyük Veri Analitiğinin Şehirlerin Tasarımı ve Planlaması Üzerindeki Etkisi. *Arazi* **2021**, *10*, 1209. [CrossRef]
109. Yiğitcanlar, T.; Kankanamge, N.; Regona, M.; Ruiz Maldonado, A.; Rowan, B.; Ryu, A.; Desouza, K.C.; Corchado, J.M.; Mehmood, R.; Li, R.Y.M. Yapay Zeka Teknolojileri ve İlgili Kentsel Planlama ve Kalkınma Kavramları: Avustralya'da Nasıl Algılanıyor ve Kullanılıyor? *J. Open Innov. Technol. Mark. Karmaşık*. **2020**, *6*, 187. [CrossRef]
110. Jha, A.K.; Ghimire, A.; Thapa, S.; Jha, A.M.; Raj, R. Kentsel Planlama için Yapay Zeka Üzerine Bir İnceleme: Sürdürülebilir Akıllı Şehirler İnşa Etmeye Doğru. İçinde 2021 6. Uluslararası Buluşsal Hesaplama Teknolojileri Konferansı (ICICT) Bildirileri, Coimbatore, Hindistan, 20-22 Ocak 2021; IEEE: Piscataway, NJ, ABD, 2021; pp. 937-944.
111. Sanchez, T.W.; Shumway, H.; Gordner, T.; Lim, T. Kentsel Planlamada Yapay Zekanın Beklentileri. *Int. J. Urban Sci.* **2023**, *27*, 179-194. [CrossRef]
112. Chen, C.-Y.; Chai, K.K.; Lau, E. Bina Enerji ve Karbon Ayak İzi Modellemesi için Yapay Zeka Destekli Yaklaşım. *Energy AI* **2021**, *5*, 100091. [CrossRef]
113. Aras, S.; Hanifi Van, M. Enerji Tüketimi ve CO₂Emisyonları için Yorumlanabilir Bir Tahmin Çerçevesi. *Uygulamalı Enerji* **2022**, *328*, 120163. [CrossRef]
114. Nazir, T.; Nagra, H.F.; Bhatti, M.H.; Shahid, R.N.; Shaukat, N.; Tariq, N.U.H. Çevresel Etki için Tahmine Dayalı Analitik: CO₂Emisyonlarının Tahmininde Derin Öğrenme ve Yapay Zeka Topluluk Stratejileri. 2024. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://www.researchsquare.com/article/rs-4081410/v1> (23 Aralık 2024 tarihinde erişilmiştir).
115. Meng, Y.; Noman, H. Makine Öğrenimi Yoluyla Yapay Zeka Kullanarak CO₂Emisyon Ayak İzinin Tahmin Edilmesi. *Atmosfer* **2022**, *13*, 1871. [CrossRef]
116. Gaur, L.; Afaq, A.; Arora, G.K.; Khan, N. Sistemler Sistemi Teorisi Kullanılarak Karbon Emisyonları için Yapay Zeka. *Ekoloji. Inform.* **2023**, *76*, 102165. [CrossRef]
117. Brady, M. Yapay Zeka ve Robotik. *Artif. Intell.* **1985**, *26*, 79-121. [CrossRef]
118. Rajan, K.; Saffiotti, A. Bütünleşik Yapay Zeka ve Robotik Bilimine Doğru. *Artif. Intell.* **2017**, *247*, 1-9. [CrossRef]
119. Moglia, A.; Georgiou, K.; Georgiou, E.; Satava, R.M.; Cuschieri, A. A Systematic Review on Artificial Intelligence in Robot-Assisted Surgery. *Int. J. Surg.* **2021**, *95*, 106151. [CrossRef]
120. Giordano, G.; Murali Babu, S.P.; Mazzolai, B. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve İklim Eylemlerine Yönelik Yumuşak Robotik. *Ön. Robot. AI* **2023**, *10*, 1116005. [CrossRef]
121. Putta, P.; Mills, E.; Garg, N.; Motwani, S.; Finn, C.; Garg, D.; Rafailov, R. Agent Q: Advanced Reasoning and Learning for Autonomous AI Agents. *arXiv* **2024**, arXiv:2408.07199.
122. Maes, P. Uyarlanabilir Otonom Ajanların Modellenmesi. *Artif. Yaşam* **1993**, *1*, 135-162. [CrossRef]
123. Hauptman, A.I.; Schelble, B.G.; McNeese, N.J.; Madathil, K.C. Uyum Sağla ve Üstesinden Gel: Uyarlanabilir Otonom Ajanların İnsan-Yapay Zeka Takım Çalışmasına Yönelik Algıları. *Bilgisayar. İnsan Davranışları. Behav.* **2023**, *138*, 107451. [CrossRef]
124. Totschnig, W. Tam Otonom Yapay Zeka. *Bilim Müh. Etik* **2020**, *26*, 2473-2485. [CrossRef] [PubMed]
125. Candrian, C.; Scherer, A. Makinelerin Yükselişi: Kararları Otonom Yapay Zekaya Devretmek. *Bilgisayar. İnsan Davranışları. Behav.* **2022**, *134*, 107308. [CrossRef]
126. Hirzle, T.; Müller, F.; Draxler, F.; Schmitz, M.; Knierim, P.; Hornbæk, K. When XR and AI Meet-A Scoping Review on Extended Reality and Artificial Intelligence. Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Hamburg, Almanya, 19-24 Nisan 2023; ACM: New York, NY, ABD, 2023; pp. 1-45.
127. Reiners, D.; Davahli, M.R.; Karwowski, W.; Cruz-Neira, C. Yapay Zeka ve Genişletilmiş Gerçeklik Kombinasyonu: A Sistematik İnceleme. *Ön. Sanal Gerçek.* **2021**, *2*, 721933. [CrossRef]
128. Pei, J.; Viola, I.; Huang, H.; Wang, J.; Ahsan, M.; Ye, F.; Yiming, J.; Sai, Y.; Wang, D.; Chen, Z.; et al. Autonomous Workflow for Multimodal Fine-Grained Training Assistants Towards Mixed Reality. *arXiv* **2024**, arXiv:2405.13034.
129. Stanney, K.M.; Archer, J.; Skinner, A.; Horner, C.; Hughes, C.; Brawand, N.P.; Martin, E.; Sanchez, S.; Morales, L.; Fidopiastis, C.M.; et al. Yapay Zeka ile Desteklenen Uyarlanabilir Genişletilmiş Gerçeklik Eğitiminden Elde Edilen Performans Kazanımları. *J. Def. Model. Simul. Uygulama Metodolojisi. Teknol.* **2022**, *19*, 195-218. [CrossRef]
130. Serrano, M.; Dang, H.N.; Nguyen, H.M.Q. İnsan Merkezli Uygulamalar için Yapay Zeka ve Nesnelerin İnterneti Yakınsamasındaki Son Gelişmeler: Nesnelerin İnterneti Bilimi. Proceedings of the 8th International Conference on the Internet of Things (IoT), Santa Barbara, CA, USA, 15-18 October 2018; ACM: New York, NY, USA, 2018; pp. 1-5.
131. Shi, F.; Ning, H.; Huangfu, W.; Zhang, F.; Wei, D.; Hong, T.; Daneshmand, M. Nesnelerin İnterneti ve Yapay Zekanın Yakınsamasındaki Son Gelişmeler. *IEEE Netw.* **2020**, *34*, 8-15. [CrossRef]
132. Mastorakis, G.; Mavromoustakis, C.X.; Batalla, J.M.; Pallis, E. (Eds.) *Convergence of Artificial Intelligence and the Internet of Things*; Internet of Things Series; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2020; ISBN 978-3-030-44906-3.
133. Bibri, S.E.; Alexandre, A.; Sharifi, A.; Krogstie, J. Çevresel Olarak Sürdürülebilir Akıllı Şehirler ve Bunların Birleştirdiği Yapay Zeka, IoT ve Büyük Veri Teknolojileri ve Çözümleri: Kapsamlı Bir Literatür Taramasına Entegre Bir Yaklaşım. *Energy Inform.* **2023**, *6*, 9. [CrossRef] [PubMed]

134. Khan, S.A.; Kalifullah, A.H.; Ibragimova, K.; Singh, A.K.; Muniyandy, E.; Rachapudi, V. Integrating AI and IoT in Advanced Optical Systems for Sustainable Energy and Environment Monitoring. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* **2024**, *15*. [CrossRef]
135. Yu, Q.; Xiong, F.; Wang, Y. Akıllı Çevre İzleme Sistemi için Kablosuz Sensör Ağı ve IoT Entegrasyonu. *J. Interconnect. Netw.* **2022**, *22*, 2143010. [CrossRef]
136. Bin Mofidul, R.; Alam, M.M.; Rahman, M.H.; Jang, Y.M. Gerçek Zamanlı Enerji Veri Toplama, Anomali Tespit ve İzleme Sistemi: Edge ve Cloud AI ile Güvenli, Sağlam ve Entegre Küresel IIoT Altyapısının Uygulanması. *Sensörler* **2022**, *22*, 8980. [CrossRef] [PubMed]
137. Sharma, A.; Singh, K.J.; Kapoor, D.S.; Thakur, K.; Mahajan, S. Çevresel Sürdürülebilirlikte IoT'nin Rolü: Akıllı Şehirler için Gelişmeler ve Uygulamalar. *Akıllı Şehirlerde Mobil Kitle Algılama ve Uzaktan Algılama*; Kerrache, C.A., Sahraoui, Y., Calafate, C.T., Vegni, A.M., Eds.; Nesnelerin İnterneti; Springer: Cham, İsviçre, 2025; s. 21-39, ISBN 978-3-031-72731-3.
138. Selvam, A.P.; Al-Humairi, S.N.S. *IoT ve Sensör Entegrasyonunun Gerçek Zamanlı Hava Durumu İzleme Sistemleri Üzerindeki Etkisi: A Systematic Review*; Springer Science and Business Media LLC: Berlin, Almanya, 2023.
139. Rahu, M.A.; Karim, S.; Ali, S.M.; Jatoti, G.M.; Sohu, N.D. Akıllı Tarımda Kablosuz Sensör Ağları, Nesnelerin İnterneti, Yapay Zeka ve Derin Öğrenmenin Entegrasyonu: Kapsamlı Bir Araştırma. *J. Innov. Intell. Hesaplama. Emerg. Technol. (JIICET)* **2024**, *1*, 8-18.
140. Alam, M.J.B.; Manzano, L.S.; Debnath, R.; Ahmed, A.A. IoT ve Yapay Zeka Teknolojileri Kullanılarak Eğitim Hareketinin ve Toprak Hidrolojik Davranışının İzlenmesi: Sistematik Bir İnceleme. *Hidroloji* **2024**, *11*, 111. [CrossRef]
141. Ranjan, R.; Rana, O.; Nepal, S.; Yousif, M.; James, P.; Wen, Z.; Barr, S.; Watson, P.; Jayaraman, P.P.; Georgakopoulos, D.; vd. Next Grand Challenges: Nesnelerin İnterneti ve Veri Biliminin Bütünleştirilmesi. *IEEE Cloud Comput.* **2018**, *5*, 12-26. [CrossRef]
142. Meer, T.; Gupta, R.; Ailyn, D. Akıllı Sensör Entegrasyonu: Çevresel Koşulların Gerçek Zamanlı İzlenmesi için IoT Sensörleri. 2024. Çevrimiçi olarak mevcuttur: https://www.researchgate.net/publication/384402035_Smart_Sensor_Integration_IoT_sensors_for_real-time_monitoring_of_environmental_conditions (27 Aralık 2024 tarihinde erişilmiştir).
143. Bibri, S.E.; Krogstie, J.; Kabolli, A.; Alahi, A. Daha Akıllı Eko-Kentler ve Çevresel Sürdürülebilirlik için Öncü Nesnelerin Yapay Zekası Çözümleri: Kapsamlı Bir Sistemik İnceleme. *Environ. Sci. Ecotechnol.* **2024**, *19*, 100330. [CrossRef] [PubMed]
144. Manavalan, M. Yapay Zeka, Makine Öğrenimi ve Nesnelerin İnternetinin Kesişimi-Ekonomik Bir Bakış. *Glob. Discl. Econ. Bus.* **2020**, *9*, 119-128. [CrossRef]
145. Kalusivalingam, A.K.; Sharma, A.; Patel, N.; Singh, V. Akıllı Şehir Gelişiminin Yapay Zeka ile Güçlendirilmesi: Makine Öğrenimi Algoritmaları ve IoT Odaklı Veri Analitiğinden Yararlanma. *Int. J. AI ML* **2021**, *2*.
146. Mazhar, T.; İrfan, H.M.; Haq, I.; Ullah, I.; Ashraf, M.; Shloul, T.A.; Ghadi, Y.Y.; Imran, Elkamchouchi, D.H. Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi Teknikleri Kullanılarak Akıllı Şebekelerde IoT'nin Zorluklarının ve Çözümlerinin Analizi: Bir İnceleme. *Elektronik* **2023**, *12*, 242. [CrossRef]
147. Ali, S.I.; Abdulqader, D.M.; Ahmed, O.M.; Ismael, H.R.; Hasan, S.; Ahmed, L.H. Kurumsal Sistemler için Sürdürülebilir Karar Vermede Yapay Zeka ve IoT Rolü için Web Teknolojisi ve Bulut Bilişim İlhamının Değerlendirilmesi. *J. Inf. Technol. Inform.* **2024**, *3*, 4.
148. Protopsaltis, A.; Sarigiannidis, P.; Margounakis, D.; Lytos, A. Nesnelerin İnternetinde Veri Görselleştirme: Araçlar, Metodolojiler ve Zorluklar. Proceedings of the 15th International Conference on Availability, Reliability and Security, Virtual Event, Ireland, 25 August 2020; ACM: New York, NY, USA, 2020; pp. 1-11.
149. Salamkar, M.A. Veri Görselleştirme: Karmaşık Veri Örüntülerini Daha İyi Yorumlamak için Yapay Zeka ile Geliştirilmiş Görselleştirme Araçları. *J. Bioinform. Artif. Intell.* **2024**, *4*, 204-226. [CrossRef]
150. Singh, J. Dijital Çağda Sensör Tabanlı Kişisel Veri Toplama: IoT ve Giyilebilir Cihazlarda Gizlilik Etkilerini, Yapay Zeka Güdümlü Analitiği ve Güvenlik Zorluklarını Keşfetmek. *Dağıtım. Öğrenmek. Broad Appl. Sci. Res.* **2019**, *5*, 785-809.
151. Kanungo, S. Veri İşlemede Devrim: IoT İnovasyonu için Gelişmiş Bulut Bilişim ve Yapay Zeka Sinerjisi. *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.* **2020**, *2*, 1032-1040.
152. Tawakuli, A.; Havers, B.; Gulisano, V.; Kaiser, D.; Engel, T. Survey: Zaman Serisi Veri Ön İşleme: Bir Anket ve Ampirik Analizi. *J. Eng. Res.* **2024**, *baskıda*.
153. Dhawas, P.; Ramteke, M.A.; Thakur, A.; Polshetwar, P.V.; Salunkhe, R.V.; Bhagat, D. Büyük Veri Analiz Teknikleri: Veri Ön İşleme Teknikleri, Veri Madenciliği Teknikleri, Makine Öğrenmesi Algoritması, Görselleştirme. *Big Data Analytics Techniques for Market Intelligence* içinde; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2024; s. 183-208.
154. Pattayam, S.P. Çevresel İzleme için Yapay Zeka Güdümlü Veri Bilimi: Veri Toplama, Analiz ve Tahmine Dayalı Modelleme Teknikleri. *Aust. J. Mach. Öğren. Res. Appl.* **2021**, *1*, 132-169.
155. Panduman, Y.Y.F.; Funabiki, N.; Fajrianti, E.D.; Fang, S.; Sukaridhoto, S. A Survey of AI Techniques in IoT Applications with Use Case Investigations in the Smart Environmental Monitoring and Analytics in Real-Time IoT Platform. *Bilgi* **2024**, *15*, 153. [CrossRef]
156. Ramadan, M.N.A.; Ali, M.A.H.; Khoo, S.Y.; Alkhedher, M.; Alherbawi, M. Endüstriyel Ortamda Hava Kirliliğinin İzlenmesi ve Tahmini için Gerçek Zamanlı IoT Destekli Yapay Zeka Sistemi. *Ekotoksikol. Environ. Saf.* **2024**, *283*, 116856. [CrossRef]

157. Villegas-Ch, W.; García-Ortiz, J.; Sánchez-Viteri, S. IoT'de Akıllı İzlemeye Doğru: Gerçek Zamanlı Analiz ve Tahmin için Yapay Zeka Uygulamaları. *IEEE Access* 2024, *baskıda*.
158. Habeeb, R.A.A.; Nasaruddin, F.; Gani, A.; Hashem, I.A.T.; Ahmed, E.; Imran, M. Anomali Tespiti için Gerçek Zamanlı Büyük Veri İşleme: Bir Araştırma. *Int. J. Inf. Manag.* **2019**, *45*, 289-307. [[CrossRef](#)]
159. Trilles, S.; Belmonte, Ö.; Schade, S.; Huerta, J. IoT Veri Akışlarını Gerçek Zamanlı Olarak Analiz Etmek için Etki Alanından Bağımsız Bir Metodoloji. Çevresel Verilerden Anomali Tespiti için Bir Kavram Kanıtı Uygulaması. *Int. J. Digit. Dünya* **2017**, *10*, 103-120. [[CrossRef](#)]
160. Srivastava, A.; Maity, R. Kentsel İklim Değişikliğine Uyum ve Sürdürülebilir Kalkınmada AI-ML Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Sürdürülebilirlik* **2023**, *15*, 16461. [[CrossRef](#)]
161. Bibri, S.E.; Huang, J.; Jagatheesaperumal, S.K.; Krogstie, J. Sürdürülebilir Akıllı Şehirlerin Çevresel Planlamasında Yapay Zeka ve Dijital İkizin Sinerjik Etkileşimi: Kapsamlı Bir Sistematik İnceleme. *Environ. Sci. Ecotechnol.* **2024**, *20*, 100433. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
162. Bala Dhandayuthapani, V. Çevresel Dayanıklılık ve Sürdürülebilirlik için Yapay Zeka, IoT ve Akıllı Teknolojiler-Kapsamlı İncelemesi. *Int. J. Inf. Mühendislik. Elektron. Bus.* **2024**, *16*, 75-84.
163. Muhammad, A. Nehir Havzalarını Düşünen Makinelerle Yönetmek. Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Norbert Wiener in the 21st Century (21CW), Melbourne, Avustralya, 13-15 Temmuz 2016; IEEE: Piscataway, NJ, ABD, 2016; pp. 1-6.
164. Moreno, C.; Aquino, R.; Ibarreche, J.; Pérez, I.; Castellanos, E.; Álvarez, E.; Rentería, R.; Anguiano, L.; Edwards, A.; Lepper, P. RiverCore: Hücrel İletişim Üzerinden Nehir Su Seviyesi İzleme için IoT Cihazı. *Sensörler* **2019**, *19*, 127. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
165. Zakaria, M.I.; Jabbar, W.A.; Sulaiman, N. Havza Alanlarında LoRaWAN Tabanlı IoT Taşkın İzleme ve Uyarı Sistemi için Akıllı Algılama Biriminin Geliştirilmesi. *Internet Things Cyber-Phys. Syst.* **2023**, *3*, 249-261. [[CrossRef](#)]
166. Wei, J.; Liu, S.; Li, Z.; Liu, C.; Qin, K.; Liu, X.; Pinker, R.T.; Dickerson, R.R.; Lin, J.; Boersma, K.F.; ve diğ. Yorumlanabilir Uzaysal-Zamansal Ağırlıklı Yapay Zeka Kullanarak Yüksek Çözünürlük için Çin Genelinde Uzaydan Yer Seviyesi NO₂Gözetimi. *Çevre Bil. Sci. Technol.* **2022**, *56*, 9988-9998. [[CrossRef](#)]
167. Arat, M. Anormal Azot Dioksitin (NO₂) Tespiti Ankara'da Bir İlçenin Yoğunlaşması: Yeniden Yapılandırma Tabanlı Bir Yaklaşımı. *J. Polytech.-Politek Derg.* 2024, *baskıda*.
168. Divya, A.; Kavithanjali, T.; Dharshini, P. IoT Destekli Orman Yangını Tespit ve Erken Uyarı Sistemi. İçinde 2019 IEEE Uluslararası Sistem, Hesaplama, Otomasyon ve Ağ Konferansı Bildirileri (ICSCAN), Puducherry, Hindistan, 29-30 Mart 2019; IEEE: Piscataway, NJ, ABD, 2019; pp. 1-5. [[CrossRef](#)]
169. Chan, C.C.; Alvi, S.A.; Zhou, X.; Durrani, S.; Wilson, N.; Yebra, M. Erken Orman Yangını Tespiti için IoT Yer Algılama Sistemleri Üzerine Bir Araştırma: Teknolojiler, Zorluklar ve Fırsatlar. *IEEE Access* 2024, *baskıda*.
170. Bhardwaj, N.; Joshi, P. Gelişmiş Yangın Algılama ve Gerçek Zamanlı Karar Verme için MATTER-Enabled IoT Framework. *SN Comput. Sci.* **2024**, *5*, 1088. [[CrossRef](#)]
171. Kanakaraja, P.; Sundar, P.S.; Vaishnavi, N.; Reddy, S.G.K.; Manikanta, G.S. Ubidots Platformunda IoT Destekli Gelişmiş Orman Yangını Tespiti ve İzleme. *Materiyal. Bugün Proc.* **2021**, *46*, 3907-3914. [[CrossRef](#)]
172. Manoj, M.; Dhilip Kumar, V.; Arif, M.; Bulai, E.-R.; Bulai, P.; Geman, O. IoT ve Sualtı Sensörlerini Kullanan Balık Havuzları için Su Kalitesi İzleme Sistemleri için Son Teknikler: Bir İnceleme. *Sensörler* **2022**, *22*, 2088. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
173. Zainurin, S.N.; Wan Ismail, W.Z.; Mahamud, S.N.I.; Ismail, I.; Jamaludin, J.; Ariffin, K.N.Z.; Wan Ahmad Kamil, W.M. Çeşitli Algılama Yöntemlerine Dayalı Su Kalitesinin İzlenmesindeki Gelişmeler: Sistematik Bir İnceleme. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 14080. [[CrossRef](#)]
174. Chowdury, M.S.U.; Emran, T.B.; Ghosh, S.; Pathak, A.; Alam, M.M.; Absar, N.; Andersson, K.; Hossain, M.S. IoT Tabanlı Gerçek Zamanlı Nehir Su Kalitesi İzleme Sistemi. *Procedia Comput. Sci.* **2019**, *155*, 161-168. [[CrossRef](#)]
175. Prapti, D.R.; Mohamed Shariff, A.R.; Che Man, H.; Ramli, N.M.; Perumal, T.; Shariff, M. Nesnelerin İnterneti (IoT) Tabanlı Akuakültür: Su Kalitesinin İzlenmesinde IoT Uygulamasına Genel Bir Bakış. *Rev. Aquac.* **2022**, *14*, 979-992. [[CrossRef](#)]
176. Islam, M.M.; Kashem, M.A.; Alyami, S.A.; Moni, M.A. Balık Türlerinin Hayatta Kalmasını Tahmin Etmek için IoT Sensörleri ve Makine Öğrenmesi ile Havuzların Su Kalitesi Metriklerinin İzlenmesi. *Mikroişlem. Mikrosistem.* **2023**, *102*, 104930. [[CrossRef](#)]
177. Avancini, D.B.; Rodrigues, J.J.P.C.; Rabêlo, R.A.L.; Das, A.K.; Kozlov, S.; Solic, P. Akıllı Şebekeleri için IoT Tabanlı Yeni Bir Akıllı Enerji Ölçer. *Int. J. Energy Res.* **2021**, *45*, 189-202. [[CrossRef](#)]
178. Mohamed, A.; Mohammed, O. Akıllı Şebeke Uygulamalarında Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri için Gerçek Zamanlı Enerji Yönetim Şeması. *Elektrik Güç Sistemleri. Güç Sistemleri. Res.* **2013**, *96*, 133-143. [[CrossRef](#)]
179. Morello, R.; De Capua, C.; Fulco, G.; Mukhopadhyay, S.C. Akıllı Şebekelerde Enerji Akışını İzlemek için Akıllı Güç Ölçer: Geleceğin Elektrik Şebekesinde Gelişmiş Algılama ve IoT'nin Rolü. *IEEE Sens. J.* **2017**, *17*, 7828-7837. [[CrossRef](#)]
180. Konya, A.; Nematzadeh, P. Yapay Zekanın Çevre Disiplinlerine Son Uygulamaları: Bir İnceleme. *Bilim Toplamı. Çevre.* **2024**, *906*, 167705. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

181. Santos, M.R.; Carvalho, L.C. Yapay Zeka Odaklı Katılımcı Çevre Yönetimi: Yenilikler, Uygulamalar ve Gelecek Beklentiler. *J. Environ. Manag.* **2025**, *373*, 123864. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
182. Chen, Y. Disiplinlerarası Alanlarda IoT, Bulut, Büyük Veri ve Yapay Zeka. *Simul. Model. Pratik. Teori* **2020**, *102*, 102070. [\[CrossRef\]](#)
183. Hamza, M.A.; Shaiba, H.; Marzouk, R.; Alhindi, A.; Asiri, M.M.; Yaseen, I.; Motwakel, A.; Rizwanullah, M. Yapay Zeka Destekli Çevresel Hava Kirliliği İzleme Çerçevesi ile Büyük Veri Analitiği. *Hesaplama. Materyal. Contin.* **2022**, *73*, 3235-3250.
184. Kumar, A.; Madaan, G.; Sharma, P.; Kumar, A. Yıkıcı Teknolojilerin Çevre Sağlığına Uygulanması: Yapay Zeka, Blockchain ve Nesnelerin İnternetine Genel Bir Bakış. *Asia Pac. J. Health Manag.* **2021**, *16*, 251-259. [\[CrossRef\]](#)
185. Basu, M.; Nath, M.D. Sürdürülebilir Yaşam için COVID-19 Sonrası Pandemi Döneminde Çevre ve Sağlık Sorunlarının İzlenmesinde Yapay Zekanın Rolü Üzerine Bir Çalışma. *Multimedya Bilgi İşleme için Yapay Zeka* içinde; CRC Press: Boca Raton, FL, ABD, 2024; s. 132-166.
186. Kumari, N.; Pandey, S. Çevresel Sürdürülebilirlik ve İklim Değişikliğinde Yapay Zeka Uygulamaları. *Makine Öğrenimi ve Yapay Zeka ile İklim Değişikliği için Görselleştirme Teknikleri* içinde; Elsevier: Amsterdam, Hollanda, 2023; s. 293-316.
187. Khallaf, A.N. Küresel Isınmanın Etkisini Azaltmaya Yardımcı Olmak için Yapay Zekayı Kullanmak. *Güç Sistemleri. Teknol.* **2024**, *48*, 1927-1947. [\[CrossRef\]](#)
188. Wang, Y.; Ho, I.W.-H.; Chen, Y.; Wang, Y.; Lin, Y. Tatlı Su Biyoçeşitliliğin Korunması için AIoT'de Gerçek Zamanlı Su Kalitesi İzleme ve Tahmini. *IEEE Internet Things J.* **2021**, *9*, 14366-14374. [\[CrossRef\]](#)
189. Zulkifli, C.Z.; Garfan, S.; Talal, M.; Alamoodi, A.H.; Alamleh, A.; Ahmaro, I.Y.; Sulaiman, S.; Ibrahim, A.B.; Zaidan, B.B.; Ismail, A.R. IoT Tabanlı Su İzleme Sistemleri: Sistematik Bir İnceleme. *Su* **2022**, *14*, 3621. [\[CrossRef\]](#)
190. Mustafa, H.M.; Mustapha, A.; Hayder, G.; Salisu, A. Su Kalitesi İzleme ve Tahmininde IoT ve Yapay Zeka Uygulamaları: Bir İnceleme. İçinde 2021 6. Uluslararası Buluşsal Hesaplama Teknolojileri Konferansı Bildirileri (ICICT), Coimbatore, Hindistan, 20-22 Ocak 2021; IEEE: Piscataway, NJ, ABD, 2021; s. 968-975. [\[CrossRef\]](#)
191. Bradley, R.W.; Sprague, J.B. pH, Su Sertliği ve Alkalinitenin Çinkonun Gökkuşağı Alabalığına (*Salmo gairdneri*) Akut Öldürücülüğü Üzerindeki Etkisi. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **1985**, *42*, 731-736. [\[CrossRef\]](#)
192. Sigdel, B. *Su Kalitesi Ölçüm İstasyonu: pH, Bulanıklık ve Sıcaklık Ölçümü*; Teknik Rapor; Metropolia University of Applied Sciences: Helsinki, Finlandiya, 2017.
193. Lloyd, D.S.; Koenings, J.P.; Laperriere, J.D. Alaska'nın Tatlı Sularında Bulanıklığın Etkileri. *N. Am. J. Fish. Manag.* **1987**, *7*, 18-33. [\[CrossRef\]](#)
194. Gorde, S.P.; Jadhav, M.V. Su Kalitesi Parametrelerinin Değerlendirilmesi: Bir İnceleme. *J. Eng. Res. Appl.* **2013**, *3*, 2029-2035.
195. Kannel, P.R.; Lee, S.; Lee, Y.-S.; Kanel, S.R.; Khan, S.P. Nehir Suyu Sınıflandırması ve Kentsel Etki Değerlendirmesi için Su Kalitesi Endeksleri ve Çözünmüş Oksijenin Gösterge Olarak Uygulanması. *Environ. Monit. Assess.* **2007**, *132*, 93-110. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
196. Best, M.A.; Wither, A.W.; Coates, S. Su Çerçeve Direktifinde Fiziko-Kimyasal Destekleyici Unsurlar Olarak Çözünmüş Oksijen. *Mar. Pollut. Bull.* **2007**, *55*, 53-64. [\[CrossRef\]](#)
197. Nazeer, S.; Hashmi, M.Z.; Malik, R.N. Pakistan'daki Soan Nehri'nde Ağır Metal Dağılımı, Risk Değerlendirmesi ve Su Kalite İndeksi ile Su Kalitesi Karakterizasyonu. *Ekoloji. Indic.* **2014**, *43*, 262-270. [\[CrossRef\]](#)
198. Mokarram, M.; Saber, A.; Sheykhi, V. Endüstriyel Atık Suların Salınımından Kaynaklanan Ağır Metal Kirliliğinin Nehir Suyu Kalitesi Üzerindeki Etkileri. *J. Clean. Prod.* **2020**, *277*, 123380. [\[CrossRef\]](#)
199. Rabeh, S.A. Nil'deki Bakteri ve Virüsler. *Nil* içinde; Dumont, H.J., Ed.; Monographiae Biologicae; Springer: Dordrecht, Hollanda, 2009; Cilt 89, s. 407-429, ISBN 978-1-4020-9725-6.
200. Lin, J.; Ganesh, A. Su Kalitesi Göstergeleri: Bakteriler, Kolifajlar, Enterik Virüsler. *Int. J. Environ. Sağlık Araştırmaları.* **2013**, *23*, 484-506. [\[CrossRef\]](#)
201. Çalışma EIFAC. Avrupa Tatlısu Balıkları için Su Kalitesi Kriterleri-Ekstrem pH Değerleri ve İçsu Balıkçılığı. *Water Res.* **1969**, *3*, 593-611. [\[CrossRef\]](#)
202. Banna, M.H.; Najjaran, H.; Sadiq, R.; Imran, S.A.; Rodriguez, M.J.; Hoorfar, M. Minyatürize Su Kalitesi İzleme pH ve İletkenlik Sensörleri. *Sens. Aktüatörler Kimya.* **2014**, *193*, 434-441. [\[CrossRef\]](#)
203. Bilotta, G.S.; Brazier, R.E. Askıdaki Katı Maddelerin Su Kalitesi ve Sucul Biyota Üzerindeki Etkisini Anlamak. *Water Res.* **2008**, *42*, 2849-2861. [\[CrossRef\]](#)
204. Yalaletdinova, A.V.; Beloliptsev, I.I.; Galimova, Y.O.; Vozhdaeva, M.Y.; Kantor, E.A. Bulanıklık ile Su Kalitesinin Olasılık Analizi. *Iop Konf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2019**, *315*, 062019. [\[CrossRef\]](#)
205. Gunda, N.S.; Gautam, S.; Mitra, S. Su Kalitesi İzleme için Yapay Zeka. *ECS Toplantı Özetleri* içinde; The Electro- chemical Society: Pennington, NJ, ABD, 2018; s. 1997.
206. Biraghi, C.A.; Loftian, M.; Carrion, D.; Brovelli, M.A. Su Kalitesi İzleme Desteğinde Yapay Zeka. XXIV ISPRS Kongresi Bildiriler Kitabı, Sanal, 5-9 Temmuz 2021.
207. Strobl, R.O.; Robillard, P.D. Yüzey Suyu Kalitesinin İzlenmesinde Yapay Zeka Teknolojileri. *Water Int.* **2006**, *31*, 198-209. [\[CrossRef\]](#)

208. Tung, T.M.; Yaseen, Z.M. Yapay Zeka Modelleri Kullanılarak Nehir Su Kalitesi Modellemesi Üzerine Bir Araştırma: 2000-2020. *J. Hydrol.* **2020**, *585*, 124670. [\[CrossRef\]](#)
209. Nvs, B.; Saranya, P.L. Nesnelerin İnternetine Dayalı Su Kirleticilerinin İzlenmesi. In *Inorganic Pollutants in Water*; Elsevier: Amsterdam, Hollanda, 2020; pp. 371-397. [\[CrossRef\]](#)
210. Singh, Y.; Walingo, T. IoT Kablosuz Sensör Ağları ile Akıllı Su Kalitesi İzleme. *Sensörler* **2024**, *24*, 2871. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
211. Hossain, M.S.; Rahman, M.K.; Dalim, H.M. Çevre Sağlığının Gerçek Zamanlı İzlenmesi ve Tahmini için Yapay Zekadan Yararlanma Tehlikeler: ABD'de Halk Sağlığının Korunması. *Rev. Intell. Artif. Med. Appl.* **2024**, *15*, 1117-1145.
212. Mohanty, A.; Mohanty, S.K.; Mohapatra, A.G. Yapay Zeka Destekli Atıksu Arıtma Sistemlerinde Gerçek Zamanlı İzleme ve Hata Tespiti. *Yapay Zeka Temizliği içinde: Transforming Wastewater Treatment Through Artificial Intelligence*; Garg, M.C., Ed.; Springer Water; Springer: Cham, İsviçre, 2023; s. 165-199, ISBN 978-3-031-67236-1.
213. Singh, S.; Kumar, A.; Prasad, A.; Bharadwaj, N. IoT Tabanlı Su Kalitesi İzleme Sistemi. IRFIC 2016 Bildiriler Kitabı, Yeni Delhi, Hindistan, 10 Ocak 2016; Institute of Research and Journals (IRAJ): Bhubaneswar, Hindistan, 2016.
214. Sugiharto, W.H.; Susanto, H.; Prasetijo, A.B. IoT aracılığıyla Gerçek Zamanlı Su Kalitesi Değerlendirmesi: pH, TDS, Sıcaklık, ve Bulanıklığın İzlenmesi. *J. Inf. Intell. Eng. Uygulama* **2023**, *28*, 823-831. [\[CrossRef\]](#)
215. Yunfeng, L.; Tianpei, Z. NB-IoT Tabanlı Çözünmüş Oksijen İzleme Sistemi Tasarımı. İçinde 2019 Uluslararası Akıllı Şebeke ve Elektrik Otomasyonu Konferansı Bildirileri (ICSGEA), Zhangjiajie, Çin, 7-9 Haziran 2019; IEEE: Piscataway, NJ, ABD, 2019; pp. 98-101. [\[CrossRef\]](#)
216. Wang, L.Y.K.; Bong, J.W.; Eng, Y.X.; Wong, W.S. IoT Tabanlı Atıksu Çözünmüş Oksijen ve Toplam Çözünmüş Katıların Veri Analitiği ile İzlenmesi. Proceedings of the 2024 11th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Istanbul, Turkey, 26-28 August 2024; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2024; pp. 98-103.
217. Bria, A.R.; Cerro, G.; Ferdinandi, M.; Marrocco, C.; Molinara, M. Suyun Otomatik Olarak Tanınması için IoT'ye Hazır Bir Çözüm Kirleticiler. *Örüntü Tanıma. Lett.* **2020**, *135*, 188-195. [\[CrossRef\]](#)
218. Pamula, A.S.; Ravilla, A.; Madiraju, S.V.H. Hava, Su ve Topraktaki Kirleticilerin Gerçek Zamanlı İzlenmesinde Nesnelerin İnterneti (IoT) Uygulamaları. *Mühendislik. Proc.* **2022**, *27*, 26. [\[CrossRef\]](#)
219. Ooko, S.O.; Rweyemamu, E. Nesnelerin İnterneti ve Yapay Zeka Kullanılarak Afrika Kırsal Ev Hava Kirliliğinin İzlenmesi ve Tahmin Edilmesi. *Pan-Afr. J. Health Environ. Sci.* **2024**, *3*, 59. [\[CrossRef\]](#)
220. Konar, M. Akıllı Kentsel Tarım ile Otomatik Mahsul için IoT ve Yapay Zekayı Entegre Etme. İçinde 2024 Uluslararası Gelişen Yenilikler ve Gelişmiş Bilgi İşlem Konferansı Bildirileri (INNOCOMP), Sonipat, Hindistan, 25-26 Mayıs 2024. [\[CrossRef\]](#)
221. Alahi, M.E.E.; Sukkuea, A.; Tina, F.W.; Nag, A.; Kurdthongmee, W.; Suwannarat, K.; Mukhopadhyay, S.C. Akıllı Şehir Senaryosu için IoT Özellikli Teknolojilerin ve Yapay Zekanın (AI) Entegrasyonu: Son Gelişmeler ve Gelecek Trendler. *Sensörler* **2023**, *23*, 5206. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
222. Alselek, M.; Alcaraz-Calero, J.; Wang, Q. Dinamik AI-IoT: Ultra Düşük Güçlü 5G IoT Cihazlarında Güncellenebilir Yapay Zeka Modellerinin Etkinleştirilmesi. *IEEE Internet Things J.* **2024**, 14192. [\[CrossRef\]](#)
223. Rathoure, A.K.; Rathaur, A.K. Biyoçeşitlilik Değerlendirmesinde Yapay Zeka ve IoT. *J. Aquac. Mar. Biol.* **2024**, *13*, 108. [\[CrossRef\]](#)
224. Gupta, S.; Hasan, W.; Singh, S.; Kumar, D.; Ansari, M.J.; Nisar, S. (Eds.) Ethical Considerations of AI and IoT in Farming, Chapter 16. *Agriculture 4.0 Smart Farming with IoT and Artificial Intelligence kitabında*; CRC Press: Londra, Birleşik Krallık, 2024. [\[CrossRef\]](#)
225. Yiou, P.; Baert, E.; Loutre, M.F. İklim Verilerinin Spektral Analizi. *Surv. Geophys.* **1996**, *17*, 619-663. [\[CrossRef\]](#)
226. Mitchell, T.D.; Hulme, M.; New, M. Siyasi Alanlar için İklim Verileri. *Alan* **2002**, *34*, 109-112. [\[CrossRef\]](#)
227. Overpeck, J.T.; Meehl, G.A.; Bony, S.; Easterling, D.R. 21. Yüzyılda İklim Veri Zorlukları. *Bilim* **2011**, *331*, 700-702. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
228. Box, J.E.; Colgan, W.T.; Christensen, T.R.; Schmidt, N.M.; Lund, M.; Parmentier, F.-J.W.; Brown, R.; Bhatt, U.S.; Euskirchen, E.S.; Romanovsky, V.E. Arktik İklim Değişikliğinin Temel Göstergeleri: 1971-2017. *Environ. Res. Lett.* **2019**, *14*, 045010. [\[CrossRef\]](#)
229. Kenney, M.A.; Janetos, A.C.; Gerst, M.D. Ulusal İklim Göstergeleri İçin Bir Çerçeve. *İklim. Chang.* **2020**, *163*, 1705-1718. [\[CrossRef\]](#)
230. Kjellström, E.; Boberg, F.; Castro, M.; Christensen, J.H.; Nikulin, G.; Sánchez, E. Bölgesel İklim Modelleri için Performans Göstergeleri Olarak Günlük ve Aylık Sıcaklık ve Yağış İstatistikleri. *Clim. Res.* **2010**, *44*, 135-150. [\[CrossRef\]](#)
231. Bowler, D.; Böhning-Gaese, K. İklim Değişikliği Göstergesi Olarak Toplum-Sıcaklık Endeksinin Geliştirilmesi. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0184275. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
232. Wypych, A. Kraków'da (Güney Polonya) İklim Değişikliği Göstergesi Olarak Yüzey Neminin Yirminci Yüzyıl Değişkenliği. *Teori. Appl. Climatol.* **2010**, *101*, 475-482. [\[CrossRef\]](#)
233. Matthews, T. Nemli Sıcaklık ve İklim Değişikliği. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* **2018**, *42*, 391-405. [\[CrossRef\]](#)

234. Groisman, P.Y.; Karl, T.R.; Easterling, D.R.; Knight, R.W.; Jamason, P.F.; Hennessy, K.J.; Suppiah, R.; Page, C.M.; Wibig, J.; Fortuniak, K.; vd. Şiddetli Yağış Olasılığındaki Değişiklikler: İklim Değişikliğinin Önemli Göstergeleri. *Weather and Climate Extremes* içinde; Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A., Eds.; Springer: Dordrecht, Hollanda, 1999; s. 243-283, ISBN 978-90-481-5223-0.
235. Pal, I.; Al-Tabbaa, A. Mevsimsel Yağış Aşırılıklarındaki Eğilimler-Hindistan, Kerala'da 'İklim Değişikliğinin' Bir Göstergesi. *J. Hydrol.* **2009**, *367*, 62-69. [\[CrossRef\]](#)
236. Alpert, P.; Mandel, M. Rüzgar Değişkenliği-İsrail'de Mezoklimatik Değişimin Bir Göstergesi. *J. Clim. Appl. Meteorol.* **1986**, *25*, 1568-1576. [\[CrossRef\]](#)
237. Dewitte, S.; Cornelis, J.P.; Müller, R.; Munteanu, A. Yapay Zeka Hava Tahmini, İklim İzleme ve On Yıllık Tahminlerde Devrim Yaratıyor. *Uzaktan Algılama.* **2021**, *13*, 3209. [\[CrossRef\]](#)
238. Rahman, A.; Saha, R.; Goswami, D.; Mintoo, A.A. İklim Veri Yönetim Sistemleri: Politika Kararlarının Bilgilendirilmesi için Analitik Araçların Sistematik İncelemesi. *Ön. Appl. Eng. Technol.* **2024**, *1*, 1-21. [\[CrossRef\]](#)
239. Salam, A. Çevresel Sürdürülebilirlik ve İklim Değişikliği için Nesnelerin İnterneti. *Internet of Things for Sustainable Community Development* içinde; *Nesnelerin İnterneti*; Springer International Publishing: Cham, İsviçre, 2024; s. 33-69, ISBN 978-3-031-62161-1.
240. Gutman, S.I.; Benjamin, S.G. Yer Tabanlı GPS Meteorolojik Gözlemlerinin Sayısal Hava Tahminindeki Rolü. *GPS Solut.* **2001**, *4*, 16-24. [\[CrossRef\]](#)
241. De Sanctis, M.; Cianca, E.; Araniti, G.; Bisio, I.; Prasad, R. Uzak Nesnelerin İnternetini Destekleyen Uydu İletişimi. *IEEE Internet Things J.* **2015**, *3*, 113-123. [\[CrossRef\]](#)
242. Chen, Y.; Zhang, M.; Li, X.; Che, T.; Jin, R.; Guo, J.; Yang, W.; An, B.; Nie, X. Uydu Destekli Uzak Nesnelerin İnterneti Ağı Tibet Platosunun En Uzak Bölgelerinden Saha Verilerini İletiyor. *Sensörler* **2022**, *22*, 3713. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
243. Almalki, F.A.; Soufiene, B.O.; Alsamhi, S.H.; Sakli, H. IoT ve İHA'lara Dayalı Çevresel Akıllı Tarım İzleme Sistemi için Düşük Maliyetli Bir Platform. *Sürdürülebilirlik* **2021**, *13*, 5908. [\[CrossRef\]](#)
244. Revathi, S.; Ansari, A.; Susmi, S.J.; Madhavi, M.; Gunavathie, M.A.; Sudhakar, M. Sürdürülebilir Dijital Ekosistemler Oluşturmak için Makine Öğrenimi-IoT Teknolojileri Entegrasyonu. *Advances in Computational Intelligence and Robotics* içinde; Kajla, T., Kansra, P., Singh, N., Eds.; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2024; pp. 259-291, ISBN 979-8-3693-2432-5.
245. Ali, M.A.; Dhanaraj, R.K.; Nayyar, A. Büyük Tarım Alanlarında Ses Analitiği Kullanan Yüksek Performans Odaklı Yapay Zeka Destekli IoT Tabanlı Haşere Tespit Sistemi. *Mikroişlem. Microsyst.* **2023**, *103*, 104946. [\[CrossRef\]](#)
246. Farhaoui, Y.; El Allaoui, A. Nesnelerin İnternetinde Sürdürülebilirlik: İçgörüler, Kapsam ve Büyük Veri Entegrasyonu ile Yapay Zeka Odaklı Optimize Edilmiş Su Yönetimi. *Sağlık Hizmetlerinde Yapay Zeka, Büyük Veri, IOT ve Blok Zinciri içinde: From Concepts to Applications*; Farhaoui, Y., Ed.; Information Systems Engineering and Management; Springer: Cham, İsviçre, 2024; Cilt 6, s. 468-475, ISBN 978-3-031-65017-8.
247. Maraveas, C.; Piromalis, D.; Arvanitis, K.G.; Bartzanas, T.; Loukatos, D. Optimize Edilmiş Sera Ortamı ve Kaynak Yönetimi için IoT Uygulamaları. *Hesaplama. Elektr. Agric.* **2022**, *198*, 106993. [\[CrossRef\]](#)
248. Bale, A.S.; William, P.; Kondekar, V.H.; Sanamdikar, S.; Joshi, P.; Nigam, P.; Savadatti, M.B. Harnessing AI and IoT for Optimized Renewable Energy Integration and Resource Conservation. *Libr. Prog. Int.* **2024**, *44*, 1412-1426.
249. Bianchi, O.; Putro, H.P. Çevresel İzlemede Yapay Zeka: İklim Değişikliği Etkilerinin Tahmin Edilmesi ve Yönetilmesi. *Int. Trans. Artif. Intell. (ITALIK)* **2024**, *3*, 85-96. [\[CrossRef\]](#)
250. Park, J.; Kim, K.T.; Lee, W.H. Bilgi ve İletişim Teknolojisindeki (ICT) Son Gelişmeler ve Su Kalitesinin İzlenmesi için Sensör Teknolojisi. *Su* **2020**, *12*, 510. [\[CrossRef\]](#)
251. Kaginalkar, A.; Kumar, S.; Gargava, P.; Niyogi, D. Akıllı Şehir Hizmeti Olarak Hava Kalitesi Yönetiminde Kentsel Bilişimin İncelenmesi: Entegre IoT, Yapay Zeka ve Bulut Teknolojisi Perspektifi. *Kentsel İklim.* **2021**, *39*, 100972. [\[CrossRef\]](#)
252. Chui, K.T.; Lytras, M.D.; Visvizi, A. Akıllı Şehirlerde Enerji Sürdürülebilirliği: Yapay Zeka, Akıllı İzleme ve Enerji Tüketiminin Optimizasyonu. *Energies* **2018**, *11*, 2869. [\[CrossRef\]](#)
253. Kumar, D.; Shekhar, S.; Tewary, T. Toprak Kaynakları Yönetiminde Veri Analitiği ve Yapay Zeka. *Data Analytics and Artificial Intelligence for Earth Resource Management* içinde; Elsevier: Amsterdam, Hollanda, 2025; pp. 1-17.
254. Rane, N.; Choudhary, S.; Rane, J. Gelişmiş Atıksu Arıtma Sistemleri için Öncü Yapay Zeka (AI), Makine Öğrenimi (ML), Blockchain ve Nesnelerin İnterneti (IoT) Teknolojileri. *SSRN Electron. J.* **2023**. [\[CrossRef\]](#)
255. Amirian, H.; Dalvand, K.; Ghiasvand, A. Nesnelerin İnterneti, Minyatürleştirme ve Çevresel Kimyasalların Sorunsuz Entegrasyonu Gözetim. *Çevre. Monit. Değerlendirme.* **2024**, *196*, 582. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
256. Salman, O.; Elhajj, I.; Kayssi, A.; Chehab, A. Edge Computing Enabling the Internet of Things. *Proceedings of the 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Milano, İtalya, 14-16 Aralık 2015; IEEE: Piscataway, NJ, ABD, 2015; s. 603-608.
257. Hassan, N.; Gillani, S.; Ahmed, E.; Yaqoob, I.; Imran, M. The Role of Edge Computing in Internet of Things. *IEEE İletişim. Mag.* **2018**, *56*, 110-115. [\[CrossRef\]](#)

258. Kaur, S.; Kumar, R.; Singh, K.; Huang, Y.L. Geliştirilmiş Sürdürülebilir Enerji Yönetimi için Yapay Zekadan Yararlanma. *J. Sürdürülebilirlik. Enerji* **2024**, *3*, 1-20. [CrossRef]
259. Whig, P.; Remala, R.; Mudunuru, K.R.; Quraishi, S.J. Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi için Yapay Zeka ve Kuantum Teknolojilerinin Entegrasyonu. *Kuantum Hesaplama ve Tedarik Zinciri Yönetimi* içinde: *Yeni Bir Optimizasyon Çağı*; IGI Global: Hershey, PA, ABD, 2024; s. 267-283.
260. Bukhari, S.A.S.; Shafi, I.; Ahmad, J.; Butt, H.T.; Khurshaid, T.; Ashraf, I. Makine Öğrenimi ve IoT Entegrasyonunu Kullanarak Sel İzleme ve Önlemeyi Geliştirme. *Nat. Tehlikeler* **2024**. [CrossRef]
261. Indrakumari, R.; Sriramulu, S.; Partheeban, N.; Rajavel, R. FloodWatch: Hindistan'ın Tamilnadu Eyaletindeki Sele Eğilimli Cuddalore Bölgesi için IoT Güdümlü Bir Sel İzleme ve Erken Uyarı Sistemi Önerisi. *Digital Twin Technology and Applications* içinde; Auerbach Publications: Boca Raton, FL, ABD, 2024; s. 374-387.
262. Ukoba, K.; Olatunji, K.O.; Adeoye, E.; Jen, T.-C.; Madyira, D.M. Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Yapay Zeka ile Optimize Edilmesi: Bir İnceleme ve Gelecek Beklentileri. *Energy Environ.* **2024**, *35*, 3833-3879. [CrossRef]
263. Wen, X.; Shen, Q.; Zheng, W.; Zhang, H. Yapay Zeka Güdümlü Güneş Enerjisi Üretimi ve Akıllı Şebeke Entegrasyonu: Yenilenebilir Enerji Verimliliğini Artırmak için Bütünsel Bir Yaklaşım. *Int. J. Innov. Araştırma Müh. Manag.* **2024**, *11*, 55-66. [CrossRef]
264. Teh, H.Y.; Kempa-Liehr, A.W.; Wang, K.I.-K. Sensör Veri Kalitesi: Sistematik Bir İnceleme. *J. Büyük Veri* **2020**, *7*, 11. [CrossRef]
265. Concas, F.; Mineraud, J.; Lagerspetz, E.; Varjonen, S.; Liu, X.; Puolamäki, K.; Nurmi, P.; Tarkoma, S. Düşük Maliyetli Dış Hava Kalitesi İzleme ve Sensör Kalibrasyonu: Bir Anket ve Eleştirel Analiz. *ACM Trans. Sens. Netw.* **2021**, *17*, 1-44. [CrossRef]
266. Deekshith, A. Yapay Zeka için Veri Mühendisliği: Makine Öğrenimi Modelleri için Veri Kalitesini ve Erişilebilirliğini Optimize Etme. *Int. J. Manag. Eğitim Sürdürülebilirlik. Gelişim.* **2021**, *4*, 1-33.
267. Gade, K.R. Modern Kurumlar için Veri Kalitesi Ölçütleri: Bir Veri Analitiği Perspektifi. *MZ J. Artif. Intell.* **2024**, *1*.
268. Qazi, S.; Khawaja, B.A.; Farooq, Q.U. IoT Donanımlı ve Yapay Zeka Destekli Yeni Nesil Akıllı Tarım: Eleştirel Bir İnceleme, Mevcut Zorluklar ve Gelecek Eğilimler. *IEEE Erişim* **2022**, *10*, 21219-21235. [CrossRef]
269. Wang, X.; Li, X.; Leung, V.C.M. Gelişen Heterojen Ağ için Yapay Zeka Tabanlı Teknikler: Sanatın Durumu, Fırsatlar ve Zorluklar. *IEEE Access* **2015**, *3*, 1379-1391. [CrossRef]
270. Pankaj, D.A.B. Nesnelerin İnterneti ve Siber-Fiziksel Sistemler: Yapay Zeka ile Geliştirilmiş Birlikte Çalışabilirlik ve Verimlilik. *Int. IT J. Res.* **2024**, *2*, 53-63.
271. Dave, D.M.K.; Mittapally, B.K. IoT'de Veri Entegrasyonu ve Birlikte Çalışabilirlik: Zorluklar, Stratejiler ve Gelecek Yönü. *Int. J. Comput. Eng. Technol. (IJCET)* **2024**, *15*, 45-60.
272. Tawalbeh, L.; Muheidat, F.; Tawalbeh, M.; Quwaider, M. IoT Gizliliği ve Güvenliği: Zorluklar ve Çözümler. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 4102. [CrossRef]
273. Marengo, A. IoT'de Yapay Zekanın Geleceği: Akıllı Veri Analizi ve Gizliliğin Korunmasında Gelişen Trendler. 2023. Çevrimiçi olarak mevcuttur: https://www.researchgate.net/publication/377087354_The_Future_of_AI_in_IoT_Emerging_Trends_in_Intelligent_Data_Analysis_and_Privacy_Protection?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3Q1LCJwYVdlIjoicHVibGljYXRpb2 4ifX0 (27 Aralık 2024 tarihinde erişilmiştir).
274. Karale, A. IoT'nin Güvenlik, Etik, Gizlilik ve Yasalara Yönelik Zorlukları. *Internet Things* **2021**, *15*, 100420. [CrossRef]
275. C'olakovic', A.; Hadzialic', M. Nesnelerin İnterneti (IoT): Etkinleştirici Teknolojiler, Zorluklar ve Açık Araştırma Konuları Üzerine Bir İnceleme. *Bilgisayar. Netw.* **2018**, *144*, 17-39. [CrossRef]
276. Falola, P.B.; Adeniyi, A.E.; Madamidola, O.A.; Awotunde, J.B.; Olukiran, O.A.; Akinola, S.O. Tarımda Yapay Zeka: Etik Değerlendirmelerle Birlikte Verimlilik ve Sürdürülebilirlik Potansiyeli. *Exploring Ethical Dimensions of Environmental Sustainability and Use of AI* içinde; IGI Global Scientific Publishing: Hershey, PA, USA, 2024; s. 307-329, ISBN 979-8-3693-0892-9.
277. Akter, S. Sürdürülebilir İşletmeler için Etik YZ Geliştirme: Sorumlu YZ'nin IoT ve Kurumsal Sistemleri ile Entegrasyonuna İlişkin Bir İnceleme. *J. Artif. Intell. Gen. Sci. (JAIGS)* **2024**, *6*, 94-125. [CrossRef]
278. Perera, A.T.D.; Kamalaruban, P. Enerji Sistemlerinde Takviyeli Öğrenme Uygulamaları. *Yenileme. Sürdürmek. Energy Rev.* **2021**, *137*, 110618. [CrossRef]
279. Dang, T.; Liu, J. Takviyeli Öğrenmeye Dayalı Uyarlanabilir Su Ortamı Optimizasyon Stratejisi. *Bilgisayar Destekli Tasarım. Uygulama.* **2024**, *21*, 1-18. [CrossRef]
280. Fan, Z.; Yan, Z.; Wen, S. Sürdürülebilirlikte Derin Öğrenme ve Yapay Zeka: SKH'ler, Yenilenebilir Enerji ve Çevre Sağlığı Üzerine Bir İnceleme. *Sürdürülebilirlik* **2023**, *15*, 13493. [CrossRef]
281. Khanmohammadi, A.; Jalili Ghazizadeh, A.; Hashemi, P.; Afkhami, A.; Arduini, F.; Bagheri, H. Elektrokimyasal Biyosensörlere Genel Bir Bakış ve Çevresel Kirleticilerin Tespiti için Sensörler. *J. Iran. Chem. Soc.* **2020**, *17*, 2429-2447. [CrossRef]
282. Manzano, L.G.; Boukabache, H.; Danzeca, S.; Heracleous, N.; Murtas, F.; Perrin, D.; Pirc, V.; Alfaro, A.R.; Zimmaro, A.; Silari, M. Çevresel Radyasyon İzleme için Bir IoT LoRaWAN Ağı. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2021**, *70*, 1-12. [CrossRef]
283. Wang, L.; Yang, H. NB-IoT Teknolojisine Dayalı Akıllı Şehir Ortamı İzleme ve Optimizasyon Sistemi Tasarımı. *Int. J. Inf. İletişim Teknolojisi. Technol.* **2024**, *25*, 47-61. [CrossRef]

284. Niu, L. ZigBee ve NB-IoT Tabanlı Akıllı Tarımsal Çevresel Büyük Veri Toplama Sisteminin Tasarımı. İçinde 2023 IEEE 2. Uluslararası Elektrik Mühendisliği, Büyük Veri ve Algoritmalar Konferansı Bildirileri (EEBDA), Pekin, Çin, 25-27 Ağustos 2023; IEEE: Piscataway, NJ, ABD, 2023; s. 1299-1304.
285. Jabbar, W.A.; Subramaniam, T.; Ong, A.E.; Shu'lb, M.I.; Wu, W.; De Oliveira, M.A. LoRaWAN Tabanlı IoT Sistemi Uygulaması for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring. *Internet Things* **2022**, *19*, 100540. [CrossRef]
286. Phupattanasilp, P.; Tong, S.-R. Bütünleştirici Nesnelerin İnternetinde Artırılmış Gerçeklik (AR-IoT): Hassas Tarım için Uygulama. *Sürdürülebilirlik* **2019**, *11*, 2658. [CrossRef]
287. Filipova, M.; Gospodinov, G.; Gotsev, L.; Kovatcheva, E.; Jekov, B. Küresel Isınma ve Kirliliği Ele Almak için Kuantum Hesaplama Uygulamaları: Kapsamlı Bir Analiz. İçinde 15. Uluslararası Bilimsel ve Uygulamalı Konferans Bildirileri "Çevre. Teknoloji. Resources", Rezekne, Letonya, 19-20 Haziran 2024; Cilt 1, s. 154-160.
288. Vanderbilt, K.L.; Lin, C.-C.; Lu, S.-S.; Kassim, A.R.; He, H.; Guo, X.; Gil, I.S.; Blankman, D.; Porter, J.H. Ekolojik Verilerin Teşvik Edilmesi Paylaşımı: Uluslararası Uzun Vadeli Ekolojik Araştırma Ağındaki İşbirlikleri. *Ekosfer* **2015**, *6*, 1-18. [CrossRef]
289. Fascista, A. WSN/UAV/Crowdsensing Kullanarak Entegre Büyük Ölçekli Çevresel İzlemeye Doğru: Uygulamalar, Sinyal İşleme ve Gelecek Perspektifleri Üzerine Bir İnceleme. *Sensörler* **2022**, *22*, 1824. [CrossRef] [PubMed]
290. Okafor, N. Çevresel İzleme Sistemlerinde IoT Sensörleri Veri İşleme ve İşleme Alanındaki Gelişmeler ve Zorluklar. 2023. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://www.techrxiv.org/users/679289/articles/682738-advances-and-challenges-in-iot-sensors-data-handling-and-processing-in-environmental-monitoring-systems> (27 Aralık 2024 tarihinde erişilmiştir).
291. Gouveia, C.; Fonseca, A.; Câmara, A.; Ferreira, F. İlgili Vatandaşlar Tarafından Toplanan Çevresel Verilerin Kullanımının Teşvik Edilmesi Bilgi ve İletişim Teknolojileri aracılığıyla. *J. Environ. Manag.* **2004**, *71*, 135-154. [CrossRef] [PubMed]
292. Conrad, C.C.; Hilchey, K.G. Vatandaş Bilimi ve Toplum Temelli Çevresel İzleme Üzerine Bir İnceleme: Sorunlar ve Fırsatlar. *Environ. Monit. Assess.* **2011**, *176*, 273-291. [CrossRef]
293. Berigüete, F.E.; Santos, J.S.; Rodriguez Cantalapiedra, I. Dijital Devrim: Kent ve Çevre Yönetiminde Vatandaş Katılımını Artırmak için Gelişen Teknolojiler. *Arazi* **2024**, *13*, 1921. [CrossRef]
294. Cao, F.; Jian, Y. Üniversite Öğrencileri Arasında Çevre Bilincinin Geliştirilmesinde ve Aktivizmin Artırılmasında Yapay Zeka ve Sanal Gerçekliğin Entegre Edilmesinin Rolü. *Sci. Total Environ.* **2024**, *908*, 168200. [CrossRef]
295. Asuquo, A.; Agbor, C.; Bassey, A.; Omoogun, M. Sürdürülebilir Eğitim Kurumları için Yapay Zeka (AI) Yenilikleri: Verimliliği ve Çevresel Sorumluluğu Artırmak. *Int. J. Innov. Technol. Integr. Educ.* **2024**, *7*, 84-101.
296. Ho, K.T.M.; Chen, K.-C.; Lee, L.; Burt, F.; Yu, S.; Lee, P.-H. İklim Direnci ve Sürdürülebilirlik için Kuantum Hesaplama Zorluklar. 2024. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://arxiv.org/abs/2407.16296> (28 Aralık 2024 tarihinde erişilmiştir).
297. Arabelli, R.; Boddepalli, E.; Buradkar, M.; Goriparti, N.V.S.; Chakravarthi, M.K. Yapay Zeka Kullanarak IoT Destekli Çevresel İzleme Sistemi. Proceedings of the 2024 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI), Chennai, India, 9-10 May 2024; pp. 1-6. [CrossRef]
298. Arowolo, M.E.; Aaron, W.C.; Eteng, U.S.; Divine, I.L.O.H.; Aguma, C.P.; Olagunju, A.O. Hassas Çevresel İzleme ve Öngörücü Ekosistem Yönetimi için Yapay Zeka ile Geliştirilmiş Uzaktan Algılama Teknolojilerinin IoT Ağları ile Entegrasyonu. *World J. Adv. Res. Rev.* **2024**, *23*, 2156-2166. [CrossRef]
299. Manongga, D.; Rahardja, U.; Sembiring, I.; Aini, Q.; Wahab, A. Çevreye Duyarlı Kalkınma için Yapay Zeka Kullanarak Hava Kalitesi İzleme Çerçevesinin Geliştirilmesi. *HighTech Innov. J.* **2024**, *5*, 794-813. [CrossRef]

Sorumluluk Reddi/Yayıncının Notu: Tüm yayınlarda yer alan ifadeler, görüşler ve veriler yalnızca yazar(lar)a ve katkıda bulunan(lar)a aittir, MDPI ve/veya editör(ler)e ait değildir. MDPI ve/veya editör(ler), içerikte atıfta bulunulan herhangi bir fikir, yöntem, talimat veya üründen kaynaklanan insanlara veya mallara gelebilecek herhangi bir zarar için sorumluluk kabul etmez.