

Çevresel izlemede yapay zeka: derinlemesine analiz

Emran Alotaibi^{1,2,3}, Nadia Nassif²

Alındı: 4 Ağustos 2024 / Kabul edildi: 7 Kasım 2024

Published online: 18 November 2024

© Yazar(lar) 2024

AÇIK

Özet

Bu çalışma, 1991'den 2024'e kadar 4762 yayına dayanarak çevresel izlemede yapay zeka (AI) ve makine öğrenimi (ML) uygulamalarının kapsamlı bir bibliyometrik ve derinlemesine analizini sunmaktadır. Araştırma, 2010 yılından bu yana yayınlarda ve atıflarda kayda değer bir artış olduğunu ve Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Hindistan'ın önde gelen katkı sağlayıcılar olarak ortaya çıktığını vurgulamaktadır. Temel araştırma alanları arasında hava ve su kalitesinin izlenmesi, iklim değişikliği modellemesi, biyoçeşitlilik değerlendirmesi ve afet yönetimi yer almaktadır. Yapay zekanın Nesnelerin İnterneti (IoT) ve uzaktan algılama gibi gelişmekte olan teknolojilerle entegrasyonu, gerçek zamanlı çevresel izleme yeteneklerini ve veriye dayalı karar verme süreçlerini önemli ölçüde genişletmiştir. Derinlemesine analiz, toprak haritalama, arazi örtüsü sınıflandırması, sel duyarlılığı modellemesi ve uzaktan algılama görüntü analizi için yeni algoritmalar da dahil olmak üzere AI/ML metodolojilerindeki gelişmeleri ortaya koymaktadır. Kayda değer uygulamalar arasında gelişmiş hava kalitesi tahminleri, su kalitesi değerlendirmeleri, iklim etkisi tahmini ve yapay zeka güdümlü görüntü tanıma kullanarak otomatik yaban hayatı izleme yer almaktadır. YZ modellerinin "kara kutu" doğası, kaynakların kısıtlı olduğu bölgelerde yüksek kaliteli veri ihtiyacı ve gerçek zamanlı afet yönetiminin karmaşıklığı gibi zorluklar da ele alınmaktadır. Çalışma, kritik çevresel uygulamalarda model şeffaflığını ve güveni artırmayı amaçlayan açıklanabilir YZ (XAI) modelleri geliştirmeye yönelik devam eden çabaları vurgulamaktadır. Gelecekteki araştırma yönergeleri, veri kalitesini ve kullanılabilirliğini iyileştirmeyi, çevre ve bilgisayar bilimlerinde disiplinler arası işbirliklerini teşvik etmeyi ve YZ odaklı çevre yönetiminde etik hususları ele almayı vurgulamaktadır. Bu bulgular, sürdürülebilir çevre yönetimi için YZ ve makine öğrenimi teknolojilerinin dönüştürücü potansiyelinin altını çizmekte ve küresel çevre sorunlarının ele alınmasında araştırmacılar ve politika yapıcılar için değerli içgörüler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler Derin öğrenme modelleri - Büyük veri analitiği - IoT destekli izleme - Açıklanabilir yapay zeka - Uzaktan algılama teknolojileri - Sürdürülebilir ekosistem yönetimi

1 Giriş

1.1 Arka plan ve gerekçe

Son yıllarda, yapay zeka (AI) ve makine öğreniminin (ML) çevre bilimleri ile birleşmesi, çevresel izleme ve veri analizinde önemli ilerlemelere yol açmıştır. Bu teknolojiler, daha doğru tahminler, gerçek zamanlı izleme ve geleneksel yöntemlerin verimli bir şekilde yönetemediği geniş veri kümelerini analiz etme yeteneği sağlayarak karmaşık çevresel zorlukları ele almak için güçlü araçlar sunmaktadır.

✉ Emran Alotaibi, emran.alotaibi@ku.ac.ae; Nadia Nassif, u19200817@sharjah.ac.ae | ¹İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Khalifa Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Abu Dhabi, Birleşik Arap Emirlikleri. ²İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü Mühendislik, Sharjah Üniversitesi, P.O. Box 27272, Sharjah, Birleşik Arap Emirlikleri. ³Sürdürülebilir Sivil Altyapı Grubu, Bilim ve Mühendislik Araştırma Enstitüsü, Sharjah Üniversitesi, P.O. Box 27272, Sharjah, Birleşik Arap Emirlikleri.



İklim değişikliği, ormansızlaşma, okyanus kirliliği ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi çevresel zorluklar, küresel ekosistemler ve insan sağlığı için önemli tehditleri temsil etmektedir. Örneğin, YZ ve makine öğrenimi, küresel sıcaklıklardaki artış, aşırı hava olaylarının sıklığındaki artış ve kıyı nüfusunu ve ekosistemleri tehdit eden deniz seviyesindeki yükselme gibi iklim değişikliği etkilerini modellemek için kullanılmıştır ([50]). Biyoçeşitlilik kaybının ve karbon emisyonlarının önemli bir itici gücü olan ormansızlaşma da uydu görüntülerini analiz eden ve yasadışı ağaç kesme faaliyetlerini gerçek zamanlı olarak tespit eden yapay zeka modelleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde izlenmiştir [54]. Özellikle plastik atıklardan kaynaklanan okyanus kirliliği, deniz ekosistemleri için ciddi riskler oluşturmaktadır ve YZ güdümlü teknolojiler, kıyı sularındaki ve açık denizdeki kirliliği tespit etmek ve izlemek, kirlilik modellerini ve kaynaklarını daha etkili bir şekilde tanımlamak için kullanılmıştır [33]. Bu çevresel zorluklar, yenilikçi çözümlere olan acil ihtiyacı vurgulamaktadır ve YZ/ML teknikleri otomatik, verimli ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır. Örneğin, YZ modelleri uydu görüntüleri, sensör ağları ve geçmiş veri kümeleri gibi kaynaklardan gelen büyük hacimli verileri işleyerek daha önce ulaşılamayan içgörüler sunabilmektedir. Ayrıca, biyoçeşitlilik kaybı, otomatik tür tanımlama ve ekosistem izlemede YZ uygulamaları aracılığıyla ele alınmakta ve koruma çabaları için önemli veriler sağlamaktadır [30, 44].

Bu çalışmanın gerekçesi, bu karmaşık çevresel zorlukların ele alınmasında yapay zeka ve makine öğreniminin dönüştürücü potansiyelini gösteren artan literatürden kaynaklanmaktadır. Örneğin, makine öğrenimi algoritmaları hava kirliliği seviyelerini tahmin etmek, arazi kullanımındaki değişiklikleri belirlemek ve iklim değişikliği etkilerini yüksek hassasiyetle modellemek için kullanılmıştır. Benzer şekilde, YZ güdümlü araçlar, zamanında ve eyleme geçirilebilir bilgiler sağlayarak petrol sızıntıları ve orman yangınları gibi çevresel tehlikelerin tespitini ve yönetimini geliştirmiştir [24, 55].

Bu alandaki hızlı ilerlemeler ve artan araştırma hacmi göz önüne alındığında, eğilimleri, boşlukları ve gelecekteki yönelimleri belirlemek için mevcut literatürü sistematik olarak analiz etmek çok önemlidir. Akademik literatürün nicel değerlendirmesini içeren bibliyometrik analiz, bu amaca ulaşmak için sağlam bir metodoloji sağlar. Yayın kalıplarını, atıf ağlarını ve anahtar kelime eğilimlerini inceleyerek, araştırma ortamı ve farklı araştırmacıların, kurumların ve ülkelerin katkıları hakkında kapsamlı bir anlayış kazanabiliriz.

1.2 Çalışmanın Hedefleri

Bu çalışmanın temel amacı, çevresel izleme ve veri analizinde yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri üzerine yapılan araştırmaların bibliyometrik bir analizini yapmaktır. Bu, birkaç özel amacı içermektedir:

1. Çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi ile ilgili araştırma makalelerinin yayınlanmasındaki ana eğilimleri belirlemek ve analiz etmek. Bu, zaman içinde yayın sayısındaki büyümenin ve araştırmacının farklı dergiler ve disiplinler arasındaki dağılımının incelenmesini içerir.
2. Araştırma çıktılarının coğrafi dağılımını değerlendirmek, bu alana katkıda bulunan önde gelen ülkeleri ve bölgeleri belirlemek.
3. Araştırma ortaklıkları modellerinin dinamiklerini anlamak için işbirliği ağlarını haritalamak.
4. Literatürde en sık kullanılan terimleri ve yeni ortaya çıkan konuları belirlemek için bir anahtar kelime analizi yapmak. Bu, odak alanlarının ve araştırma temalarının zaman içindeki gelişiminin anlaşılmasına yardımcı olacaktır.
5. Yüksek atıf alan makaleleri ve etkili araştırmacıları belirlemek için bir atıf analizi yapmak. Bu, bilim camiasındaki çeşitli çalışmaların etkisi ve tanınırlığı hakkında fikir verecektir. Ayrıca H-endeksi değerlendirmesi ve bunun alandaki yayınlarla ilişkisi.
6. Çevresel izlemede gelecekteki araştırma ve uygulamalar için bulguların sonuçlarını tartışmak. Bu, araştırma boşluklarının belirlenmesini ve daha fazla araştırma için potansiyel alanların önerilmesini içerir.

2 Arka plan

2.1 Makine öğrenimi ve yapay zekaya genel bakış

Makine öğrenimi ve yapay zeka, çevresel izleme ve veri analizi de dahil olmak üzere çeşitli sektörleri dönüştüren ve hızla gelişen alanlardır. YZ, görsel algı, konuşma tanıma, karar verme ve dil gibi tipik olarak insan zekası gerektiren görevleri yerine getirebilen sistemlerin oluşturulmasını kapsayan geniş bir disiplindir.

çeviri. Yapay zekanın bir alt kümesi olan makine öğrenimi, bilgisayarların verilerden öğrenmesini ve verilere dayalı tahminler veya kararlar almasını sağlayan algoritmalar geliştirmeye odaklanmaktadır [13, 59, 60].

Çevresel izleme bağlamında, makine öğrenimi algoritmaları genel olarak denetimli, denetimsiz ve takviyeli öğrenme olarak kategorize edilebilir. Denetimli öğrenme, etiketli bir veri kümesi üzerinde bir modelin eğitilmesini içerir; bu, her eğitim örneğinin bir çıktı etiketi ile eşleştirildiği anlamına gelir. Bu yaklaşım özellikle hava kalitesi seviyelerinin tahmin edilmesi veya uydu görüntülerindeki bitki örtüsü türlerinin sınıflandırılması gibi görevler için kullanışlıdır. Denetimli öğrenmedeki yaygın algoritmalar arasında karar ağaçları, destek vektör makineleri (SVM) ve sinir ağları bulunur [36, 57, 58].

Öte yandan denetimsiz öğrenme, etiketi olmayan verilerle ilgilenir. Amaç, bir dizi veri noktası içinde mevcut olan doğal yapıyı çıkarmaktır. Bu, benzer kirlilik kaynaklarını kümelemek veya çevresel verilerdeki anormallikleri tespit etmek için yararlı olabilir. K-ortalamar kümelemesi ve temel bileşen analizi (PCA) gibi algoritmalar, denetimsiz öğrenme tekniklerinin tipik örnekleridir [16].

Takviyeli öğrenme, bir ajanın belirli eylemleri gerçekleştirerek ve ödülleri veya cezaları alarak karar vermeyi öğrendiği bir makine öğrenimi türüdür. Bu yaklaşım, emisyonları azaltmak veya doğal kaynakları sürdürülebilir bir şekilde yönetmek için politikalar geliştirmek gibi çevresel yönetim stratejilerini optimize etmek için uygulanabilir [40].

YZ teknikleri arasında, çok katmanlı sinir ağları (derin sinir ağları) ile karakterize edilen makine öğreniminin bir alt kümesi olan derin öğrenme de bulunmaktadır. Bu teknikler, büyük veri kümelerini ve karmaşık örüntüleri ele almada özellikle güçlüdür, bu da onları uydu görüntülerinde görüntü tanıma veya iklim verilerinde zaman serisi tahmini [22] ve çevresel uzaktan algılama [48] gibi görevler için uygun hale getirir.

2.2 Çevresel izleme ve veri analizindeki uygulamalar

Çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamaları önemli bir büyüme ve çeşitlenme göstermiştir. Bu teknolojiler, kritik çevresel sorunları ele almak için çeşitli alanlarda kullanılmış ve çok yönlülüklerini ve etkinliklerini göstermiştir.

2.2.1 Hava kalitesi izleme

Hava kalitesi seviyelerini tahmin etmek ve izlemek için yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri kullanılmaktadır. Örneğin, makine öğrenimi modelleri, gelecekteki kirlilik seviyelerini tahmin etmek için geçmiş hava kirliliği verilerini ve meteorolojik değişkenleri analiz edebilir. Bu bilgi, halk sağlığı planlaması ve politika oluşturma için çok önemlidir. Çalışmalar, sinir ağlarının ve topluluk öğrenme yöntemlerinin hava kalitesi tahminlerinde yüksek doğruluk elde edebileceğini göstermiştir [14, 45].

2.2.2 Su kalitesinin izlenmesi

Yapay zekaya dayalı modeller pH, çözünmüş oksijen ve kirlenici seviyeleri gibi su kalitesi parametrelerini değerlendirmek ve tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu modeller, sensör ağlarından ve uzaktan algılama teknolojilerinden gelen verileri işleyerek su kaynaklarının yönetimi ve daha temiz su sağlanması için gerekli olan gerçek zamanlı değerlendirmeler sağlayabilir [1, 8, 23, 27, 33].

2.2.3 İklim değişikliği modellemesi

Makine öğrenimi algoritmaları, büyük ölçekli çevresel verilere dayanarak iklim modellerini simüle etmek ve tahmin etmek için kullanıldıkları iklim modellemesinde etkilidir. Bu modeller, iklim değişikliğinin etkilerinin anlaşılmasına ve azaltım ve adaptasyon stratejilerinin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır [34].

2.2.4 Biyoçeşitlilik ve ekosistem izleme

Yapay zeka teknikleri, özellikle görüntü tanıma ve işlemeyi içerenler, biyolojik çeşitliliği izlemek ve ekosistemlerin sağlığını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Örneğin, derin öğrenme kullanan otomatik sistemler, kamera tuzağı görüntülerinden türleri tanımlayabilir ve sınıflandırabilir, yaban hayatı popülasyonlarını ve zaman içindeki biyolojik çeşitlilik değişikliklerini izlemeye yardımcı olabilir [30, 44].

2.2.5 Afet yönetimi

Yapay zeka ve makine öğrenimi afet yönetimi ve müdahalesinde çok önemlidir. Tahmine dayalı modeller, seller, kasırgalar ve orman yangınları gibi doğal afetleri tahmin ederek zamanında müdahalelere ve kaynak tahsisine olanak sağlayabilir. Ayrıca YZ, afetlerin etkisini değerlendirmek ve müdahale çabalarını koordine etmek için sosyal medya verilerinin analiz edilmesine yardımcı olabilir [24].

2.3 Önceki bibliyometrik çalışmalar

Bibliyometrik çalışmalar, yayın kalıplarını, atıf ağlarını ve diğer ölçütleri analiz ederek araştırma alanlarının gelişimi ve etkisi hakkında değerli bilgiler sağlar. Çeşitli alanlardaki yapay zeka ve makine öğrenimi araştırmalarının manzarasını keşfetmek için çeşitli bibliyometrik analizler yapılmıştır, ancak daha az sayıda çalışma özellikle çevresel izlemedeki uygulamalarına odaklanmıştır.

Kayda değer bir çalışma, YZ araştırmalarındaki küresel eğilimleri analiz ederek yayınlardaki üstel büyümeyi ve uygulama alanlarının artan çeşitliliğini vurgulamıştır [5]. Bir başka çalışma, iklim değişikliği araştırmalarının bibliyometrik analizine odaklanarak ana temaları, etkili yazarları ve önemli araştırma işbirliklerini belirlemiştir [17]. Bu çalışmalar, bibliyometrik analizlerin araştırma dinamiklerini anlamadaki ve gelecekteki araştırmalara rehberlik etmedeki değerini vurgulamıştır.

Çevresel izleme bağlamında, birkaç bibliyometrik çalışma belirli alt alanları araştırmıştır. Örneğin, çevresel izlemede uzaktan algılama uygulamalarının bibliyometrik incelemeleri, önde gelen ülkeleri, kurumları ve temel araştırma alanlarını vurgulamıştır [46, 52]. Diğer çalışmalar, yapay zekanın su kaynakları yönetimi [20], çevre kirliliği [25] ve uzaktan algılamada değişiklik tespitinde [38] kullanımını incelemiş ve araştırma eğilimlerini belirlemiştir.

ve gelecek beklentileri.

Bununla birlikte, çevresel izlemenin daha geniş spektrumunda yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarını entegre eden kapsamlı bir bibliyometrik analiz hala eksiktir. Bu boşluk, araştırmanın mevcut durumunu sistematik olarak değerlendirmek, ortaya çıkan eğilimleri belirlemek ve gelecekteki keşifler için alanları vurgulamak için bir fırsat sunmaktadır.

3 Metodoloji

3.1 Veri kaynağı ve arama stratejisi

Bu bibliyometrik analiz için Scopus, çevre bilimi, bilgisayar bilimi ve mühendislik dahil olmak üzere çeşitli disiplinlerdeki hakemli literatürü kapsamlı bir şekilde kapsamaya nedeniyle birincil veri kaynağı olarak seçilmiştir. Scopus, çok çeşitli dergileri, konferans bildirilerini ve diğer bilimsel materyalleri indeksleyen kapsamlı veritabanıyla ünlüdür ve bu da onu ayrıntılı bir bibliyometrik çalışma için ideal hale getirmektedir [4].

Literatürün kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlamak için, hem yapay zeka/makine öğrenmesi hem de çevresel izleme/veri analizi alanlarındaki makaleleri yakalamak üzere tasarlanmış bir arama sorgusu kullandık. Sorgu, başlık, özet veya anahtar kelimelerde her iki konunun birlikte görünmesini gerektirmeden, yapay zeka, makine öğrenimi veya ilgili terimlerin yanı sıra çevresel izleme veya veri analizine odaklanan makaleleri de içerecek şekilde oluşturulmuştur. Kullanılan arama sorgusu şöyledir:

(TITLE-ABS-KEY("machine learning" OR "artificial intelligence" OR "AI" OR "ML") AND TITLE-ABS-KEY("environmental monitoring" OR "environmental data analysis" OR "environmental data" OR "ecological monitoring" OR "environmental assessment")).

Basit bir ifadeyle, bu sorgu, YZ veya makine öğreniminin herhangi bir yönünü tartışan makalelerin yanı sıra, iki alan birlikte belirtilmemiş olsa bile çevresel izleme ile ilgili makaleleri bulmak için yapılandırılmıştır. Bu, aramanın aşırı kısıtlayıcı olmamasını ve ilgili araştırmaların geniş bir şekilde ele alınmasını sağlamıştır.

Bu çalışmada "AI" ve "ML" nin özellikle yapay zeka ve makine öğrenimine atıfta bulunduğundan emin olmak için, bu terimlerin çevresel izleme ve ilgili yönlerle ilgili hesaplama teknikleri bağlamında kullanıldığını doğrulamak amacıyla ulaşılan tüm makalelerin başlıkları ve özetleri üzerinde kapsamlı bir manuel inceleme gerçekleştirilmiş ve ilgisiz alanlara atıfta bulundukları durumlar hariç tutulmuştur.

3.2 Bibliyometride dahil etme ve hariç tutma kriterleri

Arama, arama tarihine kadar olan tüm yılları kapsayacak şekilde 2024 yılının Ağustos ayında gerçekleştirilmiştir. Seçilen çalışmaların uygunluğunu ve niteliğini sağlamak için belirli dahil etme ve hariç tutma kriterleri belirlenmiştir. İzlenen dâhil etme kriterleri aşağıda listelenmiştir:

1. Makaleler, çevresel izleme ve ilgili konularda yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerinin uygulanmasına açıkça odaklanmalıdır.
2. Bulguların güvenilirliğini ve bilimsel etkisini sağlamak için yalnızca hakemli dergi makaleleri, derleme makaleleri ve konferans bildirileri dahil edilmiştir [56].
3. Yayınlar İngilizce dilinde yazılmalıdır.
4. Bu aşamaya kadar çalışmalar başlık, özet ve anahtar kelimeler üzerinden değerlendirilmiştir. Tam metin incelemesi derinlemesine analiz bölümünde yapılacaktır. 3.4.

Dışlama kriterleri ise şöyledir:

1. Tamamen tıbbi uygulamalar veya finansal tahminler gibi çevresel izleme dışındaki yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarına odaklanan çalışmalar hariç tutulmuştur.
2. Başyazılar, görüş yazıları, kitap bölümleri ve gri literatür dikkate alınmamıştır.
3. Mükerrer kayıtlar tespit edilmiş ve gereksizliği önlemek için kaldırılmıştır.

3.3 Veri çıkarma ve analiz yöntemleri

İlgili yayınların belirlenmesinin ardından, her çalışmadan temel bilgileri toplamak için yapılandırılmış bir veri çıkarma süreci uygulanmıştır. Çıkarılan veriler şunları içermektedir:

1. Başlık, yazarlar, yayın yılı, dergi adı, cilt ve sayı.
2. Her bir çalışmanın odağını ve kapsamını anlamak için özetler ve anahtar kelimeler kullanılmıştır.
3. Her bir makalenin bilim camiasındaki etkisinin bir göstergesi olarak aldığı atıf sayısı.
4. Araştırma katkılarının coğrafi dağılımını haritalamak için yazar bağlantıları ve ülkeler.

Veri çıkarma işlemi Scopus'ta bulunan bibliyometrik araçlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve doğruluk ve eksiksizliği sağlamak için manuel doğrulama ile tamamlanmıştır. Çıkarılan veriler daha sonra Bibliometrix [2] ve VOSviewer [43] gibi bir bibliyometrik analiz açık kaynak yazılımına aktarılmıştır.

3.3.1 Analiz yöntemleri

1. Zaman içindeki eğilimleri belirlemek için yayın sayısındaki yıllık artışın analizi.
2. İşbirliği ağlarının tanımlanması. Araştırma işbirliklerinin yapısını anlamak için ortak yazarlık ağları görselleştirilmiştir.
3. Küresel araştırma katkılarını vurgulamak için araştırma çıktılarının ülke ve bölgelere göre haritalanması.
4. Ana araştırma temalarını ve yeni ortaya çıkan konuları belirlemek için en sık kullanılan anahtar kelimelerin ve bunların birlikte ortaya çıkma modellerinin incelenmesi.

3.4 Derinlemesine analiz yöntemleri

Bibliyometrik analiz ve ilgili literatürün ilk toplanmasının ardından, bu bölüm seçilen çalışmaların ayrıntılı bir incelemesine geçmektedir. Derinlemesine analiz, çevresel izleme için yapay zeka ve makine öğrenimi (ML) uygulamasındaki önemli gelişmelere, metodolojilere ve bulgulara odaklanmaktadır. Son yıllarda ortaya çıkan belirli katkıları ve eğilimleri belirlemeyi ve yayın metriklerinin ötesine geçen içgörüler sunmayı amaçlamaktadır. Bu bölüm, bireysel çalışmaları yakından inceleyerek, YZ ve makine öğreniminin çevresel veri analizi ve izleme uygulamalarını nasıl dönüştürdüğüne dair daha teknik ve bağlamsal bir anlayış sağlamaktadır.

3.4.1 Literatür seçimi için kriterler

Bu derinlemesine inceleme için literatür seçme süreci, en alakalı, en yeni ve etkili çalışmaların dahil edilmesini sağlamak için sistematik bir yaklaşıma dayanıyordu. Yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerinin çevresel izlemeye uygulanmasında önemli gelişmelerin yanı sıra hava ve su kalitesi, iklim değişikliği, biyolojik çeşitliliğin izlenmesi ve afet yönetimi gibi çeşitli çevresel konuları temsil eden makalelere odaklanılmıştır. Bildiriler aşağıdaki kriterlere göre seçilmiştir:

1. Çalışma, çevresel izleme bağlamlarında yapay zeka veya makine öğrenimi tekniklerini açıkça uygulamalıdır. Bu, çevresel zorluklara göre uyarlanmış tahmin modelleri, veri analizi yöntemleri ve karar destek sistemlerini içerir.
2. En son trendleri ve teknolojik gelişmeleri yansıtmak için 2020'den sonra yayınlanan makaleler tercih edilmiştir. Daha eski makaleler yalnızca bu alandaki temel çalışmaları temsil ediyorsa dahil edilmiştir. Bu yaklaşım, hakemlerin daha yeni araştırmaların ve alandaki en son gelişmelerle uyumlu makalelerin dahil edilmesi gerektiğine ilişkin yorumuyla şekillenmiştir.
3. Metodolojik ilerlemeler genellikle hem akademik araştırmalar hem de pratik uygulamalar için geniş kapsamlı etkilere sahip olduğundan, yeni metodolojiler sunan veya mevcut teknikler üzerinde önemli gelişmeler gösteren makalelere öncelik verildi.
4. Seçilen makalelerin çok çeşitli çevresel alanları kapsamı sağlanmıştır. Buna hava ve su kalitesi gibi geleneksel alanların yanı sıra biyoçeşitliliğin izlenmesi, afet yönetimi ve çevre biliminde büyük verinin kullanımı gibi yeni gelişen alanlar da dahildir.
5. Araştırmanın etkisine ek olarak, makalelerin, özellikle bulgularının gerçek dünyadaki çevresel izleme sistemlerinde nasıl uygulanabileceği veya politika oluşturmayı nasıl etkileyebileceği gibi pratik ilgiyi göstermesi gerekiyordu. Çalışmalar, çevre yönetimi için karar-destek sistemlerindeki uygulamaları vurguladıkları veya acil çevresel zorlukların çözümüne katkıda bulundukları takdirde dahil edilmiştir.

3.4.2 Literatür seçim süreci

Bu makaleleri seçme süreci üç ana aşamadan oluşmuştur: tarama, ardından tam metin incelemeleri ve son olarak kategorizasyon:

1. Tarama: 4762 makale toplandıktan sonra, dahil edilme kriterlerini karşılamayan makaleleri çıkarmak için başlıklara ve özetlere dayalı bir ilk tarama yapılmıştır.
2. Tam metin incelemesi: Ardından, kalan makalelerin metodolojilerine, alana katkılarına ve çevresel izleme ile ilgisine odaklanan tam metin incelemesi. Bu aşamada ayrıca çalışmaların sağlamlığı, veri kümesi boyutları, kullanılan yapay zeka teknikleri ve bulgularının gerçek dünya uygulamalarına ölçeklenebilirliği de değerlendirilmiştir.
3. Kategorizasyon: Son olarak, makaleler belirli çevresel konulara ve AI/ML metodolojilerine katkılarına göre kategorize edilmiştir. Bu organizasyon, ortaya çıkan eğilimlerin belirlenmesine ve incelemenin anlamlı ve anlayışlı bir anlatım sağlamasına yardımcı olmuştur.

Dolayısıyla, bu bölümde yer alan makaleler hem temel hem de en yeni araştırmaları temsil etmektedir ve toplu olarak çevresel izlemede AI/ML uygulamalarının mevcut durumuna kapsamlı bir genel bakış sağlamaktadır.

Şekil 1 Çevresel izleme ve veri analizinde yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarında genel yayın eğilimleri (1991-2024)



4 Sonuçlar

4.1 Genel yayın eğilimleri

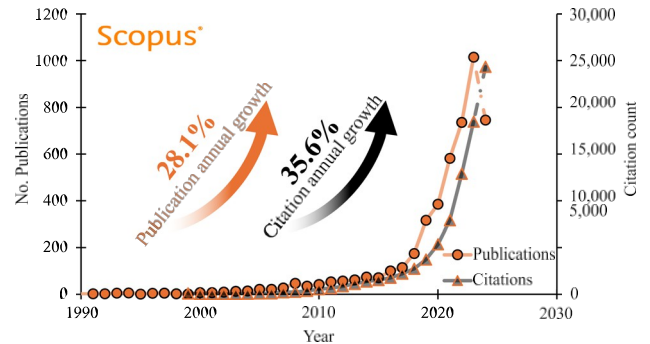
1991'den 2024'e kadar olan genel yayın eğilimleri Şekil 1'de özetlenmiştir. Analiz, 1.580 farklı kaynaktan elde edilen toplam 4762 dokümanı içermektedir. Bu dokümanlar 16.844 araştırmacı tarafından kaleme alınmış olup, ortalama Belge başına 5,08 ortak yazar. Bu yüksek işbirliği düzeyi, belgelerin %30,24'ünün uluslararası ortak yazarlara sahip olmasıyla daha da vurgulanmaktadır. Bu belgelerde atıfta bulunulan eser sayısı 233.528'dir ve bu da kapsamlı literatür katılımını ve kapsamlı araştırma metodolojilerini göstermektedir. Ortalama olarak, her bir belgeye 21,51 kez atıfta bulunulmuştur; bu da bu alandaki araştırmanın etkili niteliğini yansıtmaktadır. Belgelerin ortalama yaşı 3,92 yıl olup, çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarına nispeten yeni ve devam eden bir odaklanma olduğunu göstermektedir.

4.1.1 Yıllık yayın ve atıf artışı

Şekil 2, 1990'dan 2024'e kadar çevresel izlemede YZ ve makine öğrenimi uygulamalarıyla ilgili yayın ve atıf sayısındaki yıllık büyümeyi göstermektedir. Scopus'tan elde edilen veriler, son yirmi yılda hem yayınlarda hem de atıflarda önemli bir artış olduğunu ortaya koymaktadır [50].

Yayın artış oranı yıllık %28,1 ile bu araştırma alanında artan bir ilgi ve çıktıya işaret etmektedir. Bu eğilim 2010 yılı civarında önemli ölçüde hızlanmaya başlamış ve 2020'lere kadar keskin bir şekilde artmaya devam etmiştir. Benzer şekilde, atıf sayısı da yıllık %35,6 oranında artarak bu çalışmaların bilim camiasındaki artan etkisini ve tanınırlığını yansıtmaktadır. Özellikle 2015'ten itibaren dikkat çeken atıflardaki hızlı artış, bu alanda üretilen araştırmaların oldukça değerli olduğunu ve sıklıkla referans alındığını göstermektedir.

Şekil 2 Yapay zeka ve makine öğrenimi için yayın ve atıf sayısındaki yıllık artış Scopus verilerine dayalı olarak çevresel izleme ve veri analizi uygulamaları (1990-2024)



Son yirmi yılda hem yayınlarda hem de atıflarda görülen önemli artış, yapay zeka ve makine öğrenimi teknolojilerinin çevresel zorlukların ele alınmasında kritik araçlar olarak giderek daha fazla kabul gördüğünü yansıtmaktadır. Bu eğilim, bilim camiasının karmaşık, büyük ölçekli çevre sorunlarını çözmek için bu gelişmiş hesaplama yöntemlerinden yararlanmaya daha fazla odaklandığına işaret etmektedir. Ayrıca, 2010 yılından bu yana ve özellikle son on yılda yayınlardaki keskin artış, YZ/ML'nin çevresel izlemeye entegrasyonunun hızla ivme kazandığını göstermektedir. Bu büyüme, küresel olarak karşılaşılan acil çevre sorunlarına ayak uydurmak için YZ/ML uygulamaları ve metodolojilerinde sürekli gelişim ihtiyacını vurgulamaktadır.

4.1.2 Dergilere ve yayıncılara göre dağıtım

Şekil 3, çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi ile ilgili yayınların farklı yayıncılara göre dağılımını göstermektedir. Elsevier 1.259 yayınlı önemli ölçüde liderdir ve onu 675 yayınlı Springer takip etmektedir. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 510 yayınlı bir diğer önemli katkı sağlayıcıdır. Diğer önemli yayıncılar arasında Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) (381 yayınlı), Academic Press (225 yayınlı) ve American Chemical Society (115 yayınlı) bulunmaktadır. John Wiley and Sons Inc., Public Library of Science, Nature Research ve Taylor and Francis Ltd. ise her biri 100'den az yayına katkıda bulunmuştur.

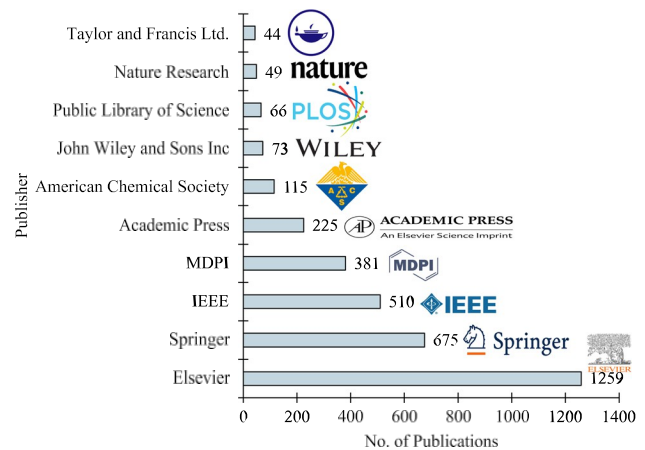
Şekil 4a, bu yayınların belirli dergiler arasındaki dağılımını detaylandırmaktadır. "Science of the Total Environment" (Elsevier) toplam 307 yayınlı en yüksek yayın sayısına sahiptir. "Environmental Monitoring and Assessment" (Springer) 274 yayınlı onu takip etmektedir. Diğer öne çıkan dergiler arasında "Environmental Science and Pollution Research" (Springer), "Environmental Research" (Elsevier) ve "Environmental Pollution" (Elsevier) yer almaktadır. IEEE'nin "IEEE Access" ve "IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing" gibi dergileri de önemli bir yer tutmaktadır. Listelenen dergilerin çeşitliliği, çevre bilimi, mühendislik, uzaktan algılama ve kirlilik araştırmalarını kapsayan çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarının disiplinler arası doğasını yansıtmaktadır.

"Science of the Total Environment" ve "Environmental Monitoring and Assessment" gibi yüksek etkili çevre bilimi dergilerinin AI/ML araştırmalarını yayınlamadaki hakimiyeti, bu teknolojilerin çevre bilimlerine artan ana akım entegrasyonunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, IEEE gibi bilgisayar bilimleri ve mühendislik dergilerinden gelen önemli katkılar, bu alanın disiplinler arası doğasına işaret etmektedir. Bu örüntü, çevresel izleme alanındaki araştırmacıların disiplinler arası yeniliği teşvik etmek için farklı akademik alanlarda yayın yapmayı düşünmeleri gerektiğini göstermektedir. YZ/ML araştırmalarının çeşitli yüksek etkili dergilerde yer alması, bilimsel topluluğun çevre bilimini ilerletmek için bu teknolojilerin dönüştürücü potansiyelini kabul ettiğini de yansıtmaktadır.

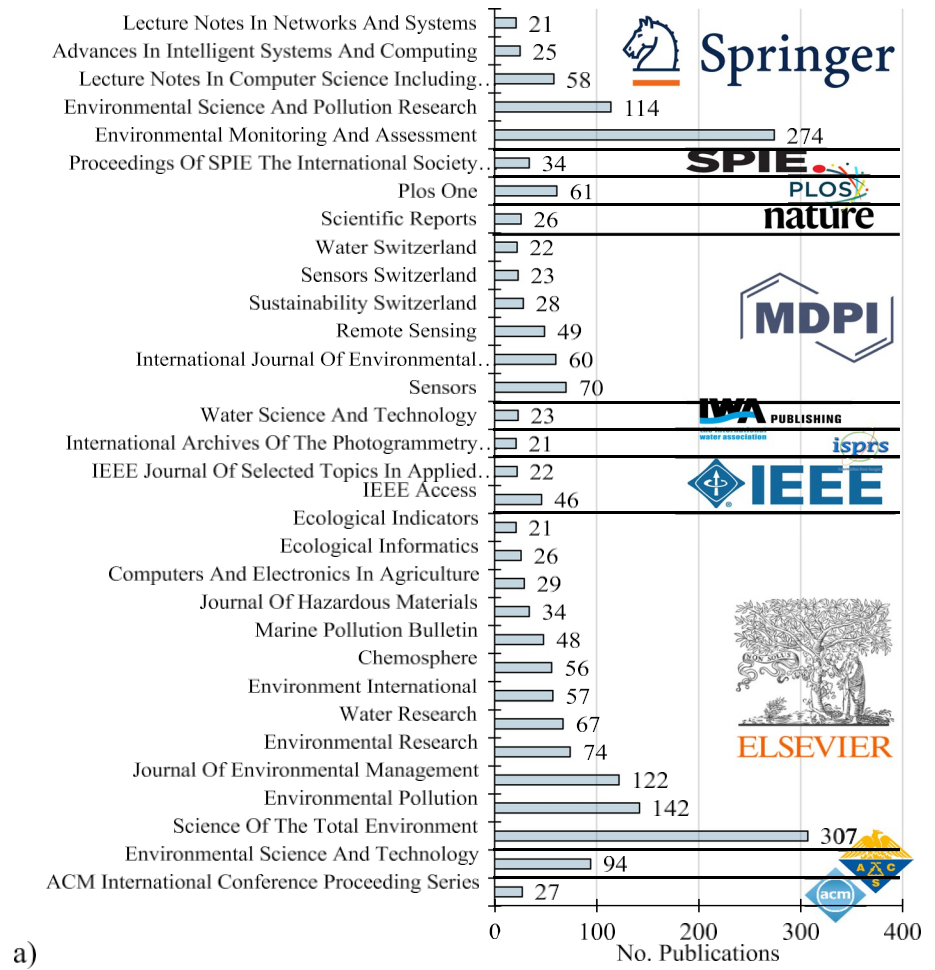
4.1.3 Alanlara göre dağılım

Şekil 4b, çevresel izleme alanındaki yapay zeka ve makine öğrenimi araştırmalarının çeşitli akademik alanlara dağılımını göstermektedir. Çevre Bilimleri, yayınların %25'i ile başı çekmekte ve bu teknolojilerin çevresel zorluklara uygulanmasına güçlü bir şekilde odaklanıldığını göstermektedir. Bu uygulamaları destekleyen teknik ve algoritmik gelişimi yansıtan Bilgisayar Bilimleri %16 ile onu takip etmektedir. Mühendislik, yayınların %12'sini oluşturmakta ve mühendislik çözümlerinin çevresel izlemedeki rolünü ortaya koymaktadır. Diğer önemli alanlar arasında Dünya ve

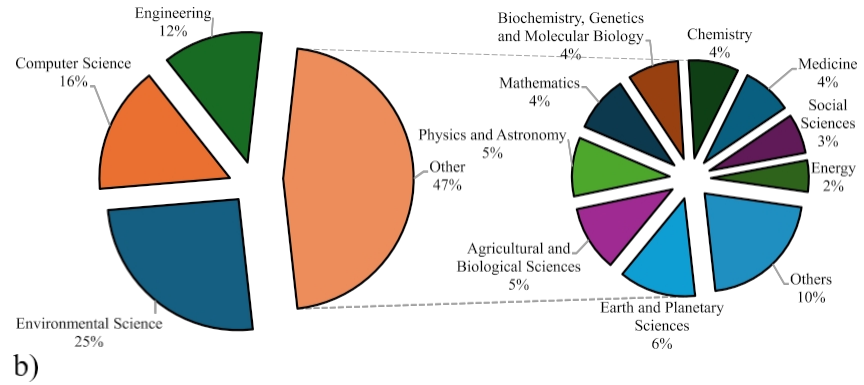
Şekil 3 Çevre izleme ve veri analizi alanındaki yapay zeka ve makine öğrenimi yayınlarının farklı yayıncılara göre dağılımı



Şekil 4 Çevresel izleme ve veri analizi alanındaki yapay zeka ve makine öğrenimi yayınlarının dağılımı **a** Çeşitli dergiler; ve **b** farklı akademik alanlar



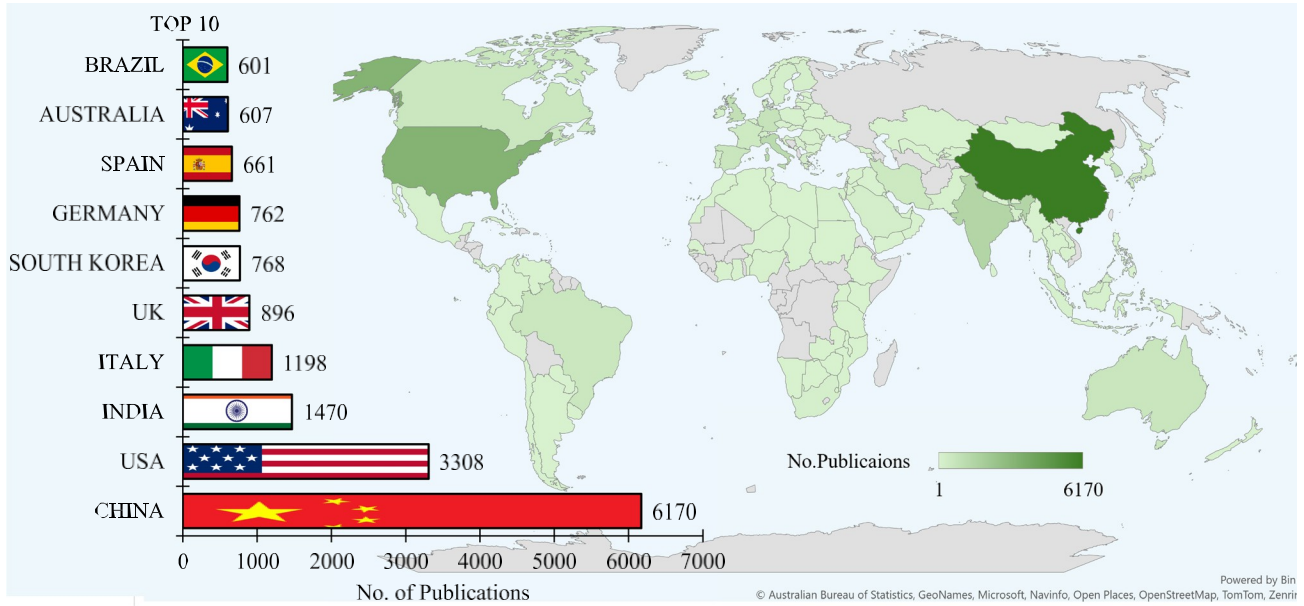
a)



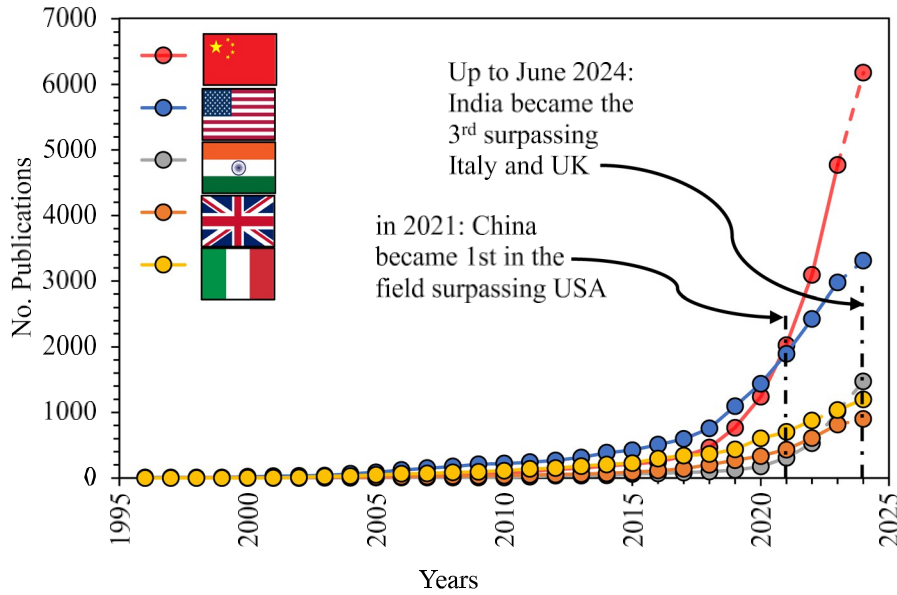
b)

Gezegen Bilimleri (%6), Tarım ve Biyoloji Bilimleri (%5), Biyokimya, Genetik ve Moleküler Biyoloji (%4), Kimya (%4), Matematik (%4) ve Tıp (%4). Geri kalan yayınlar Fizik ve Astronomi, Sosyal Bilimler ve Enerji alanlarına dağılmış olup her biri %2 ila %3 arasında katkı sağlamaktadır.

Araştırmaların önemli bir kısmı, bu alanın disiplinler arası doğasını ve YZ ile makine öğreniminin diğer çeşitli bilimsel alanlara entegrasyonunu vurgulayan 'Diğer' kategorisine (%47) girmektedir.



a)



b)

Şekil 5 Yapay zeka ve makine öğrenimi çevresel izleme ve veri analizi araştırma yayınlarında araştırma katkıları: **a** Coğrafi dağılım, **b** İlk beş ülkenin zamansal gelişimi

4.2 Araştırmaların coğrafi dağılımı

Şekil 5a, çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi ile ilgili araştırma yayınlarının coğrafi dağılımını göstermektedir. Harita, en fazla yayına sahip ülkeleri vurgulamakta, şeklin sol tarafında ise en fazla katkıda bulunan ilk 10 ülke listelenmektedir. Çin 6170 yayınlı önemli ölçüde lider konumdadır. Amerika Birleşik Devletleri 3308 yayınlı onu takip etmektedir. Hindistan, Birleşik Krallık ve İtalya da sırasıyla 1.470, 896 ve 1.198 yayınlı önemli katkılarda bulunmaktadır. Diğer önemli katılımcılar arasında Güney Kore (768 yayınlı), Almanya (762 yayınlı), İspanya (661 yayınlı), Avustralya (607 yayınlı) ve Brezilya (601 yayınlı) bulunmaktadır. Şunu belirtmekte fayda var

Bu değerler ortak yazarlıklar hesaba katılmadan verilmiştir; örneğin, hem ABD hem de Çin'den yazarlar bir makalede yer alıyorsa, her ülke için 1 olarak sayılır.

Şekil 5b, ilk beş ülkenin -Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan, Birleşik Krallık ve İtalya- zaman içindeki katkılarını göstermektedir. Bu, özellikle 2015'ten itibaren yayın sayılarındaki önemli artışlarla birlikte, çevresel izleme ve veri analizi için yapay zeka ve makine öğrenimi araştırmalarındaki dinamik büyümeyi ve değişen liderliği göstermektedir. Çin'in araştırma çıktısı 2021'de ABD'yi geçerek bu alanda önde gelen katılımcı haline gelmiştir. Ağustos 2024 itibarıyla Hindistan, İtalya ve Birleşik Krallık'ı geride bırakarak üçüncü sıraya yükselmiştir. Araştırmaların coğrafi dağılımı, her ikisi de güçlü teknolojik altyapılara ve yapay zeka ve çevre araştırmalarına önemli yatırımlara sahip olan Çin ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerin açık bir hakimiyetini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, özellikle Afrika ve Asya'nın bazı bölgeleri olmak üzere gelişmekte olan birçok ülkenin araştırma katkılarında gözle görülür bir boşluk vardır. Bu eşitsizlik, çeşitli ekolojik ve sosyo-ekonomik bağlamlarda çevresel izlemede YZ ve makine öğrenimi uygulamalarını teşvik etmek için küresel kapasite geliştirme girişimlerine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Önde gelen ülkeler ve yeterince temsil edilmeyen bölgeler arasındaki işbirliği çabaları, YZ/ML çözümlerinin küresel uygulanabilirliğini artırabilir ve bu teknolojilerin, özellikle en ciddi çevresel zorluklarla karşı karşıya olanlar olmak üzere tüm bölgeler için kapsayıcı ve faydalı olmasını sağlayabilir.

4.3 İşbirliği ağları

Çevresel izleme için yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamaları alanında ülkeler arasındaki işbirliği ağları Şekil 6'da gösterilmektedir. Ağ görselleştirmesi, ülkeleri temsil eden düğümler ve aralarındaki işbirlikçi bağlantıları gösteren kenarlar ile bir bağlantı ağı göstermektedir.

Şekil 6a'da ağ renklerle kodlanmış olup kırmızı ve mavi renkler yakın işbirliği yapan ülkelerin oluşturduğu farklı kümeleri göstermektedir. Bu kümeleme, aynı kümedeki ülkelerin genellikle coğrafi yakınlığı veya benzer araştırma alanlarını paylaştığı bölgesel işbirliği modellerini ortaya koymaktadır. Amerika Birleşik Devletleri ve Çin, kapsamlı işbirliği ağlarına sahip merkezi merkezler olarak ortaya çıkmaktadır. Her iki ülke de çok sayıda bağlantı ve daha büyük düğüm boyutları ile vurgulanan diğer ülkelerle yüksek derecede birbirine bağlılık göstermektedir. Diğer önemli düğümler arasında, her biri ağ içinde güçlü işbirliği bağları gösteren Almanya, Birleşik Krallık, Kanada ve Avustralya yer almaktadır.

Ayrıca, Şekil 6b'de yıllık ortalama yayın sayısına vurgu yapılarak işbirliği ağları gösterilmektedir. Düğümler ortalama yayın sayısına göre boyutlandırılmıştır ve maviden yeşile ve sarıya doğru renk gradyanı, 2019'dan 2023'e kadar uzanan işbirliklerinin zaman çizelgesini temsil etmektedir. Bu görselleştirme, Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Hindistan ve Birleşik Krallık gibi ülkelerin önemli katkılarıyla araştırma işbirliklerinin zaman içindeki dinamik yapısını vurgulamaktadır. Zamansal gelişim, son yıllarda artan uluslararası işbirliğine ve ortak yayınların sayısındaki artışa işaret etmektedir. Özellikle Birleşik Arap Emirlikleri, Fas, Ekvator ve Kenya, sarı düğümlerle gösterildiği gibi bu kümeye katılan en yeni ülkelerdir.

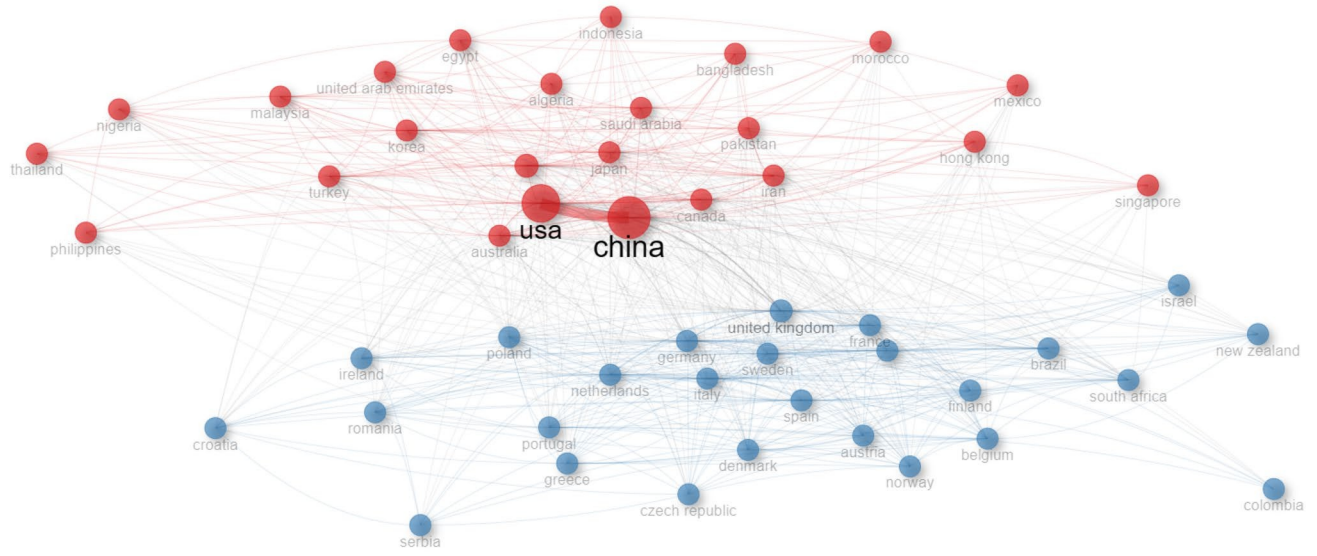
4.4 Anahtar kelime analizi

4.4.1 En yaygın anahtar kelimeler

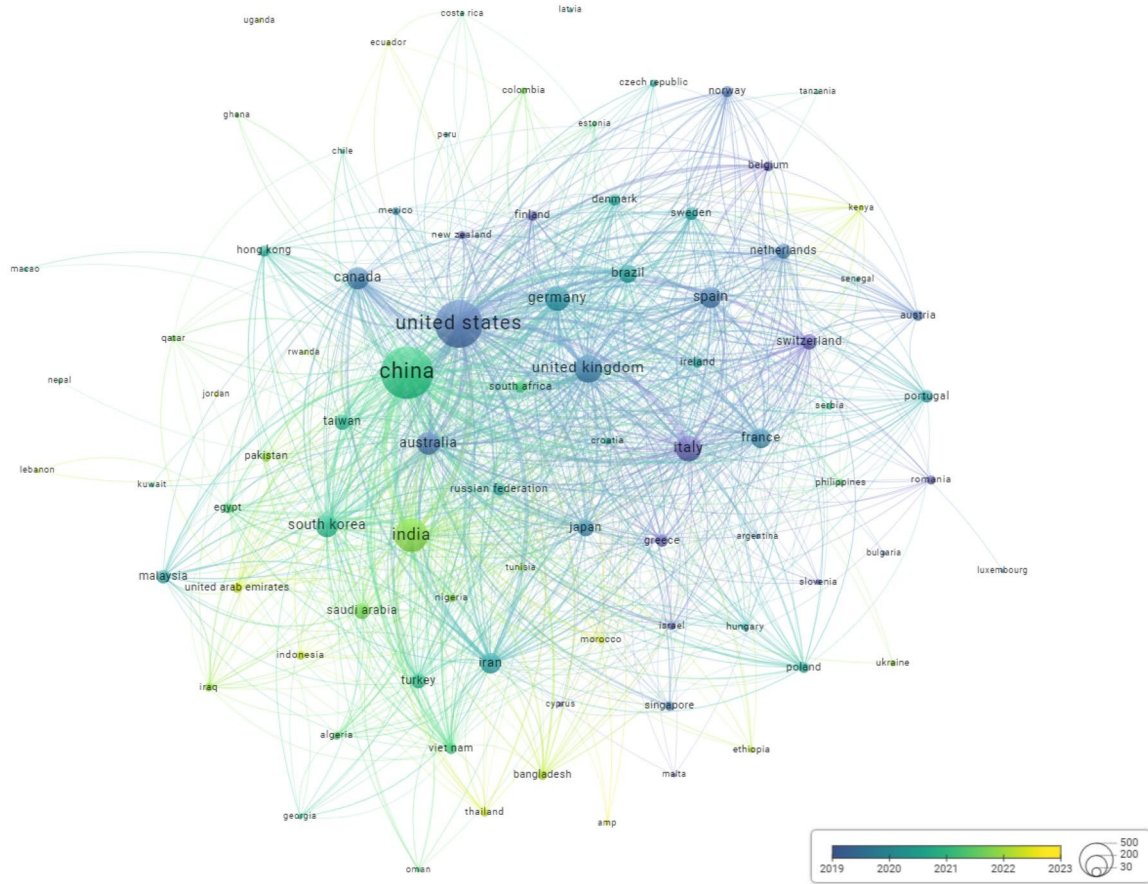
Şekil 7a, çevresel izleme ve veri analizinde yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamaları üzerine araştırma yayınlarında bulunan en yaygın anahtar kelimeleri gösteren bir kelime bulutu sunmaktadır. Her bir anahtar kelimenin boyutu, literatürde ortaya çıkma sıklığını göstermektedir. "Makine öğrenimi" terimi, bu araştırma alanındaki merkezi rolünü yansıtan belirgin bir şekilde öne çıkmaktadır. Diğer önemli anahtar kelimeler arasında "yapay zeka", "uzaktan algılama", "tahmin", "iklim değişikliği", "hava kirliliği" ve "derin öğrenme" yer almaktadır. Bu terimler, alanda araştırılan ana temaları ve uygulamaları vurgulamaktadır. Diğer sık kullanılan anahtar kelimeler arasında "nesnelerin interneti", "rastgele orman", "su kalitesi", "izleme", "hava kalitesi", "yeraltı suyu" ve "büyük veri" yer almaktadır. Bu, rastgele ormanlar gibi belirli tekniklerden hava kalitesi ve su kalitesi izleme gibi çeşitli uygulamalara kadar araştırılan geniş bir konu yelpazesine işaret etmektedir. "Partikül madde", "sınıflandırma", "CBS", "sensörler" ve "tarım" gibi terimler de sıkça karşımıza çıkmakta ve çevresel izleme araştırmaları ve veri analizinde kullanılan çeşitli uygulama alanları ve metodolojileri vurgulamaktadır.

4.4.2 Anahtar kelime eş-oluşum ağı

Şekil 7b, farklı anahtar kelimelerin yayınlarda ne sıklıkta birlikte görüldüğünü gösteren anahtar kelime eş-oluşum ağını göstermektedir. Düğümler anahtar kelimeleri, kenarlar ise eş-oluşumları temsil etmektedir. Düğümlerin boyutu şunları yansıtır



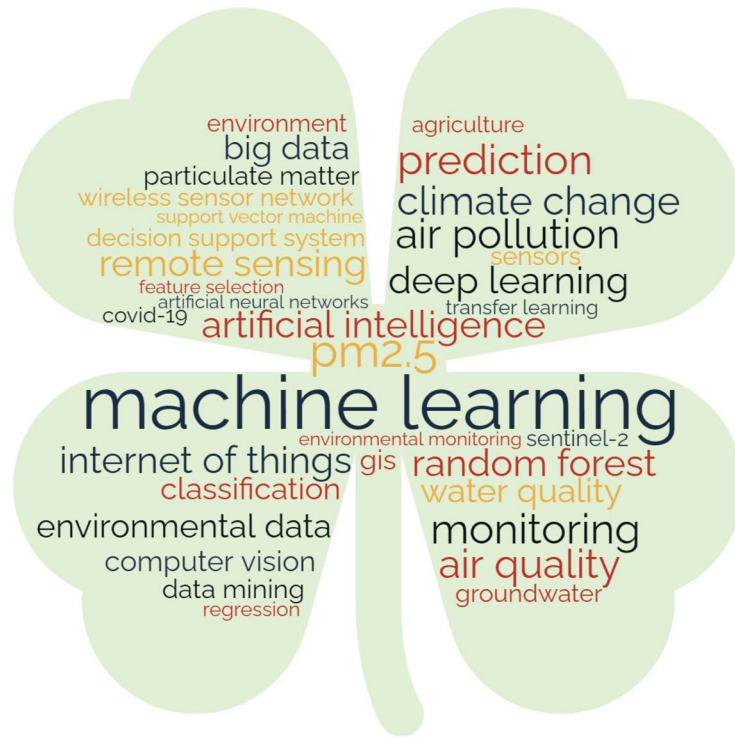
a)



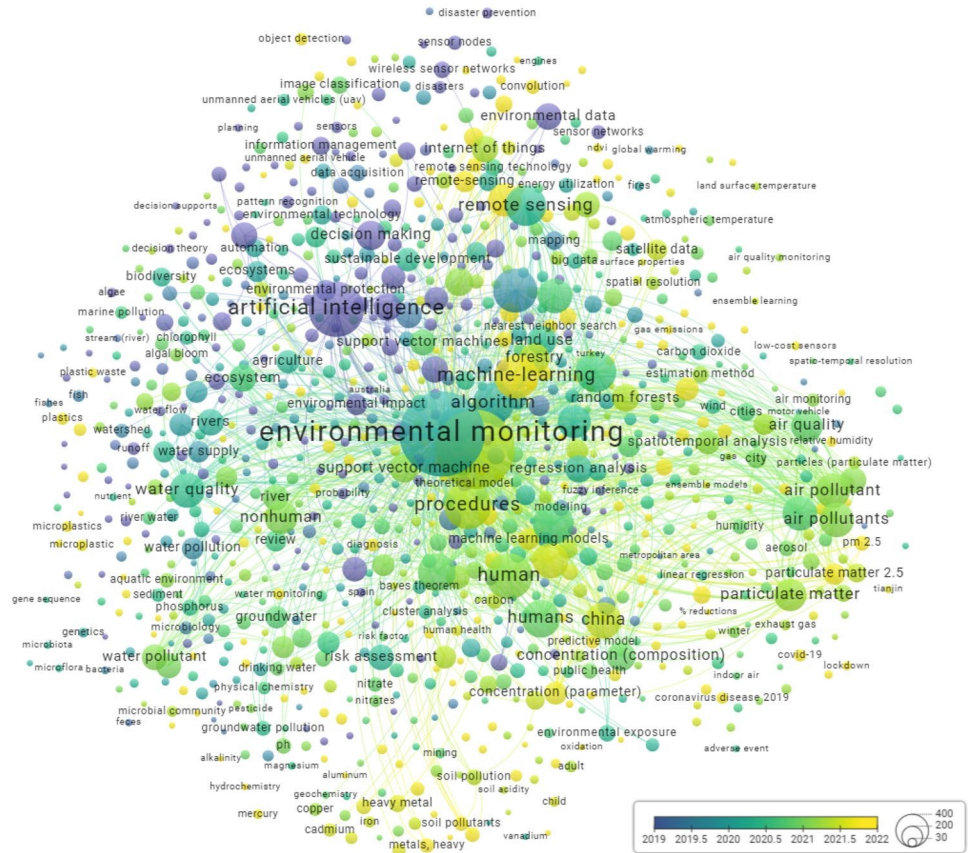
b)

Şekil 6 Uluslararası işbirliği ağırları. **a** Kümelenmiş ve **b** çevresel izleme ve veri analizi için yapay zeka ve makine öğrenimi araştırmalarında ortalama yayın/yıl ile. Minimum 5 yayın/ülke eşiği 163 ülkeden 78'ini hariç tutmuştur (kalan 85)

Şekil 7 a Kelime bulutu ve **b** yayın/yıl ile anahtar kelime eş-oluşumu Çevresel izleme ve veri analizi için yapay zeka ve makine öğrenimi araştırması. Yazar anahtar kelimeleriyle birlikte tam sayım kullanılmış ve en az 5 anahtar kelime seçilerek 1983 kelimedenden 1659'u elenmiştir. (kalan 324)



a)



b)

anahtar kelimelerin sıklığını, maviden yeşile ve sarıya doğru renk gradyanı ise 2019'dan 2023'e kadar olan zaman çizelgesini temsil etmektedir. Bu görselleştirme, farklı araştırma temaları arasındaki bağlantılara ve odak alanlarının zaman içindeki gelişimine ilişkin algılar sağlamaktadır.

"İklim değişikliği", "hava kalitesi", "su kalitesi" ve "biyoçeşitlilik" ile ilgili terimlerin öne çıkması, yapay zeka ve makine öğrenimi teknolojileri aracılığıyla ele alınan önemli çevresel zorlukları vurgulamaktadır. "Nesnelerin İnterneti" ve "derin öğrenme" gibi gelişmekte olan teknolojilerin dahil edilmesi, veri toplama ve analiz yöntemlerinde devam eden yeniliği vurgulamaktadır.

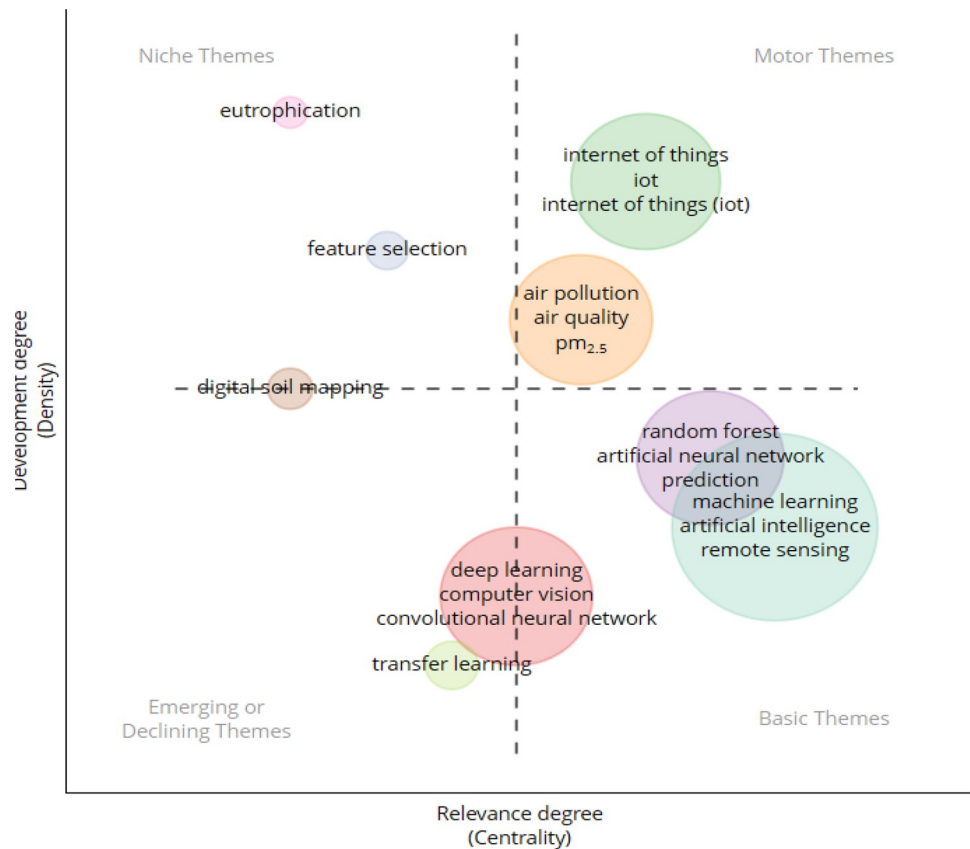
Şekil 7b'de dikkat çeken bir eğilim, son yıllarda (2022-2023) öne çıkan anahtar kelimeleri temsil eden sarı renkli düğümlere doğru kaymadır. Bunlar arasında "partikül madde", "su kirleticileri", "toprak kirleticileri", "yeraltı suyu" ve "ağır metaller" gibi terimler yer almakta olup, güncel çevre sorunları ve bunların halk sağlığı endişeleriyle kesişimi üzerine artan bir araştırma odağına işaret etmektedir. Bu eğilim, araştırma topluluğunun acil çevresel ve toplumsal zorluklara karşı duyarlılığını yansıtmakta, teorik kavramlardan ziyade pratik sonuçları olan zamanında ve etkili çalışmalar için yapay zeka ve makine öğrenimi teknolojilerinden yararlanmakta, bu da ortaya çıkan çevresel sorunların ele alınmasında yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarının uyarlanabilirliğini ve uygunluğunu göstermektedir. Bu eğilim, araştırma çabalarının mevcut küresel önceliklerle uyumlu kalmasını sağlayarak çevresel izleme ve veri analizindeki çağdaş zorluklar için yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini kolaylaştırdığı için faydalıdır.

4.4.3 Tematik eğilimler

Şekil 8, çevresel izleme ve veri analizi için yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarında ortaya çıkan eğilimlerin dört çeyrekte kategorize edilmiş tematik bir haritasını sunmaktadır: Motor Temalar, Niş Temalar, Temel Temalar ve Yükselen veya Düşen Temalar.

Motor Temalar çeyreği "nesnelerin interneti" (IoT), "hava kirliliği", "hava kalitesi" ve "PM2.5" gibi terimleri içermektedir. Bu temalar hem yüksek merkezilik hem de yüksek yoğunluk ile karakterize edilir, bu da iyi geliştirildiklerini ve araştırma alanı için çok önemli olduklarını gösterir. IoT'nin çevresel izleme ile entegrasyonu, gerçek zamanlı veri toplama ve analizine olanak tanıyarak hava kalitesi ve kirlilik seviyelerini verimli bir şekilde izleme kapasitesini artırır. Nesnelerin İnterneti

Şekil 8 Çevresel izleme ve veri analizi için yapay zeka ve makine öğrenimi araştırmalarında ortaya çıkan eğilimlerin tematik haritası



Hava kalitesiyle ilgili terimlere sıkça rastlanması, kirliliğin ve bunun sağlık ve çevre üzerindeki etkilerinin ele alınmasına verilen önemi vurgulamaktadır.

Niş Temalar çeyreğinde, "ötrofikasyon" ve "özellik seçimi" gibi terimler bulunur. Bu temalar yüksek yoğunluğa ancak düşük merkeziliğe sahiptir, bu da kendi alanlarında uzmanlaşmış ve iyi gelişmiş olduklarını ancak diğer temalarla geniş çapta bağlantılı olmadıklarını göstermektedir. Ötrofikasyon, su kütleleriyle ilgili spesifik bir çevre sorunudur ve bu alanda odaklanmış araştırma çabalarına işaret etmektedir. Etkili yapay zeka modelleri oluşturmada önemli bir adım olan özellik seçimi, model performansını artırmak için veri girdilerini iyileştirmenin önemini göstermektedir.

Temel Temalar çeyreği "rastgele orman", "yapay sinir ağı", "tahmin", "makine öğrenimi", "yapay zeka" ve "uzaktan algılama" gibi terimleri içermektedir. Bu temalar yüksek merkeziliğe ancak düşük yoğunluğa sahiptir, bu da alan için temel olduklarını ve çeşitli araştırma alanlarında yaygın olarak uygulanabilir olduklarını gösterir. Bu temel yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri, tahmin modellerinden uzaktan algılama veri analizine kadar çeşitli uygulamaları kolaylaştırarak çok sayıda çalışmanın bel kemiğini oluşturmaktadır.

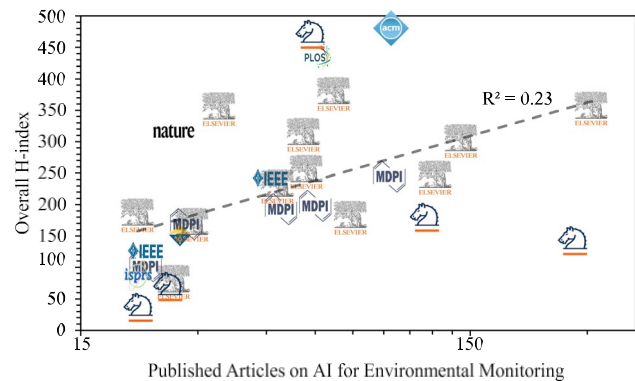
Gelişmekte Olan veya Azalan Temalar çeyreğinde "derin öğrenme", "bilgisayarla görme", "evrimsel sinir ağı", "transfer öğrenme" ve "dijital toprak haritalama" gibi terimler bulunmaktadır. Bu temalar düşük yoğunluk ve düşük merkeziyete sahiptir, bu da yeni ortaya çıkan veya potansiyel olarak düşüş gösteren araştırma alanları olduklarını göstermektedir. Derin öğrenme ve bilgisayarla görme, görüntü ve video gibi karmaşık veri türlerini işleme yetenekleri nedeniyle ilgi çekmektedir. Transfer öğrenme, başka bir alandaki model performansını iyileştirmek için bir alandaki bilgiden yararlanan ve yapay zeka araştırmalarındaki yenilikçi stratejileri vurgulayan yeni bir yaklaşımdır. Dijital toprak haritalamanın konumu, bu alanda daha özel bir odaklanma veya gelişen bir ilgi olduğunu gösterebilir.

4.5 H-Index analizi

Çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi üzerine araştırma yayınlayan dergilerin etkisini değerlendirmek için bir h-endeksi analizi gerçekleştirdik. H-endeksi, dergi etki ölçütleri için yaygın olarak kabul edilen bir kaynak olan Scimago Journal Rank (SJR) veritabanından toplanmıştır [28]. H-indeksi, bir dergide yayınlanan makalelerin hem üretkenliğini hem de atıf etkisini yansıtır.

Şekil 9, çevresel izleme için YZ konusunda yayınlanan makale sayısı ile bu makaleleri yayınlayan dergilerin genel h-indeksi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Görüldüğü gibi, makale sayısı ile h-indeksi arasında pozitif bir eğilim vardır; bu da YZ ile ilgili çevresel yayınların daha yüksek hacimli olduğu dergilerin daha yüksek etki ölçütlerine sahip olma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Belirleme katsayısı $R^2=0,23$, makale sayısı ile derginin h-indeksi arasında orta düzeyde bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu ilişki, köklü ve saygın dergilerin çevresel izleme için YZ araştırmalarının yaygınlaştırılmasına aktif olarak katıldığını vurgulamakta ve bu alanın öneminin ve artan etkisinin altını çizmektedir. Daha yüksek h-endeksi puanlarına sahip dergiler, daha fazla dikkat çeken ve tanınan çalışmalar yayınlama eğilimindedir ve bu da kritik çevresel zorlukların ele alınmasında YZ ve makine öğrenimi teknolojilerinin artan ilgisini göstermektedir.

Şekil 9 Çevresel izleme için yapay zeka üzerine yayınlanmış makaleler içeren ve yayıncıları ile etiketlenmiş dergilerin Genel-H indeksi



Tablo 1 Çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarının tematik

kategorileri Kategoriler	Kapsanan Alanlar
Çevresel izleme için AI/ML'de metodolojik ilerlemeler	Yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerini geliştirmeye, yeni algoritmalar sunmaya veya modellerin doğruluğunu ve yorumlanabilirliğini artırmaya odaklanan m a k a l e l e r
Hava kalitesi izleme uygulamaları öğrenimini uygulayan çalışmalar	Modeller de dahil olmak üzere hava kalitesinin tahmini ve yönetimi için yapay zeka ve makine sensör verilerini, uydu görüntülerini ve gerçek zamanlı izleme sistemlerini entegre eden
Su kalitesi izleme uygulamaları	Su kalitesini tahmin etmek ve yönetmek için AI/ML kullanımına odaklanan ve aşağıdaki modelleri içeren bildiriler kirlilik, kirlenme ve kaynak yönetimi gibi konuları ele almak
İklim değişikliği modellemesi ve tahmini	İklim değişikliğinin etkilerinin modellenmesine yapay zeka/ML uygulayan çalışmalar, iklim değişikliğinin tahmini modellemesi
Biyoçeşitlilik ve ekosistem izleme zeka ve makine öğrenimini kullanan makaleler	çevresel modeller ve iklim adaptasyonu ve azaltımı için karar-destek araçlarının geliştirilmesi
Afet yönetimi ve tahmini	Biyoçeşitliliği izlemek, ekosistem sağlığını değerlendirmek ve değişiklikleri tahmin etmek için yapay tür dağılımlarında veya habitat koşullarında
Gelişen teknolojiler ve disiplinler arası uygulamalar	Çevresel felaketleri tahmin etmek ve yönetmek için AI/ML kullanımına odaklanan çalışmalar seller, orman yangınları ve kasırgalar
	AI/ML'yi Nesnelerin İnterneti (IoT), insansız hava araçları (UAV'ler) ve gelişmiş çevresel izleme için büyük veri platformları gibi diğer gelişmekte olan teknolojilerle entegre eden çalışmalar

5 Temel literatürün derinlemesine analizi

5.1 Derinlemesine analizin organizasyonu

Derinlemesine analiz için daha önce açıklanan metodolojiyi takiben, seçilen çalışmalar Tablo 1'de gösterildiği gibi tematik anahtar kategoriler halinde düzenlenmiştir.

5.2 Çevresel izleme için AI/ML'de metodolojik ilerlemeler

İncelenen literatürdeki çeşitli çalışmalar, çevresel izleme için özel olarak uyarlanmış AI/ML metodolojilerinin geliştirilmesine önemli katkılarda bulunmuştur. Bu metodolojik ilerlemeler, yeni algoritmaların geliştirilmesinden mevcut modellerin yorumlanabilirliğinin ve ölçeklenebilirliğinin iyileştirilmesine kadar uzanmaktadır.

Zhu ve arkadaşları [51] tarafından yapılan önemli bir çalışma, toprak haritalamasını iyileştirmek için coğrafi bilgi sistemleri (CBS), uzman bilgisi ve bulanık mantığı birleştiren Toprak-Arazi Çıkarım Modelini (SoLIM) tanıtmıştır. Alan uzmanlığının YZ teknikleriyle entegrasyonu, YZ'nin geleneksel çevre bilimleriyle birleştirilmesinin nasıl daha doğru ve uygulanabilir modeller sağlayabileceğini örneklemektedir. Bu çalışma, sürdürülebilir tarım ve arazi kullanım planlaması için kritik öneme sahip olan toprak haritalarının çözünürlüğünü ve doğruluğunu geliştirerek YZ'nin toprak ve arazi yönetimi uygulamalarını geliştirme potansiyelini vurgulamıştır [18].

Khatami ve diğerleri [21], doku verilerinin dahil edilmesinin sınıflandırma doğruluğunu nasıl artırabileceğine odaklanarak arazi örtüsü sınıflandırma yöntemleri üzerine kapsamlı bir meta-analiz gerçekleştirmiştir. Çalışma, doku verileri dahil edildiğinde destek vektör makinelerinin diğer sınıflandırma algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu metodolojik ilerleme, arazi örtüsü sınıflandırmasının zaman içindeki çevresel değişiklikleri izlemek için gerekli olduğu uzaktan algılama uygulamaları için özellikle önemlidir.

Chapi ve diğerleri [6] tarafından yapılan bir diğer önemli çalışma, sel duyarlılığı haritalaması için torbalama topluluğu yöntemini ve Lojistik Model Ağacı (LMT) algoritmasını birleştiren Bagging-LMT modelini tanıtmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, hibrit modelin tahmin doğruluğunu artırarak ve model yanlılığını azaltarak lojistik regresyon ve rastgele orman gibi geleneksel modellerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu metodolojik gelişme, doğru ve zamanında tahminlerin kaynak tahsisi ve risk azaltmaya yardımcı olabileceği afet yönetimi için çok önemlidir.

Daha yeni bir çalışmada, Ren ve arkadaşları [35] uzaktan algılanan görüntü değişikliği tespiti için çift dikkatli çok ölçekli bir ağ (DAMFANet) önermiştir. Bu model, özellik füzyonu ve semantik bilgi entegrasyonunu bir araya getirerek değişiklik tespit algoritmalarının performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu model, çevresel izlemede büyük ölçekli, heterojen verileri ele almanın ortak zorluğunu ele alarak ölçeklenebilir ve verimli bir çözüm sunar

uzaktan algılama görüntülerinin işlenmesi için. Dikkat mekanizmalarını çok ölçekli özellik öğrenimi ile birleştiren metodolojik yenilik, çevre biliminde, özellikle ormansızlaşma izleme ve arazi kullanım değişikliği tespiti gibi alanlarda yapay zeka uygulamaları için yeni yollar açmaktadır.

Bu çalışmalar toplu olarak çevresel izleme için AI/ML metodolojilerindeki önemli gelişmeleri temsil etmektedir. Modellerin doğruluğunu, ölçeklenebilirliğini ve yorumlanabilirliğini geliştiren bu metodolojik yenilikler, teorik araştırmalar ile pratik uygulamalar arasındaki boşluğu doldurmaya yardımcı olmaktadır.

5.3 Hava kalitesi izleme uygulamaları

Hava kalitesi izleme, yapay zeka ve makine öğreniminin önemli umut vaat ettiği kritik bir alandır. Geleneksel hava kalitesi izleme sistemleri, belirli konumlarda veri sağlayan sabit sensörlere dayanmaktadır, ancak bu sistemler genellikle kapsamlı çevresel değerlendirmeler için gereken uzamsal ve zamansal çözünürlükten yoksundur [37]. AI/ML teknikleri, daha doğru ve zamanında tahminler sağlamak için uydu görüntüleri, sensör ağları ve meteorolojik veriler gibi çeşitli kaynaklardan gelen verileri entegre ederek hava kalitesi izlemeyi geliştirme potansiyeli sunmaktadır.

Cao ve diğerleri [55] kentsel ortamlardaki kirlenici seviyelerini tahmin etmek için bir Bayes optimizasyon algoritması uygulamıştır. Çalışmaları, gerçek zamanlı sensör verileriyle birleştirilen topluluk modellerinin, özellikle yoğun nüfuslu kentsel alanlarda hava kalitesi tahminlerinin doğruluğunu artırabileceğini göstermektedir. Bayesian optimizasyon yaklaşımı, model parametrelerinin ince ayarının yapılmasına olanak sağlayarak tahmin performansının ve modelin yorumlanabilirliğinin artmasını sağlamıştır.

Chen ve arkadaşları [7], 2005-2016 yılları arasında Çin genelinde partikül madde (PM_{2.5}) konsantrasyonlarını tahmin etmek için rastgele orman algoritmalarını kullanan bir model geliştirmiştir. Geliştirdikleri model, PM_{2.5} konsantrasyonlarındaki değişkenliğin %83'ünü açıklayarak AI/ML tekniklerinin geniş coğrafi alanlarda hava kalitesini doğru bir şekilde tahmin etme potansiyelini vurgulamıştır.

Di ve arkadaşları [9], Amerika Birleşik Devletleri'ndeki PM_{2.5} konsantrasyonlarını tahmin etmek için birden fazla makine öğrenimi algoritmasını entegre eden bir topluluk modeli geliştirmiştir. Model, on kat çapraz doğrulamalı 0,86-0,89 R² ile yüksek doğruluk elde etmiştir. Topluluk yaklaşımı, birden fazla modelin birleştirilmesinin, özellikle farklı iklim koşullarına sahip bölgelerde hava kalitesi tahminlerinin sağlamlığını ve genelleştirilebilirliğini nasıl geliştirebileceğini göstermektedir. Daha yeni bir küresel PM_{2.5} ölçeği çalışmasında, Yu ve diğerleri [48] 2000-2019 yılları arasında dünya çapında günlük PM_{2.5} konsantrasyonlarını tahmin etmek için derin bir topluluk makine öğrenimi (DEML) modeli kullanmıştır. Bu yaklaşım, 65 ülkedeki 5.446 izleme istasyonundan alınan yer tabanlı ölçümleri kimyasal taşıma modeli çıktıları ve meteorolojik verilerle birleştirerek 0,1° x 0,1°'lik yüksek bir uzamsal çözünürlük elde etmiştir. DEML modeli, PM_{2.5} konsantrasyonlarında gözlenen değişkenliğin %91'ini 7.86 µg/m³'lük bir kök ortalama kare hatası ile açıklayarak, küresel maruziyet kalıpları ve yirmi yıl boyunca mekansal-zamansal değişiklikler hakkında ayrıntılı bilgiler sağlamıştır. Çalışma, 2019 yılında günlerin %90'ından fazlasının DSÖ'nün günlük PM_{2.5} sınırı olan 15 µg/m³'ü aştığı Güney ve Doğu Asya'da sürekli olarak yüksek PM_{2.5} seviyeleri ile önemli bölgesel farklılıklar tespit ederken, Avrupa ve Kuzey Amerika gibi bölgelerde nüfus ağırlıklı PM_{2.5} maruziyetinde zaman içinde azalmalar görülmüştür. Bu çalışmalar, farklı coğrafi bölgelerde uygulanabilecek hava kalitesi izleme için ölçeklenebilir yaklaşımlar sunduğundan, politika yapıcılar ve çevre yöneticileri için özellikle önemlidir.

Bu çalışmalar, hava kalitesi izlemede yapay zeka ve makine öğreniminin önemli potansiyelini vurgularken, aynı zamanda çeşitli zorluklara da işaret etmektedir. Örneğin, birçok model hala aşırı kirlilik olaylarını tahmin etmekte veya kentsel mikro iklimlerin karmaşıklıklarını hesaba katmakta zorlanmaktadır. Bu zorlukların ele alınması, hava kalitesi tahminlerinin mekansal ve zamansal çözünürlüğünü iyileştirmek için uydu verilerini yer tabanlı sensörlerle birleştirmek gibi çok ölçekli veri kaynaklarını entegre etmeye odaklanacak gelecekteki araştırmaları gerektirecektir. Ayrıca, daha yorumlanabilir yapay zeka modellerinin geliştirilmesi, hava kirliliğinin nedensel faktörleri hakkında değerli bilgiler sağlayabilir ve bu da politika yapıcıları ve şehir planlamacılarını karar verme süreçlerinde daha iyi bilgilendirebilir. Yorumlanabilir modeller, araştırmacıların yalnızca kirlilik seviyelerini tahmin etmelerine değil, aynı zamanda hava kalitesini iyileştirmek için daha etkili müdahaleler tasarlamak için çok önemli olan altta yatan nedenleri anlamalarına da olanak tanıyacaktır.

5.4 Su kalitesi izleme uygulamaları

Su kalitesinin izlenmesi, yapay zeka ve makine öğreniminin önemli bir değer ortaya koyduğu bir diğer önemli çevresel alandır. Geleneksel su kalitesi değerlendirmesi, özellikle uzak bölgelerde zaman alıcı, pahalı ve lojistik açıdan zorlayıcı olabilen manuel örnekleme ve laboratuvar analizine dayanır. YZ/ML teknikleri, su kalitesi parametrelerini gerçek zamanlı olarak tahmin etmek için sensör ağlarından, uzaktan algılama platformlarından ve geçmiş veri kümelerinden gelen verileri kullanarak bu süreçleri otomatikleştirme ve geliştirme potansiyeli sunmaktadır.

Palani ve diğerleri [31] Singapur'un kıyı sularında su kalitesini tahmin etmek için yapay sinir ağları (YSA) uygulamıştır. Model, 0,8 ila 0,9 arasında değişen Nash-Sutcliffe verimlilik katsayıları ile yüksek tahmin doğruluğu elde etmiştir.

besin konsantrasyonları ve çözünmüş oksijen seviyeleri gibi temel su kalitesi parametrelerini tahmin etmede yapay zekanın etkinliğini göstermektedir. Bu çalışma, su kalitesindeki dalgalanmaların önemli ekolojik ve ekonomik etkilere sahip olabileceği kıyı ekosistemlerinin yönetimi için özellikle önemlidir.

Lu ve Ma [26] tarafından yapılan daha yeni bir çalışmada, Tualatin Nehri'nde su kalitesi tahmini için Adaptif Gürültülü Komple Topluluk Ampirik Mod Ayırıştırma (CEEMDAN) yöntemini ve aşırı gradyan artırma (XGBoost) yöntemini entegre eden bir hibrit model tanıtılmıştır. Hibrit model, geleneksel modellerden daha iyi performans göstererek, çevre tahminlerinin doğruluğunu artırmak için sinyal işleme tekniklerini makine öğrenimi algoritmalarıyla birleştirmenin avantajlarını vurgulamıştır. Makine öğrenimi algoritmalarını uygulamadan önce gürültülü su kalitesi verilerini önceden işlemek için ampirik mod ayırıştırması kullanma yaklaşımları, gürültülü veya eksik veri kümelerine sahip diğer çevresel izleme bağlamlarına uygulanabilecek metodolojik bir yeniliktir.

Naghibi ve diğerleri [29] İran'da yeraltı suyu potansiyeli haritalaması için artırılmış regresyon ağaçları (BRT) ve rastgele orman (RF) dahil olmak üzere bir dizi makine öğrenimi modeli kullanmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, BRT modelinin tahmin doğruluğu açısından diğer modellerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koyarak, topluluk öğrenme tekniklerinin heterojen veri kümelerinin entegrasyonunu gerektiren çevresel uygulamalar için çok uygun olduğunu göstermiştir. Yeraltı suyu potansiyeli haritalaması, özellikle suyun kıt bir kaynak olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için gereklidir [39]. Bir başka çalışmada Hill ve Minsker [19], otoregresif modelleme ve çok katmanlı perceptron ağları kullanarak çevresel veri akışları için gerçek zamanlı bir anormallik tespit sistemi geliştirmiştir. Geliştirdikleri sistem, su kalitesi sensörlerindeki hatalı verileri tespit edebilmiş ve anomalileri gerçek zamanlı olarak işaretleyerek yapay zeka/ML tekniklerinin sensör tabanlı izleme sistemlerinin güvenilirliği.

Burada incelenen çalışmalar, yapay zeka ve makine öğreniminin su kalitesi izlemeyi iyileştirme potansiyelini ortaya koyarken, aynı zamanda bazı zorlukların da altını çizmektedir. Örneğin, birçok model yüksek kaliteli, gerçek zamanlı verilere dayanmaktadır ve bu veriler kaynakların kısıtlı olduğu bölgelerde her zaman mevcut olmayabilir. Gelecekteki araştırmalar, eksik veya gürültülü veri kümelerini işleyebilen sağlam YZ modelleri geliştirmeye ve uydu görüntüleri, sensör ağları ve geçmiş veri kümeleri gibi birden fazla kaynaktan gelen verileri entegre etmek için veri füzyon tekniklerinin potansiyelini keşfetmeye odaklanmalıdır. Ek olarak, açıklanabilir YZ modellerinin geliştirilmesi, özellikle düzenleme ve politika oluşturma bağlamlarında YZ güdümlü su yönetim sistemlerinde daha fazla şeffaflık ve güven sağlayacaktır.

5.5 İklim değişikliği modellemesi ve tahmini

Yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri, geleneksel simülasyon modellerinin genellikle çevresel verilerin karmaşıklığı ve ölçeği ile mücadele ettiği iklim değişikliği modelleme ve tahmininde giderek daha fazla uygulanmaktadır. Makine öğrenimi, örüntüleri ortaya çıkarmak ve büyük miktarda tarihsel iklim verisine dayalı tahminler yapmak için güçlü bir araç sunarak iklim değişikliğinin etkilerinin daha doğru tahmin edilmesini ve azaltma ve uyum stratejileri için daha iyi bilgilendirilmiş karar vermeyi sağlar.

Reichstein ve diğerleri [34] iklim dinamiklerini simüle etmek ve uzun vadeli çevresel değişiklikleri tahmin etmek için derin öğrenme tekniklerinin uygulanmasını göstermiştir. Çalışmaları, tekrarlayan sinir ağlarının (RNN'ler) ve evrimsel sinir ağlarının (CNN'ler) zaman serisi verilerini modelleme ve iklim sistemlerindeki karmaşık uzamsal-zamansal ilişkileri yakalama potansiyelini vurgulamıştır. Bu çalışma, yüksek çözünürlüklü uydu verilerinden yararlanarak ve bunları yer tabanlı ölçümlerle entegre ederek, iklim modellemesine çeşitli bölgelere ve çevresel bağlamlara uygulanabilecek ölçeklenebilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Yu ve diğerleri [47] sinir ağları ve karar ağaçlarının bir kombinasyonunu kullanarak bir iklim değişikliği etki değerlendirme modeli geliştirmiştir. Geliştirdikleri model, değişen iklim modelleri karşısında gıda güvenliği planlaması için kritik öneme sahip olan iklim değişikliğinin tarımsal verim üzerindeki etkilerini tahmin etmeye odaklanmıştır. Çalışma, makine öğrenimi modellerinin mahsul verimini yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini ve iklim değişikliğine karşı savunmasız bölgelerdeki çiftçiler ve politika yapımcılar için değerli bir karar destek aracı sunduğunu göstermiştir.

Bu alana bir diğer önemli katkı, ormanların iklim değişikliğine karşı direncini değerlendirmek için uydu tabanlı bitki örtüsü endekslerini rastgele orman modelleriyle entegre eden Forzieri ve arkadaşlarından [10] gelmektedir. Geliştirdikleri model, hassas ekosistemleri belirleyebilmiş ve farklı iklim senaryolarının zaman içinde orman sağlığını nasıl etkileyeceğini tahmin edebilmiştir. Bu araştırma, iklim değişikliğinin ekosistemler üzerindeki etkilerini izlemek için ölçeklenebilir bir yaklaşım sağladığından, özellikle koruma çabaları ve biyoçeşitlilik yönetimi ile ilgilidir.

Yapay zeka/ML teknikleri sel, kuraklık ve kasırga gibi aşırı hava olaylarının etkilerini modellemek için de kullanılmaktadır. Örneğin, Chapi ve diğerleri [6] İran'daki sel duyarlılığını tahmin etmek için makine öğrenimi algoritmaları uygulamış ve bu modellerin risk altındaki alanları belirleme ve afete hazırlık çabalarını bilgilendirme potansiyelini ortaya koymuştur. Benzer şekilde,

Gibb ve arkadaşları [11], kasırgaların gerçek zamanlı etkilerini değerlendirmek ve acil durum müdahale ekiplerine karar desteği sağlamak amacıyla sosyal medya verilerini ve uydu görüntülerini analiz etmek için yapay zekayı kullanmıştır.

Yapay zeka/ML tabanlı iklim modellemesindeki önemli gelişmelere rağmen, hala ele alınması gereken zorluklar vardır. Ana zorluklardan biri, birçok makine öğrenimi modelinin "kara kutu" niteliğidir; bu da sonuçları yorumlamayı ve tahminleri yönlendiren altta yatan mekanizmaları anlamayı zorlaştırmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, iklim değişikliğinin itici güçleri ve etkileri hakkında içgörü sağlayan açıklanabilir yapay zeka modelleri geliştirmeye odaklanmalıdır. Ayrıca, tahminlerin yerleşik bilimsel ilkelere dayandırılmasını ve farklı bölgeler ve senaryolar arasında daha genelleştirilebilir olmasını sağlamak için YZ modellerinin fiziksel iklim modelleriyle entegrasyonu konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

5.6 Biyoçeşitlilik ve ekosistem izleme

Biyoçeşitliliğin izlenmesi, yapay zeka ve makine öğreniminin artan bir başarıyla uygulandığı bir diğer kritik alandır. YZ/ML teknikleri, özellikle görüntü tanıma ve veri analizini içerenler, biyoçeşitliliği izlemek, ekosistem sağlığını değerlendirmek ve tür dağılımları ve habitat koşullarındaki değişiklikleri izlemek için kullanılmaktadır. Bu teknikler, genellikle manuel veri toplamaya dayanan ve kapsamı ve kapsamı sınırlı olan geleneksel izleme yöntemlerine ölçeklenebilir ve verimli bir alternatif sunmaktadır.

Phillips ve arkadaşları [32] tür dağılım modellemesi için bir makine öğrenimi tekniği olan Maxent algoritmasını geliştirmiş ve bu algoritma o zamandan beri biyoçeşitlilik araştırmalarında yaygın olarak kullanılan bir araç haline gelmiştir. Çalışma, Maxent'in çevresel değişkenlere dayalı tür aralıklarını tahmin etmede Kural Seti Üretimi için Genetik Algoritma (GARP) gibi diğer algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu araştırma, araştırmacıların habitat kaybı ve iklim değişikliği gibi çevresel değişikliklere yanıt olarak tür dağılımlarının nasıl değişeceğini tahmin etmelerine olanak tanıdığından, koruma planlaması ve biyoçeşitlilik yönetimi için önemli çıkarımlara sahiptir.

Norouzzadeh ve diğerleri [30] yaban hayatı izleme amacıyla kamera tuzağı görüntülerini analiz etmek için derin öğrenme algoritmalarından yararlanmıştır. Geliştirdikleri model, hayvan türlerini yüksek doğrulukla otomatik olarak tanımlayıp sınıflandırabilmiş ve manuel görüntü analizi için gereken zaman ve çabayı önemli ölçüde azaltmıştır. Bu yaklaşım, özellikle geleneksel yöntemlerin pratik olmayabileceği uzak veya erişilemeyen bölgelerdeki yaban hayatını izlemek için uygundur.

Benzer bir şekilde, Gonzalez ve arkadaşları [12] orman ekosistemlerindeki yaban hayatı popülasyonlarını izlemek için insansız hava araçlarını (İHA) nesne izleme ve termal görüntüleme gibi yapay zeka teknikleriyle birleştirmiştir. Araştırmacılar, YZ'yi İHA'larla entegre ederek türleri gerçek zamanlı olarak izleyebilmiş ve popülasyon eğilimlerini geleneksel yer tabanlı yöntemlerden daha yüksek doğrulukla belirleyebilmiştir. Bu disiplinler arası yaklaşım, tür dağılımları ve habitat koşulları hakkında gerçek zamanlı veriler sağlayarak yapay zekanın biyoçeşitlilik takibini geliştirme potansiyelini göstermektedir.

Biyoçeşitliliğin izlenmesinde yapay zekanın kullanımı yaban hayatı takibi ile sınırlı değildir. Zhang ve arkadaşları [49], alüminyum ve florür iyonları gibi biyoçeşitliliği etkileyen çevresel kirleticilerin belirlenmesi için floresan bazlı tespit yöntemlerinin geliştirilmesinde makine öğrenimi uygulamasını araştırmıştır. Geliştirdikleri model, geleneksel yöntemlere kıyasla üstün doğruluk ve hassasiyet göstererek yapay zekanın çeşitli bağlamlarda çevresel izleme tekniklerini geliştirme potansiyelini vurgulamıştır.

Bu çalışmalar yapay zekanın biyoçeşitliliğin izlenmesine önemli katkılarını vurgulasa da, hala üstesinden gelinmesi gereken zorluklar vardır. Başlıca zorluklardan biri, makine öğrenimi modellerini eğitmek için büyük, yüksek kaliteli veri kümelerine ihtiyaç duyulmasıdır. Özellikle Küresel Güney'deki birçok bölge, kapsamlı biyoçeşitlilik verilerinden yoksundur ve bu da YZ/ML tekniklerinin bu alanlarda uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, sınırlı veya dengesiz veri kümeleriyle çalışabilen modeller geliştirmeye ve veri kıtlığı olan bölgelerde model performansını iyileştirmek için veri artırma tekniklerinin potansiyelini keşfetmeye odaklanmalıdır.

5.7 Afet yönetimi ve tahmini

Yapay zeka ve makine öğrenimi, geleneksel yaklaşımlara göre önemli iyileştirmeler sundukları afet yönetimi ve tahmininde de uygulanmaktadır. YZ/ML modelleri, uydu görüntüleri, sosyal medya ve sensör ağları gibi çeşitli kaynaklardan gelen büyük miktarda veriyi analiz ederek sel, kasırga ve orman yangınları gibi doğal afetlerin gerçek zamanlı tahminlerini sağlayabilir ve acil durum müdahale ekipleri için karar desteği sunabilir.

Chapi ve diğerleri [6] İran'daki sel duyarlılığını tahmin etmek için Bagging-LMT modelini uygulamıştır. Geliştirdikleri model, yüksek riskli alanları geleneksel yöntemlerden daha yüksek doğrulukla belirleyebilmiş ve afete hazırlık ve risk yönetimi için değerli bir araç sunmuştur. Çalışma, afet ön tahmin modellerinin doğruluğunu artırmak ve karar vericilere kaynak tahsis ve acil durum planlaması için eyleme geçirilebilir içgörüler sağlamak için AI/ML tekniklerinin nasıl kullanılabileceğini göstermektedir.

Bir başka çalışmada, Linardos ve arkadaşları [24] kasırgaların gerçek zamanlı etkilerini değerlendirmek için sosyal medya verilerini uydu görüntüleriyle entegre eden bir makine öğrenimi modeli geliştirmiştir. Geliştirdikleri model, etkilenen bölgeleri belirlemek ve hasarın şiddetini tahmin etmek için sosyal medya paylaşımlarının coğrafi dağılımını analiz edebilmiştir. Bu yaklaşım, AI/ML'nin acil durum müdahale stratejilerini bilgilendirmek için kullanılabilecek gerçek zamanlı, kitle kaynaklı veriler sağlayarak geleneksel afet yönetimi araçlarını artırma potansiyelini göstermektedir. Sosyal medya verilerinin uydu görüntüleriyle entegrasyonu, sahadaki durumun daha kapsamlı bir görünümünü sunarak afet etkilerinin daha hızlı ve daha doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Uddin ve diğerleri [42] sel ve tsunami gibi doğal afetler sırasında kullanılan su kalitesi endeksi (WQI) modellerinde belirsizlik analizi için Monte Carlo simülasyonları ve Gauss Süreci Regresyonu uygulamıştır. Olasılıksal yöntemleri makine öğrenimi ile bütünleştiren bu model, afet olayları sırasında genellikle gürültülü ve eksik olan çevresel verilerin doğasında bulunan belirsizlikleri hesaba katmıştır. Bu yaklaşım, bilinçli kararlar almak için sağlam bir çerçeve sunmaktadır.

Zamanın ve doğruluğun çok önemli olduğu acil durumlarda.

Haridasan ve arkadaşları [15] tarafından yakın zamanda yapılan bir başka çalışmada, evrişimli sinir ağları (CNN'ler) ve temel bileşen analizi (PCA) kullanılarak toprak kaymaları ve depremler gibi doğal tehlikelerin tespit edilmesi ve sınıflandırılması için otomatik bir sistem önerilmiştir. Geliştirdikleri sistem, afete hazırlık ve müdahale için gerekli olan yüksek öngörü doğruluğu ve gerçek zamanlı işleme yeteneklerini ortaya koymuştur. Yapay zeka tekniklerinden yararlanarak, modelleri büyük veri kümelerini gerçek zamanlı olarak işleyebildi ve acil durum müdahale ekiplerine erken uyarılar ve eyleme geçirilebilir içgörüler sağladı.

Bu çalışmalar, yapay zeka ve makine öğreniminin, tahminlerin hızını ve doğruluğunu artırarak ve acil durumlar sırasında karar vermeyi geliştirerek afet yönetiminde devrim yaratma potansiyelini göstermektedir. Bununla birlikte, çeşitli zorluklar devam etmektedir. Başlıca zorluklardan biri, farklı coğrafi bölgelerde afet tahmini için YZ/ML sistemlerinin ölçeklenebilirliğidir. Birçok model, farklı çevresel ve sosyo-ekonomik koşullara sahip diğer alanlara iyi bir şekilde genelleştirilemeyen bölgeye özgü veriler üzerinde eğitilmiştir. Gelecekteki araştırmalar, farklı bölgeler ve afet türleri arasında uygulanabilecek daha uyarlanabilir modeller geliştirmeye odaklanmalıdır. Ayrıca, özellikle veri gizliliği ve karar verme süreçlerinde önyargı potansiyeli konularında, afet yönetiminde yapay zeka kullanımının etik sonuçları hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

5.8 Gelişen teknolojiler ve disiplinler arası uygulamalar

YZ/ML'nin Nesnelerin İnterneti (IoT), insansız hava araçları (İHA'lar) ve büyük veri platformları gibi gelişmekte olan teknolojilerle entegrasyonu, çevresel izleme ve afet yönetimi için yeni olasılıkların önünü açmıştır. Bu disiplinler arası uygulamalar, YZ/ML'nin güçlü yönlerini gelişmiş veri toplama ve işleme teknolojileriyle birleştirerek daha kapsamlı ve gerçek zamanlı çevresel değerlendirmeler yapılmasını sağlamaktadır.

Asha ve arkadaşları [3], hava kalitesini izlemek ve toksik kirleticileri tespit etmek için IoT sensörlerini yapay zeka algoritmalarıyla birleştiren IoT tabanlı Yapay Zeka Teknikleri ile Hava Kirliliği İzleme için Çevresel Toksikoloji (ETAPM-AIT) modelini geliştirmiştir. Sistem, endüstriyel tesislere ve devlet kurumlarına gerçek zamanlı uyarılar sağlamak ve hava kirliliği olaylarına daha hızlı müdahale etmek için tasarlanmıştır. IoT'yi yapay zeka ile entegre eden bu model, gerçek zamanlı çevresel izlemede önemli bir ilerlemeyi temsil ediyor ve hava kirliliğinin etkilerini azaltmak isteyen şehirler ve endüstriler için ölçeklenebilir çözümler sunuyor.

Bir başka disiplinler arası çalışmada, Gonzalez ve arkadaşları [12] uzak orman alanlarındaki yaban hayatı popülasyonlarını izlemek için yapay zeka tabanlı nesne algılama algoritmalarıyla donatılmış insansız hava araçları (İHA'lar) kullanmıştır. İHA'ların YZ ile kombinasyonu, gerçek zamanlı veri toplama ve analizine olanak tanıyarak türlerin dağılımını izlemek ve ekosistem sağlığını izlemek için daha verimli ve doğru bir yol sağladı. Bu yaklaşım, koruma ve arazi yönetimi stratejilerini bilgilendirebilecek gerçek zamanlı içgörüler sağlayarak yapay zekanın geleneksel çevresel izleme yöntemlerini geliştirme potansiyelini göstermektedir.

Tamiminia ve diğerleri [41] uzaktan algılama uygulamalarında büyük veri analizi için Google Earth Engine (GEE) platformunun kullanımı araştırmıştır. Çalışma, GEE platformundaki AI/ML tekniklerinden yararlanarak, arazi örtüsü sınıflandırması ve iklim analizi için büyük ölçekli uydu görüntüsü veri kümelerini işleyebilmiştir. Çalışmaları, büyük miktarda jeo-uzamsal veriyi gerçek zamanlı olarak analiz etmek için AI/ML modellerinin geniş ölçekte kullanılabildiği çevresel izlemede büyük veri platformlarının artan rolünü vurgulamaktadır.

Çevresel izlemede yapay zekanın kullanımı, biyosensörler ve halk sağlığı izleme gibi yeni alanlara doğru da genişlemektedir. Zhang ve arkadaşları [49], alüminyum ve florür iyonları gibi çevresel kirleticiler için floresan bazlı tespit yöntemlerinin geliştirilmesinde makine öğrenimi uygulamasını göstermiştir. Yapay zeka ile geliştirilmiş biyosensörleri, geleneksel tespit yöntemlerine kıyasla üstün doğruluk ve hassasiyet göstererek yapay zekanın çevre sağlığı izleme ve kamu güvenliğini geliştirme potansiyelini vurgulamıştır.

Bu disiplinler arası uygulamalar alanda önemli ilerlemeleri temsil etse de, hala ele alınması gereken zorluklar vardır. Başlıca zorluklardan biri, YZ/ML modellerinin ölçeklenebilirlik ve sağlamlık sağlayacak şekilde gelişmekte olan teknolojilerle entegrasyonudur. Birçok YZ tabanlı sistem, özellikle kaynakların kısıtlı olduğu bölgelerde her zaman mevcut olmayabilecek büyük miktarlarda yüksek kaliteli veri gerektirir. Gelecekteki araştırmalar, düşük kaynaklı ortamlarda etkili bir şekilde çalışabilen daha sağlam ve uyarlanabilir YZ modelleri geliştirmeye odaklanmalıdır. Ayrıca, özellikle veri güvenliği, gizlilik ve algoritmik önyargı potansiyeli konularında, çevresel izleme için YZ tabanlı sistemlerin konuşlandırılmasıyla ilgili etik ve düzenleyici zorluklar hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

5.9 Araştırma kategorizasyonunun iyileştirilmesi

Bu derlemede vurgulandığı gibi, çevresel izlemede YZ ve makine öğrenimi uygulamaları, metodolojik katkılarına, uygulama alanlarına ve disiplinler arası yaklaşımlarına dayalı olarak daha anlamlı bir şekilde kategorize edilebilir. Alana göre basit kategorizasyonların ötesine geçerek (örneğin, hava kalitesi, su kalitesi), bu inceleme aşağıdaki boyutları dikkate alan daha incelikli bir sınıflandırma önermektedir:

1. Metodoloji: Derin öğrenme, topluluk modelleri ve hibrit yaklaşımlar gibi yeni algoritmaların geliştirilmesine odaklanan veya mevcut modellerin yorumlanabilirliğini ve ölçeklenebilirliğini artıran çalışmalar.
2. Gerçek zamanlı: Çevresel parametrelerin sürekli izlenmesini sağlamak için AI/ML'yi IoT ağları, sensör dizileri ve İHA'lar gibi gerçek zamanlı veri toplama sistemleriyle entegre eden araştırmalar.
3. Büyük veri ve uzaktan algılama: Özellikle arazi kullanımı izleme, iklim değişikliği modelleme ve afet yönetimi gibi uygulamalar için büyük ölçekli çevresel verileri analiz etmek üzere büyük veri platformlarından ve uzaktan algılama teknolojilerinden yararlanan makaleler.
4. Disiplinlerarası: Karmaşık çevresel zorlukları yeni yollarla ele almak için AI/ML'nin biyosensörler, halk sağlığı ve vahşi yaşamı koruma gibi diğer alanlarla kesişimini araştıran çalışmalar.

Literatürü bu boyutlara göre düzenleyerek, her bir çalışmanın katkısı ve sınırlamaları hakkında daha derin bir anlayış kazanılması beklenmektedir. Örneğin, gerçek zamanlı izleme sistemlerine odaklanan makaleler ölçeklenebilirliklerine, veri doğruluklarına ve gerçek zamanlı olarak eyleme geçirilebilir içgörüler sağlama yeteneklerine göre değerlendirilebilir. Benzer şekilde, AI/ML metodolojileri üzerine yapılan araştırmalar da yenilikçilik, genelleştirilebilirlik ve farklı çevresel bağlamlara uygulanabilirlik açısından değerlendirilebilir. Bu rafine kategorizasyon, literatürdeki boşlukların tespit edilmesine de olanak sağlamaktadır. Örneğin, YZ'nin hava ve su kalitesinin izlenmesine uygulanmasında önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da, çevresel veri yönetimi için YZ'nin kuantum hesaplama veya blok zinciri gibi gelişmekte olan teknolojilerle entegre edilmesine yönelik nispeten az araştırma bulunmaktadır.

Gelecekteki araştırmalar, çevresel izleme ve yönetim için yeni olasılıkların kilidini açmak üzere bu disiplinler arası alanları keşfetmeye odaklanmalıdır.

6 Çalışma sınırlamaları

Bu çalışmanın kapsamlı doğasına rağmen, bazı sınırlamalar kabul edilmelidir. Bu çalışmada yapılan bibliyometrik analizde öncelikle Scopus veri tabanı kullanılmıştır; bu veri tabanı kapsamlı olmakla birlikte, özellikle İngilizce olmayan dillerdeki veya bölgesel dergilerdeki yayınlar olmak üzere ilgili tüm literatürü kapsamayabilir. Bu sınırlama, daha az öne çıkan araştırma bölgelerinden veya İngilizce konuşulmayan ülkelere gelen önemli katkılar göz ardı edilmesine neden olabilir. Gelecekteki araştırmalar, literatürün daha kapsamlı bir incelemesini sağlamak için Web of Science, IEEE Xplore ve Google Scholar gibi ek veri tabanlarını dahil ederek analizi genişletebilir. Bu çalışma da dahil olmak üzere bibliyometrik analizlerin genellikle bir çalışmanın etkisinin ölçüsü olarak atıf sayılarına dayandığını belirtmek gerekir. Ancak, atıf uygulamaları disiplinler ve bölgeler arasında büyük farklılıklar gösterebilir ve yüksek atıf alan makaleler her zaman en yenilikçi veya etkili araştırmaları temsil etmeyebilir. Ayrıca, atıf birikimindeki zaman gecikmesi nedeniyle yeni çalışmalar yeterince temsil edilmeyebilir. Altmetrics gibi alternatif ölçütlerin dahil edilmesi, araştırma etkisinin daha dengeli bir görünümünü sağlayabilir. Ayrıca, analiz, Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa gibi belirli bölgeleri çevresel izleme alanında YZ/ML araştırmalarına büyük katkı sağlayan ülkeler olarak tanımlamıştır. Bununla birlikte, genellikle çevresel zorluklara karşı en savunmasız olan gelişmekte olan bölgelerden gelen araştırmaların temsili sınırlıdır. Bu dengesizlik, küresel kapasite geliştirme girişimlerine ve önde gelen araştırma ülkeleri ile yeterince temsil edilmeyen bölgeler arasında işbirliğine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

7 Sonuç

7.1 Temel bulguların özeti

Bu bibliyometrik analiz, çevresel izleme ve veri analizi için yapay zeka (AI) ve makine öğrenimi (ML) tekniklerinin uygulanmasında araştırma ortamına kapsamlı bir genel bakış sağlamıştır. Çalışma birkaç önemli bulguyu ortaya çıkarmıştır:

- Çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi ile ilgili yayınların ve atıfların sayısı, özellikle 2010'ların sonlarından bu yana önemli bir artış göstermiştir. Bu eğilim, karmaşık çevresel zorlukların ele alınmasında bu teknolojilerin dönüştürücü potansiyelinin artan ilgisini ve tanınmasını yansıtmaktadır.
- Bu alandaki araştırma katkıları küresel olarak dağılmış olup, Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan, Birleşik Krallık ve İtalya önde gelen ülkeler olarak ortaya çıkmaktadır. Uluslararası işbirliği ağları, bilgi paylaşımının ilerletilmesinde ve disiplinler arası araştırmaların teşvik edilmesinde önemli bir rol oynamıştır.
- Yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri, hava kalitesi izleme, su kalitesi değerlendirmesi, iklim değişikliği modellemesi, biyoçeşitlilik izleme ve afet yönetimi dahil olmak üzere çeşitli çevresel izleme alanlarında uygulanmıştır. Araştırmacılar, çevresel izleme ve veri analizinin doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için topluluk modelleri, hibrit yaklaşımlar ve gelişmiş bilgisayarla görme teknikleri gibi çeşitli metodolojiler geliştirmiş ve rafine etmişlerdir.
- Yapay zeka ve makine öğreniminin Nesnelerin İnterneti (IoT), insansız hava araçları (İHA'lar) ve pasif akustik izleme gibi gelişmekte olan teknolojilerle entegrasyonu, çevresel izleme için yeni yollar açmıştır. Buna ek olarak, bu tekniklerin uygulanması biyosensörler, hastalık tespiti ve halk sağlığı izleme dahil olmak üzere disiplinler arası alanlara doğru genişlemiştir.
- Google Earth Engine (GEE) gibi platformların ortaya çıkışı ve büyük verinin artan kullanılabilirliği, büyük ölçekli çevresel veri analizini kolaylaştırmış ve karmaşık modellerin ve ilişkilerin keşfedilmesini sağlamıştır. Derin öğrenme ve sinir ağı teknikleri, bu geniş veri kümelerinin işlenmesinde ve değerli içgörülerin çıkarılmasında etkili olduklarını göstermiştir.

7.2 Gelecekteki araştırmalar için öneriler

Bu bibliyometrik analizin bulgularına dayanarak, çevresel izleme ve veri analizi için yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamaları alanında gelecekteki araştırmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Çevresel izlemenin karmaşık zorluklarını ele almak için çevre bilimi, bilgisayar bilimi, mühendislik ve halk sağlığı araştırmacıları arasında disiplinler arası işbirliklerini teşvik etmek kritik öneme sahiptir. Bu ortaklıklar daha yenilikçi ve bütüncül yaklaşımlara yol açacak, yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarının gerçek dünyadaki çevresel zorlukları birden fazla perspektiften karşılayacak şekilde düzenlenmesini sağlayacaktır. Örneğin, Asha ve diğerleri [3] tarafından yapılan çalışma, endüstriyel hava kirliliğini izlemek için IoT sensörlerinin YZ modelleriyle başarılı bir şekilde entegrasyonunu vurgulamakta ve disiplinler arası çabaların gerçek zamanlı izleme çözümleriyle nasıl sonuçlanabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, Gonzalez ve arkadaşlarının [12] İHA'ları YZ tabanlı yaban hayatı izleme sistemleriyle birleştiren çalışması, biyoçeşitlilik kaybı gibi karmaşık çevresel sorunların ele alınmasında disiplinler arası yaklaşımların potansiyelini güçlendirmektedir.
- Özellikle sınırlı kaynaklara sahip bölgelerde çevresel verilerin kalitesini ve kullanılabilirliğini artırmaya ihtiyaç vardır. Birçok YZ ve makine öğrenimi modeli, etkili bir şekilde çalışmak için büyük hacimlerde yüksek kaliteli verilere dayanır, ancak kırsal veya gelişmekte olan bölgeler gibi sınırlı veri kullanılabilirliğine sahip alanlarda bu modeller düşük performans gösterebilir. Gelecekteki araştırmalar gürültülü, eksik veya önyargılı verilerle başa çıkabilen sağlam YZ ve makine öğrenimi teknikleri geliştirmeye odaklanmalıdır. Bu, birden fazla kaynaktan gelen verileri birleştiren gelişmiş veri füzyon yöntemlerini ve modelleri veri kıtlığı olan bölgeler için uyarlayan transfer öğrenme tekniklerini içerir. Athanasoulas ve arkadaşları [53] tarafından çevresel simülasyonları geliştirmek için Plegma veri setinin geliştirilmesini araştıran çalışma, açık erişimli, yüksek kaliteli veri setlerinin geliştirilmesinin, yetersiz hizmet alan bölgelerde yapay zeka odaklı çevresel izlemeyi nasıl önemli ölçüde ilerletebileceğini göstererek bu öneriyi desteklemektedir. Ayrıca, Caesary ve diğerleri [54] uygun maliyetli çevresel uygulamalarda veri kalitesini artırmanın önemini vurgulayarak, kaynak sıkıntısı çeken bölgelerdeki veri sınırlamalarını ele almak için bir temel sağlamaktadır.

- YZ ve makine öğrenimi modelleri, yüksek tahmin güçlerine rağmen, genellikle "kara kutu" yapıları nedeniyle eleştirilere maruz kalmaktadır. Bu şeffaflık eksikliği, kararların önemli sosyal ve ekolojik sonuçları olabileceği çevresel izlemede YZ sistemlerine olan güveni ve benimsenmesini sınırlandırabilir. Açıklanabilir YZ (XAI) teknikleri üzerine devam eden araştırmalar, bu modelleri daha şeffaf ve yorumlanabilir hale getirmek için gereklidir. Model karar verme süreçlerinin anlaşılmasını geliştirmek, politika yapıcılar, araştırmacılar ve genel halk dahil olmak üzere paydaşlar arasındaki güveni artıracak ve bu teknolojilerin çevresel karar verme süreçlerinde daha geniş bir şekilde benimsenmesini kolaylaştıracaktır. Açıklanabilir makine öğrenimi yöntemlerini su kalitesi tahmin modellerine entegre eden Lu ve Ma [26] gibi çalışmalar, çevresel uygulamalarda XAI'nin potansiyelini ortaya koymakta ve YZ karar verme sürecini son kullanıcılar için daha anlaşılır ve eyleme dönüştürülebilir hale getirmektedir.
- Veri odaklı YZ yaklaşımlarını çevresel ilkeler ve fiziksel modeller gibi alana özgü bilgilerle birleştirmek, model doğruluğunu ve genelleştirilebilirliğini önemli ölçüde artırabilir. Fizik temelli ilkeleri YZ/ML sistemlerine entegre eden hibrit modeller, daha kapsamlı ve yorumlanabilir çevresel simülasyonlar için umut vaat etmektedir. Bu entegrasyon, özellikle iklim değişikliği ve ekosistem dinamikleri gibi karmaşık çevresel olaylarda modellerin sağlamlığını artıracaktır. Toprak haritalamada CBS'yi uzman bilgisi ve bulanık mantıkla birleştiren Zhu ve arkadaşlarının [51] ilk çalışması, çevre biliminde hibrit modellerin potansiyelini örneklenirerek daha doğru ve bağlama duyarlı simülasyonlara yol açmaktadır. Chapi ve diğerleri [6] sel tahmini için hibrit yapay zeka modelleri uygulayarak makine öğrenimini hidrolojik modellerle birleştirmenin afet yönetiminde tahmin doğruluğunu ve sağlamlığını nasıl artırabileceğini göstermiştir.
- Gelişmiş sensörler, kuantum bilişim ve yeni yapay zeka algoritmaları gibi gelişmekte olan teknolojilerin sürekli araştırılması, çevresel izleme için yeni yetenekler sunmaktadır. Bu teknolojiler gerçek zamanlı, büyük ölçekli veri analizini mümkün kılabilir ve çevresel tahmin ve yönetim için yeni potansiyellerin kilidini açabilir. Örneğin, Anees ve arkadaşlarının (2024) fracking dinamikleri üzerine yaptığı çalışma, çevresel tehlikeleri etkili bir şekilde yönetmek için büyük hacimli verileri gerçek zamanlı olarak işleyebilen ölçeklenebilir YZ modellerine duyulan ihtiyacın arttığını göstermektedir. Buna ek olarak, Asha ve diğerleri [3] tarafından araştırıldığı üzere YZ'nin IoT ile entegrasyonu, YZ destekli sensör ağlarının endüstriyel kirlilik yönetiminden kentsel hava kalitesi izlemeye kadar çeşitli bağlamlarda kullanılabilecek ölçeklenebilir, gerçek zamanlı çevresel izleme sistemleri sunma potansiyelini vurgulamaktadır.
- YZ teknikleri çevresel izlemenin ayrılmaz bir parçası haline geldikçe, şeffaflık, adalet ve hesap verebilirliğe öncelik veren sorumlu YZ çerçeveleri geliştirmek çok önemlidir. Araştırmacılar, YZ sistemlerindeki potansiyel önyargıları ele almalı ve bu teknolojilerin mevcut eşitsizlikleri güçlendirmemesini sağlamalıdır. Etik YZ uygulamaları, özellikle hassas toplulukları veya ekosistemleri etkileyen uygulamalarda çevresel izlemeye entegre edilmelidir. Phillips ve arkadaşlarının [32] Maxent kullanarak tür dağılım modelleri üzerine yaptığı çalışma, oldukça etkili olmakla birlikte, özellikle koruma kararlarında kullanıldığında şeffaflıktan yoksun olabilecek YZ modellerine güvenmenin etik kaygılarını da vurgulamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu bağlamlarda kullanılan YZ modellerinin yalnızca doğru değil, aynı zamanda hesap verebilir ve adil olmasını sağlamalıdır. Sınırlı kaynaklara veya veri kullanılabilirliğine sahip bölgelerde, YZ sistemlerinde çarpık çevresel tahminlere veya adaletsiz kaynak yönetimi kararlarına yol açabilecek önyargılardan kaçınmak için çaba gösterilmelidir.
- Küresel işbirliği ve veri paylaşımı, çevresel izleme alanında yapay zeka ve makine öğrenimi alanını ilerletmek için çok önemlidir. Araştırmacılar, çevresel veri setlerini daha erişilebilir hale getirerek ve uluslararası ortaklıkları teşvik ederek, farklı bölgeler ve çevresel bağlamlar arasında daha genelleştirilebilir ve uygulanabilir modeller geliştirebilirler. Cao ve arkadaşlarının [55] bölgeler arası veri entegrasyonu yoluyla hava kalitesi izlemenin küresel doğasını ele alan çalışması, gelişmiş veri paylaşımı uygulamalarına duyulan ihtiyacın altını çizmektedir. Benzer şekilde, Tamiminia ve diğerleri [41] Google Earth Engine (GEE) gibi küresel platformların büyük ölçekli çevresel veri analizini kolaylaştırarak ülkeler ve disiplinler arasında işbirliğine olanak sağlama potansiyelini vurgulamıştır.
- İklim değişikliği nedeniyle artan doğal afet sıklığı, yalnızca doğru değil aynı zamanda değişen çevresel koşullara uyarlanabilen YZ modellerini gerektirmektedir. Gelecekteki araştırmalar, yeni veri girdilerine ve çevresel değişikliklere gerçek zamanlı olarak uyum sağlayabilen YZ sistemleri oluşturmaya odaklanmalıdır. Haridasan ve diğerlerinin [15] heyelan tespiti ve Uddin ve diğerlerinin [42] sel tahmini çalışmalarında görüldüğü gibi, afet yönetiminde YZ'nin uygulanması, bu sistemlerin erken uyarılar sağlama ve doğal afetlerin etkilerini azaltmaya yardımcı olma potansiyelini göstermektedir. Bununla birlikte, yeni afet türlerine veya öngörülemeyen çevresel değişikliklere uyum sağlayabilen, uzun vadeli uygunluk ve etkinlik sağlayan modellere ihtiyaç vardır.

7.3 Son düşünceler

Bu bibliyometrik analiz, çevresel izleme ve veri analizinin geliştirilmesinde yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerinin kayda değer ilerlemesini ve dönüştürücü potansiyelini ortaya koymuştur. Bulgular, bu alanın multidisipliner doğasını ve kritik çevresel zorlukların ele alınmasında dünya çapındaki araştırmacıların işbirliğine dayalı çabalarını vurgulamaktadır.

Dünya iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve kaynakların tükenmesi gibi acil sorunlarla yüzleşirken, yapay zeka ve makine öğrenimi teknolojilerinin entegrasyonu, karar verme için doğru ve zamanında bilgi sağlamada, etkili azaltma stratejileri sağlamada ve sürdürülebilir çevre yönetimi uygulamalarını teşvik etmede çok önemli bir rol oynayacaktır.

Önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, çevresel izlemede yapay zeka ve makine öğrenimi alanı dinamik ve sürekli gelişen bir alan olmaya devam etmektedir. Bu teknolojilerin tam potansiyelini ortaya çıkarmak ve daha sürdürülebilir ve çevresel açıdan dirençli bir geleceğin yaratılmasına katkıda bulunmak için sürekli araştırma, yenilik ve işbirliği şart olacaktır.

Yazar katkıları Tüm yazarlar makale metnini yazmış ve gözden geçirmiştir. N.N. şekilleri hazırlamıştır. E.A fikri kavramsallaştırdı ve verileri topladı.

Fon Yazarlar bu makale için fon almadıklarını teyit etmektedirler.

Veri mevcudiyeti Mevcut çalışma sırasında herhangi bir veri seti oluşturulmamış veya analiz edilmemiştir.

Beyanlar

Rekabet eden çıkarlar Yazarlar rekabet eden çıkar beyan etmemektedir.

Açık Erişim Bu makale, orijinal yazar(lar)a ve kaynağa uygun şekilde atıfta bulunduğunuz, Creative Commons lisansına bir bağlantı verdiğiniz ve değişiklik yapıp yapılmadığını belirttiğiniz sürece, herhangi bir ortam veya formatta kullanım, paylaşım, u y a r l a m a , dağıtım ve çoğaltmaya izin veren Creative Commons Attribution 4.0 Uluslararası Lisansı altında lisanslanmıştır. Bu makalede yer alan görseller veya diğer üçüncü taraf materyalleri, aksi belirtilmedikçe, makalenin Creative Commons lisansına dahildir. Materyal, makalenin Creative Commons lisansına dahil değilse ve kullanım amacınız yasal düzenlemeler tarafından izin verilmiyorsa veya izin verilen kullanımı aşıyorsa, doğrudan telif hakkı sahibinden izin almanız gerekecektir. Bu lisansın bir kopyasını görüntülemek için <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> adresini ziyaret edin.

Referanslar

1. Amani M, Ghorbanian A, Ahmadi SA, Kakooei M, Moghimi A, Mirmazloumi SM, Moghaddam SHA, Mahdavi S, Ghahremanloo M, Parsian S, Wu Q, Brisco B. Uzaktan algılama büyük veri uygulamaları için Google earth engine bulut bilişim platformu: kapsamlı bir inceleme. *IEEE J Selected Top Appl Earth Obs Remote Sens.* 2020;13:5326-50. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>.
2. Aria M, Cuccurullo C. bibliometrix: kapsamlı bilim haritalama analizi için bir R aracı. *J Informet.* 2017;11(4):959-75. <https://doi.org/10.1016/J.JOI.2017.08.007>.
3. Asha P, Natrayan L, Geetha BT, Beulah JR, Sumathy R, Varalakshmi G, Neelakandan S. Yapay zeka teknikleri kullanılarak hava kirliliğinin izlenmesi için IoT destekli çevresel toksikoloji. *Environ Res.* 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112574>.
4. Baas J, Schotten M, Plume A, Côté G, Karimi R. Quan- titatif bilim çalışmalarında akademik araştırmalar için seçilmiş, yüksek kaliteli bir bibliyometrik veri kaynağı olarak Scopus. *Quant Sci Stud.* 2020;1(1):377-86. https://doi.org/10.1162/QSS_A_00019.
5. Bracarense N, Bawack RE, Wamba SF, Carillo KDA. Yapay zeka ve sürdürülebilirlik: bibliyometrik bir analiz ve gelecekteki araştırma yönleri. *Pasifik Asya J Assoc Inform Syst.* 2022;14(2):9. <https://doi.org/10.17705/1pais.14209>.
6. Chapi K, Singh VP, Shirzadi A, Shahabi H, Bui DT, Pham BT, Khosravi K. Taşkın duyarlılığı için yeni bir hibrit yapay zeka yaklaşımı değerlendirmesi. *Environ Model Softw.* 2017;95:229-45. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.012>.
7. Chen G, Li S, Knibbs LD, Hamm NAS, Cao W, Li T, Guo J, Ren H, Abramson MJ, Guo Y. Uzaktan algılama, meteorolojik ve arazi kullanım bilgileri ile Çin genelinde PM2.5 konsantrasyonlarını tahmin etmek için bir makine öğrenme yöntemi. *Sci Total Environ.* 2018;636:52-60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.251>.
8. Chen K, Chen H, Zhou C, Huang Y, Qi X, Shen R, Liu F, Zuo M, Zou X, Wang J, Zhang Y, Chen D, Chen X, Deng Y, Ren H. Yüzey suyu kalitesi tahmin performansının karşılaştırmalı analizi ve farklı makine öğrenimi modelleri kullanılarak temel su parametrelerinin belirlenmesi büyük veriye dayalı. *Water Res.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115454>.
9. Di Q, Amini H, Shi L, Kloog I, Silvern R, Kelly J, Sabath MB, Choirat C, Koutrakis P, Lyapustin A, Wang Y, Mickley LJ, Schwartz J. Yüksek mekansal-zamansal çözünürlüğe sahip bitişik Amerika Birleşik Devletleri genelinde PM2.5 konsantrasyonunun topluluk tabanlı bir modeli. *Environ Int.* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104909>.

10. Forzieri G, Dakos V, McDowell NG, Ramdane A, Cescatti A. İklim değişikliği altında orman direncinin azaldığına dair ortaya çıkan sinyaller. *Doğa*. 2022;608(7923):534–9. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9>.
11. Gibb R, Browning E, Glover-Kapfer P, Jones KE. Ekolojik değerlendirme ve izlemede pasif akustik için ortaya çıkan fırsatlar ve zorluklar. *Methods Ecol Evol*. 2019;10(2):169–85. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13101>.
12. Gonzalez LF, Montes GA, Puig E, Johnson S, Mengersen K, Gaston KJ. İnsansız hava araçları (İHA'lar) ve yapay zeka devrimi- tionizing wildlife monitoring and conservation. *Sensors (İsviçre)*. 2016. <https://doi.org/10.3390/s16010097>.
13. Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. Derin öğrenme. Cambridge: MIT Press; 2016.
14. Grange SK, Lewis AC, Carslaw DC. İki değişkenli korelasyon ve regresyon istatistiklerinin kutupsal grafikleri kullanılarak kaynak paylaştırma ilerlemeleri. *Atmos Environ*. 2016;145:128–34. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2016.09.016>.
15. Haridasan A, Thomas J, Raj ED. Çeltik bitkisi hastalık tespiti ve sınıflandırması için derin öğrenme sistemi. *Environ Monit Assess*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10656-x>.
16. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. İstatistiğin unsurları. Öğrenme. 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>.
17. Haunschild R, Bornmann L, Marx W. Bibliyometri açısından iklim değişikliği araştırmaları. *PLoS ONE*. 2016;11(7): e0160393. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0160393>.
18. Hengl T, De Jesus JM, Heuvelink GBM, Gonzalez MR, Kilibarda M, Blagotić A, Shangguan W, Wright MN, Geng X, Bauer-Marschallinger B, Guevara MA, Vargas R, MacMillan RA, Batjes NH, Leenaars JGB, Ribeiro E, Wheeler I, Mantel S, Kempen B. SoilGrids250m: makine öğrenimine dayalı küresel gridli toprak bilgisi. *PLoS ONE*. 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>.
19. Hill DJ, Minsker BS. Akan çevresel sensör verilerinde anormallik tespiti: veri odaklı bir modelleme yaklaşımı. *Environ Model Softw*. 2010;25(9):1014–22. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.08.010>.
20. Kamyab H, Khademi T, Chelliapan S, SaberiKamarposhti M, Rezania S, Yusuf M, Farajnezhad M, Abbas M, Hun Jeon B, Ahn Y. Su kaynakları yönetiminde yapay zeka ve büyük veri analitiğinin kullanımı için en son yenilikçi yollar. *Results Eng*. 2023;20: 101566. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101566>.
21. Khatami R, Mountrakis G, Stehman SV. Denetimli piksel tabanlı arazi örtüsü görüntü sınıflandırma süreçleri üzerine uzaktan algılama araştırmalarının bir meta-analizi: uygulayıcılar ve gelecekteki araştırmalar için genel kılavuzlar. *Remote Sens Environ*. 2016;177:89–100. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.028>.
22. Lecun Y, Bengio Y, Hinton G. Derin öğrenme. *Nature*. 2015;521(7553):436–44. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
23. Li X, Su J, Wang H, Boczkaj G, Mählknecht J, Singh SV, Wang C. Atık su arıtımında yapay zekanın bibliyometrik analizi: mevcut durum, araştırma ilerlemesi ve gelecek beklentileri. *J Environ Chem Eng*. 2024;12(4): 113152. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.113152>.
24. Linardos V, Drakaki M, Tzionas P, Karnavas YL. Afet yönetiminde makine öğrenimi: yöntem ve uygulamalardaki son gelişmeler- tions. *Mach Learn Knowl Extract*. 2022;4(2):446–73. <https://doi.org/10.3390/MAKE4020020>.
25. Liu X, Lu D, Zhang A, Liu Q, Jiang G. Çevre kirliliğinde veriye dayalı makine öğrenimi: kazanımlar ve sorunlar. *Environ Sci Technol*. 2022;56(4):2124–33. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06157>.
26. Lu H, Ma X. KISA vadeli su kalitesi tahmini için hibrit karar ağacı tabanlı makine öğrenimi modelleri. *Chemosphere*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126169>.
27. Maier HR, Kapelan Z, Kasprzyk J, Kollat J, Matott LS, Cunha MC, Dandy GC, Gibbs MS, Keedwell E, Marchi A, Ostfeld A, Savic D, Solomatine DP, Vrugt JA, Zecchin AC, Minsker BS, Barbour EJ, Kuczera G, Pasha F, Reed PM. Su kaynaklarında evrimsel algoritmalar ve diğer meta sezgisel yöntemler: mevcut durum, araştırma zorlukları ve gelecekteki yönelimleri. *Environ Model Softw*. 2014;62:271–99. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2014.09.013>.
28. Mañana-Rodríguez J. SCImago dergi ve ülke sıralamasının eleştirel bir incelemesi. *Res Eval*. 2015;24(4):343–54. <https://doi.org/10.1093/RESEVAL/RVU008>.
29. Naghibi SA, Pourghasemi HR, Dixon B. İran'da güçlendirilmiş regresyon ağacı, sınıflandırma ve regresyon ağacı ve rastgele orman makine öğrenme modelleri kullanılarak CBS tabanlı yeraltı suyu potansiyeli haritalaması. *Environ Monit Assess*. 2016;188(1):1–27. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5049-6>.
30. Norouzzadeh MS, Nguyen A, Kosmala M, Swanson A, Palmer MS, Packer C, Clune J. Kamera tuzağı görüntülerindeki vahşi hayvanları derin öğrenme ile otomatik olarak tanımlama, sayma ve tanımlama. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2018;115(25):E5716–25. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1719367115>.
31. Palani S, Liong SY, Tkachik P. Su kalitesi tahmini için bir YSA uygulaması. *Mar Pollut Bull*. 2008;56(9):1586–97. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.05.021>.
32. Phillips SB, Aneja VP, Kang D, Arya SP. Kuzey Carolina'daki atmosferik azot birikiminin modellenmesi ve analizi. *Int J Glob Environ Issues*. 2006;6(2–3):231–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
33. Rana R, Kalia A, Boora A, Alfaisal FM, Alharbi RS, Berwal P, Alam S, Khan MA, Qamar O. Yüzey suyu kalitesi değerlendirmesi için yapay zeka- ation, monitoring and assessment. *Su*. 2023;15(22):3919. <https://doi.org/10.3390/W15223919>.
34. Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, Jung M, Denzler J, Carvalhais N, Prabhat N. Veri için derin öğrenme ve süreç anlayışı- güdümlü Dünya sistemi bilimi. *Doğa*. 2019;566(7743):195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>.
35. Ren H, Xia M, Weng L, Hu K, Lin H. Uzaktan algılama görüntü değişikliği için çift dikkat güdümlü çok ölçekli özellik toplama ağı algılama. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sensing*. 2024;17:4899–916. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3362370>.
36. Russell S, Norvig P. Yapay zeka: modern bir yaklaşım. 4. baskı Hoboken: Pearson; 2021.
37. Scott SM, James D, Ali Z. Elektronik burun sistemleri için veri analizi. *Microchim Acta*. 2006;156(3–4):183–207. <https://doi.org/10.1007/s00604-006-0623-9>.
38. Shi, W., Zhang, M., Zhang, R., Chen, S., & Zhan, Z. (2020). Yapay zekaya dayalı değişiklik tespiti: Son teknoloji ve zorluklar. *Uzaktan Algılama içinde* (Cilt 12, Sayı 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12101688>.
39. Subbarayan S, Thiyagarajan S, Karuppannan S, Panneerselvam B. Yeraltı suyu kirlenlik de ğ e r l e n d i r m e s i n i n iyileştirilmesi: Cuddalore bölgesi için üç makine öğrenimi modeli ve beş sınıflandırma şemasının karşılaştırmalı çalışması. *Environ Res*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117769>.
40. Sutton RS, Barto AG. Pekiştirmeli öğrenme: giriş. 2. baskı. Cambridge: MIT Press; 2018.

41. Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, Quackenbush L, Adeli S, Brisco B. Geo-büyük veri uygulamaları için Google earth motoru: bir meta-analiz ve sistematik inceleme. ISPRS J Photogramm Remote Sens. 2020;164:152-70. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>.
42. Uddin MG, Nash S, Rahman A, Olbert AL. makine öğrenimi yaklaşımlarını kullanarak su kalitesi indeks modelindeki belirsizliği tahmin etmek ve öngörmek için yeni bir yaklaşım. Water Res. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119422>.
43. van Eck NJ, Waltman L. Yazılım araştırması: VOSviewer, bibliyometrik haritalama için bir bilgisayar programı. Scientometrics. 2010;84(2):523-38. <https://doi.org/10.1007/S11192-009-0146-3/FIGURES/7>.
44. Villa F, Bagstad KJ, Voigt B, Johnson GW, Portela R, Honzák M, Batker D. Uyarlanabilir ve sağlam ekosistem hizmetleri için bir metodoloji değerlendirilmesi. PLoS ONE. 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091001>.
45. Vitolo C, Scutari M, Ghalaieny M, Tucker A, Russell A. Bayes ağları kullanarak hava kirliliği, iklim ve sağlık verilerinin modellenmesi: İngiltere bölgeleri için bir örnek çalışması. Earth Space Sci. 2018;5(4):76-88. <https://doi.org/10.1002/2017EA000326>.
46. Wang L, Zhang G, Wang Z, Liu J, Shang J, Liang L. Ürün büyümesinin izlenmesinde uzaktan algılama araştırma eğiliminin bibliyometrik analizi: Çin'de bir vaka çalışması. Remote Sens. 2019;11(7):809. <https://doi.org/10.3390/RS11070809>.
47. Yu W, Ye T, Zhang Y, Xu R, Lei Y, Chen Z, Yang Z, Zhang Y, Song J, Yue X, Li S. Günlük ortam ince partikül madde konsantrasyonlarının küresel tahminleri ve nüfus maruziyetinin eşit olmayan mekansal-zamansal dağılımı: bir makine öğrenimi modelleme çalışması. Lancet Planet Sağlık. 2023;7: e209.
48. Yuan Q, Shen H, Li T, Li Z, Li S, Jiang Y, Xu H, Tan W, Yang Q, Wang J, Gao J, Zhang L. Çevresel uzaktan algılamada derin öğrenme: başarılar ve zorluklar. Remote Sens Environ. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>.
49. Zhang Q, Li X, Yu L, Wang L, Wen Z, Su P, Sun Z, Wang S. Alüminyum ve florür iyonlarının sıralı kantitatif tespiti için makine öğrenimi destekli floresan görselleştirme. J Environ Sci (Çin). 2025;149:68-78. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.01.023>.
50. Zhong S, Zhang K, Bagheri M, Burken JG, Gu A, Li B, Ma X, Marrone BL, Ren ZJ, Schrier J, Shi W, Tan H, Wang T, Wang X, Wong BM, Xiao X, Yu X, Zhu JJ, Zhang H. Makine öğrenimi: çevre bilimi ve mühendisliğinde yeni fikirler ve araçlar. Environ Sci Technol. 2021;55(19):12741-54. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.1C01339/ASSET/IMAGES/MEDIUM/ES1C01339_0005.GIF.
51. Zhu AX, Hudson B, Burt J, Lubich K, Simonson D. CBS, uzman bilgisi ve bulanık mantık kullanarak toprak haritalama. Soil Sci Soc Amer J. 2001. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551463x>.
52. Zhuang Y, Liu X, Nguyen T, He Q, Hong S. 1991-2010 yılları arasında küresel uzaktan algılama araştırma eğilimleri: bibliyometrik bir analiz. Scientometrics. 2013;96(1):203-19. <https://doi.org/10.1007/S11192-012-0918-Z/METRICS>.
53. Athanasoulas S, Guasselli F, Doulamis N, Doulamis A, Ipiotis N, Katsari A, Stankovic L, Stankovic V. Plegma veri seti: Ev aletleri- seviyesi ve Yunanistan'dan meta verilerle toplam elektrik talebi, Scientific Data, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03208-0>.
54. Caesary D, Kim H, Nam MJ. Karbonun sosyal maliyetinin olasılık tahminine dayalı karbon yakalama ve depolamanın maliyet etkinliği. Uygulamalı Enerji. 2025;377:124542. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124542>.
55. Cao H, Han L, Liu M, Li L. Makine öğrenimi algoritmasına dayalı olarak enerji tüketiminden kaynaklanan karbon emisyonlarının mekânsal farklılaştırılması: Shaanxi, Çin'de 2015-2020 yılları arasında bir vaka çalışması. Çevre Bilimleri Dergisi. 2025;149:358-73. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.08.007>.
56. Philippe, Mongeon Adèle, Paul-Hus. Web of Science ve Scopus'un dergi kapsamı: karşılaştırmalı bir analiz Scientometrics 2016;106(1):213-228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>.
57. Omar M, Arab MG, Alotaibi E, Alshibli KA, Shanableh A, Elmehdi H, Malkawi DA, Tahmaz A. Doğal zeminlerin kayma mukavemeti tahmini: morfolojik veri merkezli bir yaklaşım. Soils and Foundations. 2024;64(6):101527.
58. Omar M, Alotaibi E, Arab MG, Shanableh A, Malkawi DAH, Elmehdi H, Tahmaz A. Güçlendirilmiş zemin taşıma kapasitesi tahmini için doğadan ilham alan yumuşak hesaplamadan yararlanma: verimli tasarım için bir nöro-nomograf yaklaşımı. Uluslararası Geosentetik ve Zemin Mühendisliği Dergisi, 2023;9(4) p.53.
59. Nassif N, Junaid MT, Altoubat S, Maalej M, Barakat S. Fiber Takviyeli Polimer (FRP) Çubuklar ve Beton Arasındaki Bağ Katsayısının Veriye Dayalı Tahmini. Özel Yayın. 2024;360:106-21.
60. Nassif N, Talha Junaid M, Hamad K, Al-Sadoon Z, Altoubat S, Maalej M. Fiber Takviyeli Beton Kirişlerde Kesme ve Eğilme Dayanımlarının Makine Öğrenimi ile Performansa Dayalı Tahmini. Structural Engineering International. 2024;1-6.

Yayınının Notu Springer Nature, yayınlanan haritalardaki yetki iddiaları ve kurumsal bağlantılar konusunda tarafsız kalmaktadır.