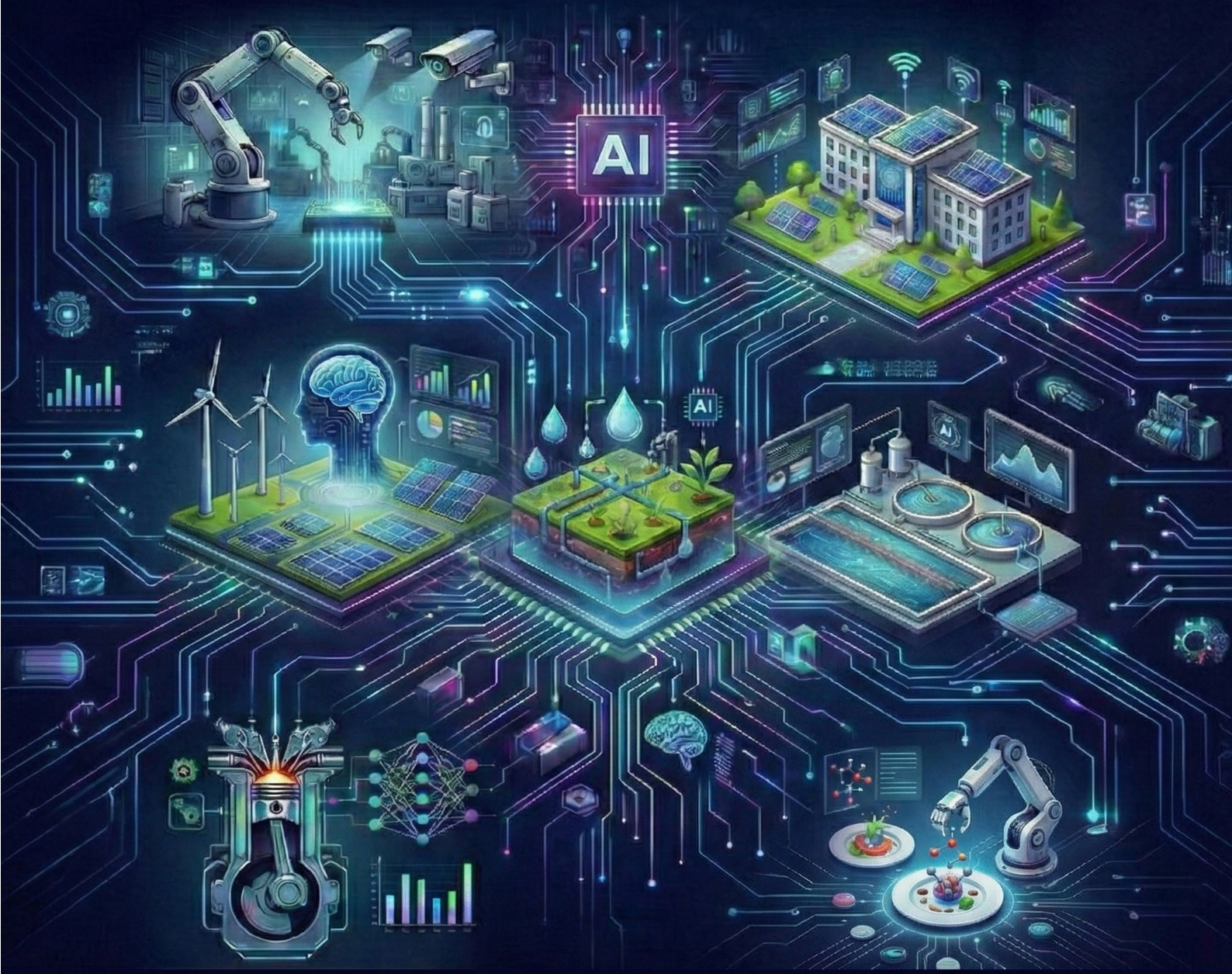


# YAPAY ZEKA ÇALIŞMALARI



## EDİTÖRLER

Prof. Dr. Murat SARIKAYA  
Doç. Dr. Mustafa Kemal BALKİ  
Öğr. Gör. Volkan ÇAVUŞ

# YAPAY ZEKA ÇALIŞMALARI

## EDİTÖRLER

Prof. Dr. Murat SARIKAYA  
Doç. Dr. Mustafa Kemal BALKİ  
Öğr. Gör. Volkan ÇAVUŞ

## BÖLÜM YAZARLARI

Doç. Dr. Dilek GÜMÜŞ  
Doç. Dr. Fatih GÜMÜŞ  
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KARAOĞLU  
Dr. Öğr. Üyesi Güven DEMİRTAŞ  
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TEMÜR  
Dr. Öğr. Üyesi Ozan YILMAZ  
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ŞİMŞEK  
Öğr. Gör. Ali ÇETİNKAYA  
Öğr. Gör. Emre AKMANOĞLU  
Öğr. Gör. Volkan ÇAVUŞ  
Habibe ER  
Özlem GÖNÜL

Akademik unvan ve harf sırası gözetilerek sıralanmıştır.

Bu kitapta yer alan her bölümün tüm sorumluluğu (görseller, tablolar, çizelgeler, çizimler, grafikler, direkt alıntılar, etik/kurum izni vb.) yazarlara aittir.

Herhangi hukuki bir olumsuzlukta Çizgi Kitabevi Yayınları ve kitap editörü hiçbir konuda bir yükümlülük ve hukuki sorumluluğu kabul etmez, hukuki yükümlülük altına alınamaz. Her türlü hukuki yükümlülük ve sorumluluk ilgili bölüm yazar(lar)ına aittir.

Çok bölümlü/yazarlı olan bu kitap maddi bir değer ile alınıp satılamaz. Kitapta yer alan bilgiler alıntı yapılmak ve ilgili alıntıya atıf yapılmak koşulu ile kaynak gösterilmek üzere bilimsel ya da ilgili araştırmacılar tarafından kullanılabilir.

**cizgi**  
K İ T A B E V İ

Çizgi Kitabevi Yayınları (e-kitap)

©Çizgi Kitabevi  
Aralık 2025

ISBN: 978-625-396-758-1  
Yayıncı Sertifika No: 52493

**KÜTÜPHANE BİLGİ KARTI**  
- Cataloging in Publication Data (CIP) -

EDİTÖRLER  
SARIKAYA, Murat | BALKİ, Mustafa Kemal | ÇAVUŞ, Volkan  
YAPAY ZEKA ÇALIŞMALARI

Sayfa Düzeni ve Kapak Tasarımı  
Ozsum Academy  
Tel: +90 541 191 57 41

Baskıya Hazırlık: Çizgi Kitabevi Yayınları  
Tel: 0332 353 62 65- 66

## ÇİZGİ KİTABEVİ

Sahibiata Mah.  
M. Muzaffer Cad. No:41/1  
Meram/**Konya**  
(0332) 353 62 65

Konevi Mh.  
Larende Cad. No:20/A  
Meram/**Konya**  
(0332) 353 62 66

Siyavuşpaşa Mh.  
Gül Sk. No: 15 B  
Bahçelievler/**İstanbul**  
(0212) 514 82 93

[www.cizgikitabevi.com](http://www.cizgikitabevi.com)

[f](#) [t](#) [@](#) /cizgikitabevi

## İÇİNDEKİLER

	<b>İÇİNDEKİLER</b>	iv
	<b>ÖNSÖZ</b>	v
<b>BÖLÜM 1:</b>	<b>YAKIT ENJEKSİYON PARAMETRELERİNİN YSA İLE OPTİMİZASYONU</b> Güven DEMİRTAŞ	1-13
<b>BÖLÜM 2:</b>	<b>YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMINDA YAPAY ZEKADESTEKLİ YAKLAŞIMLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE ANALİZİ</b> Ali ÇETİNKAYA & Mustafa TEMÜR	14-23
<b>BÖLÜM 3:</b>	<b>SU VERİMLİLİĞİ UYGULAMALARINDA YAPAY ZEKA</b> Dilek GÜMÜŞ & Fatih GÜMÜŞ	24-34
<b>BÖLÜM 4:</b>	<b>ALG TEMELLİ ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU İÇİN YAPAY ZEKA UYGULAMALARI</b> Fatih GÜMÜŞ & Dilek GÜMÜŞ	35-46
<b>BÖLÜM 5:</b>	<b>İŞYERİ GÜVENLİĞİNDE YAPAY ZEKA UYGULAMALARI: MAKİNE ÖĞRENİMİ, DERİN ÖĞRENME VE BİLGİSAYAR GÖRME TRENDLERİNE BİBLİYOMETRİK BİR BAKIŞ</b> Süleyman ŞİMŞEK & Habibe ER	47-69
<b>BÖLÜM 6:</b>	<b>YAPAY ZEKÂNIN GASTRONOMİ BİLİMİNE ETKİSİ: YENİLİKÇİ UYGULAMALAR VE SÜREÇLER</b> Emre AKMANOĞLU & Volkan ÇAVUŞ	70-83
<b>BÖLÜM 7:</b>	<b>ÜNİVERSİTE KAMPÜSLERİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İÇİN NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) VE YAPAY ZEKÂ TABANLI ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ</b> Ahmet KARAOĞLU	84-102
<b>BÖLÜM 8:</b>	<b>DİSİPLİNLERARASI EĞİTİMDE STANDARTLAŞMADAN KİŞİSELLEŞTİRMEYE: YAPAY ZEKA TABANLI UYARLANABİLİR ÖĞRENME PLATFORMLARI</b> Ahmet KARAOĞLU	103-115
<b>BÖLÜM 9:</b>	<b>REKREASYON YÖNETİMİNDE YAPAY ZEKA KULLANIMI: AÇIK ALAN DENEYİMLERİNİN DÖNÜŞÜMÜ</b> Ozan YILMAZ & Özlem GÖNÜL	116-128

Bölüme ulaşmak için 

## ÖNSÖZ

Yapay Zeka (YZ), 21. yüzyılın en etkili teknolojik devrimi olarak, yalnızca veri işleme süreçlerini değil; üretimden eğitime, çevre yönetiminden hizmet sektörüne kadar pek çok disiplini köklü bir biçimde dönüştürmektedir. "Yapay Zeka Çalışmaları" başlıklı bu eser, bu dönüşümün çok boyutlu yapısını akademik bir titizlikle ele almayı amaçlamaktadır.

Kitapta yer alan çalışmalar; enerji sistemlerinin optimizasyonundan su verimliliğine, iş yeri güvenliğinden gastronomiye ve eğitimde kişiselleştirilmiş öğrenme modellerine kadar geniş bir spektrumu kapsamaktadır. Eser, yapay zekanın sadece teorik bir kavram olmadığını; sürdürülebilirlik, verimlilik ve karar destek mekanizmalarında nasıl somut çözümler ürettiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji, atıksu yönetimi ve kampüs sürdürülebilirliği gibi konularla çevresel sorunlara dijital çözümler sunulurken; rekreasyon ve gastronomi gibi alanlarla teknolojinin insan deneyimine etkisi irdelenmiştir.

Yapay zeka teknolojilerinin disiplinlerarası uygulanabilirliğini ele alan bu kitabın; akademisyenlere, öğrencilere ve sektör profesyonellerine yeni ufuklar açarak ilham kaynağı olacağına inanıyoruz. Bilimsel birikimlerini bizlerle paylaşarak eserin ortaya çıkmasını sağlayan tüm değerli bölüm yazarlarına ve yayın sürecinde emeği geçen herkese en içten teşekkürlerimizi sunar; çalışmanın bilim dünyasına katkı sağlamasını dileriz.

### EDİTÖRLER


Prof. Dr. Murat SARIKAYA  
Doç. Dr. Mustafa Kemal BALKİ  
Öğr. Gör. Volkan ÇAVUŞ  
Aralık 2025

## BÖLÜM 1

### YAKIT ENJEKSİYON PARAMETRELERİNİN YSA İLE OPTİMİZASYONU

*Güven DEMİRTAŞ*

*Dr. Öğr. Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi,  
guven.demirtas@yobu.edu.tr*

 0000-0001-5341-001x

Küresel enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Buna bağlı olarak tüketilen fosil kökenli yakıtların rezervleri azalmakta ve çevre kirliliği de artmaya devam etmektedir (Söyler, Balki ve Sayin, 2025). Fosil kökenli yakıtların önemli bir kısmı içten yanmalı motorlarda kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar, bilhassa otomotiv, denizcilik, enerji üretimi ve tarım sektöründe hala yaygın şekilde kullanılmaya devam etmektedir (Söyler, 2025). Çevre kirliliği ve fosil yakıt kaynaklarının azalması konusunda yaşanan endişeler, otomotiv sektöründe daha verimli, daha çevreci, sürdürülebilir ve daha yüksek performansa sahip motor sistemlerini geliştirmeye zorlamaktadır (Odufuwa, Tartibu ve Kusakana, 2025). Çevreci ve sürdürülebilir çözümlerden biri biyodizel, LPG, CNG gibi alternatif yakıtların kullanılmasıdır (Karaoğlu ve Söyler, 2025; Söyler and Balki, 2025). Ancak, alternatif yakıtlar bu soruna tek başına çözüm olmamaktadır. Bununla birlikte motor sistemlerinin geliştirilmesi, motor karakteristiklerinin (yanma, performans ve emisyonlar) iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Yanma, performans ve egzoz emisyonları, motorun yapısal ve işletme parametrelerinden etkilenmektedir. Motorun püskürtme basıncı, süresi, zamanlaması veya enjeksiyon kademeleri gibi işletme parametrelerinin optimizasyonu verimliliği etkileyen önemli bileşenler arasındadır.

Geleneksel olarak çalıştırılan (mekanik enjeksiyonlu motorlar) içten yanmalı motorlarda enjeksiyon optimizasyonu, deneme yanılma prensibine göre yapılmaktadır. Ancak, yapılan bu optimizasyon sürecinde tek bir parametre değiştirilerek sonuçlar gözlemlenir. Diğer parametrelerinde değiştirilerek sonuçlarının alınması gerekir. Ayrıca, birden fazla değişkenin etkilerini gözlemleyebilmek için bu değişkenlerin kombinasyonlarının denenmesi gerekmektedir. Çok sayıda ve karmaşık olan motor parametrelerinin değiştirilmesi yetersiz, zaman alıcı ve maliyetli olmaktadır (Sun et al., 2024). Daha yüksek performansın elde edilebilmesi, temiz ve verimli bir yanmama hedeflerine ulaşabilmek için motor kontrol üniteleri (ECU) ve bu sistemi yöneten yazılımlar kritik bir bileşenedir. ECU çok sayıda parametreyi sensörler yoluyla izleyerek takip eder ve gerekli ayarlamaları yaparak motorun çalışmasını optimize eder. Söz konusu parametreler arasında yakıt enjeksiyonu ile ilgili olanlar özellikle önem arz etmektedir. Bunun nedeni yanma sürecinin verimliliği ve kalitesinin bu parametrelerden doğrudan etkilenmesidir.

Bir motorun farklı çalışma koşullarında (farklı yük ve hız) optimum performans gösterebilmesi için, enjeksiyon parametrelerinin her bir için ayrı ayrı haritalar oluşturulur. Örneğin yalnızca enjeksiyon basıncı için motorun hızına ve yüküne bağlı çok sayıda ve farklı noktada test ve kalibrasyon gerektirmektedir. Bu durum, zaman ve maliyet arttırmaktadır. Buna ilaveten, bu teknik ile bulunan çözümler genellikle yerel optimumlar olarak kalmakta, motorun tüm çalışma aralığındaki bütüncül optimum performansı sağlamayı zorlaştırmaktadır.

Yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemlerindeki gelişmeler, mühendislik problemlerine yeni bir kolaylık getirmiştir. Bazı optimizasyon problemlerinde canlıların davranışları temel alınarak sezgisel algoritmalar oluşturulabilmektedir (Çavuş ve Tuncer, 2017). Bazı uygulamalarda ise insan beyninin mantığını kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biri olan Yapay Sinir Ağları (YSA) insan beyninin öğrenme mekanizmasından yola çıkan, verilerdeki kompleks ve lineer olmayan ilişkileri öğrenme konusunda mükemmel bir yeteneğe haizdir. Yakıt enjeksiyon sistemleri de doğası gereği lineer olmayan dinamikleri içerdiğinden dolayı YSA'lar bu sistemlerin davranışını modellemek ve akabinde bu modeller üzerinden optimizasyon gerçekleştirmek için ideal bir araç olarak gözükmektedir. YSA alt yapısına dayalı olan modeller, motor testlerinden veya ileri düzey simülasyonlardan oluşturulan verilerle eğitildikten sonra, fiziksel bir motora ihtiyaç duyulmadan, farklı enjeksiyon stratejilerinin yanma, egzoz emisyonları ve motor performansı gibi çıktılar üzerindeki etkilerini saniyeler içinde tahmin edebilir (Dey et al., 2021).

Bu çalışmanın amacı, YSA'ların yakıt enjeksiyon stratejilerinin optimizasyonu sürecine nasıl entegre edildiğini teorik bir şekilde ve akademik derinlikte ortaya koymaktır.

## **1. YAKIT ENJEKSİYON SİSTEMLERİ VE PARAMETRELERİNİN TEMELLERİ**

Yakıt enjeksiyon sistemleri, içten yanmalı motorlarda yakıt-hava karışımının en iyi şekilde teşkilini sağlamak, maksimum verim, güç, yakıt tasarrufu ve düşük emisyon değerleriyle yanma sürecini sağlamak için tasarlanmış karmaşık sistemlerdir. Daha önce benzinli araçlarda kullanılan karbüratörlü sistemlerin yerini alan bu sistemler, temelde bir yakıt deposu, yakıt pompası, enjektörler ve sistemin beyni konumundaki ECU'dan oluşmaktadır. Yakıt enjeksiyon sisteminin verimli bir şekilde çalışması, motor performansını doğrudan etkileyen bir dizi kritik parametreye bağlıdır. Bu parametreler içerisinde en önemli olanları; enjeksiyon zamanlaması enjeksiyon süresi (açık kalma süresi veya enjeksiyon genişliği) ve püskürtme basıncıdır. ECU, hava akış sensörü, krank ve eksantrik mili konum sensörleri, gaz kelebeği konum sensörü ve lambda sondası gibi sensörlerden gelen verileri sürekli işleyerek, motorun her koşulda ihtiyaç duyduğu ideal yakıt miktarını ve püskürtme zamanını belirler. Örneğin hızlanma anında daha zengin bir karışım sağlanırken, sabit hızda seyir halinde daha fakir ve ekonomik bir yakıt-hava karışımı oluşturulur. Sonuç olarak, yakıt enjeksiyon sistemlerindeki bu parametrelerin hassas bir şekilde kontrol edilmesiyle, motorun çalışma verimliliğini ve çevre daha az zararlı olmasını mümkün kılmaktadır (Liang *et al.*, 2024). İçten yanmalı motorlarda yakıt enjeksiyon sistemlerinde optimizasyonu

yapılacak sistemlerin ve parametrelerin derinlemesine anlaşılması gerekmektedir. Optimizasyon işleminde önemli olan yakıt sistemi bileşenleri aşağıdaki gibidir.

### 1.1. Ortak Yakıt Rayı (Common Rail)

Ortak Yakıt Rayı, modern dizel motorlarda kullanılan, yüksek basınçlı yakıt enjeksiyon teknolojisidir. Geleneksel sistemlerden farklı olarak, yakıtın yüksek basınca getirilmesi ve depolanması işlevlerini birbirinden ayıran bu sistem, dizel motorların performansını, verimliliğini arttırmış ve egzoz emisyonlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, geleneksel dizel motorlarda meydana gelen dizel vuruntusu sesi, common rail sisteminde büyük ölçüde azaltılmaktadır. Bunun nedeni, enjeksiyonun çok hızlı ve kontrol altında olması, ayrıca ön enjeksiyon (pilot enjeksiyon) yapılabilmesidir. Ana yakıt miktarından önce çok küçük bir miktar yakıt püskürterek yanma odasındaki sıcaklık ve basıncın yükselmesi sağlanır, böylece ana enjeksiyon daha yumuşak ve sessiz bir yanma sağlamaktadır.

### 1.2. Enjektörler

Sistemin en kritik ve görünür elemanlarıdır. Yakıt pompasından gelen yüksek basınçlı yakıtı, ECU'nun komutlarına bağlı olarak elektromanyetik bir valf aracılığıyla püskürtür. Enjektörler yakıtı atomize (pülverize) ederek emme manifolduna ya da doğrudan yanma odasına (Direkt Enjeksiyon) püskürterek yakıtın buharlaşmasını, hava ile karışmasını ve verimli yanmasını sağlamaktadır.

### 1.3. ECU

ECU, motorun ve aracın farklı bölgelerindeki sensörlerden (hava akış metre, oksijen sensörü, krank mili konum sensörü, gaz kelebeği konum sensörü, vb.) sürekli veri toplamaktadır. Bu verileri milisaniyeler içinde işleyerek, **enjektörlere ne kadar süreyle (enjeksiyon süresi/genişliği), ve ne zaman (enjeksiyon zamanlaması) püskürteceğini** hesaplar ve komut verir. Bunun amacı, motorun çeşitli çalışma şartlarında ideal karışım oranını (stokiyometrik oran) yakalamaktır.

### 1.4. Sensörler

Sensörler motorun ve sürücünün davranışını izleyen ve bu fiziksel davranışları elektrik sinyallerine dönüştürerek ECU'ya bilgi veren aygıtlardır. Motorun çalışma şartları ile ilgili bilgiler çeşitli sensörler tarafından ECU'ya gönderilir. ECU bu sinyallere göre püskürtme parametrelerini optimize eder. Krank mili ve kam mili konum sensörü, kütleli hava debisi sensörü (MAF), mutlak basınç sensörü (MAP), gaz kelebeği konum sensörü, lambda (oksijen) sensörü, motor soğutma suyu ve egzoz sıcaklık sensörü, hava sıcaklık sensörü, araç hız sensörü ve vuruş sensörü gibi birçok sensör bulunur. Bu sensörler ECU'ya motorun anlık çalışma koşulları hakkında veri sağlamaktadır.

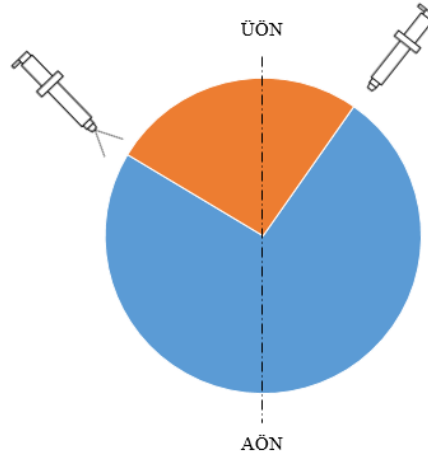
## 2. KRİTİK YAKIT ENJEKSİYON PARAMETRELERİ

Yakıt enjeksiyon parametreleri yapısal ve işletme parametreleri olmak üzere iki grupta incelenebilir. Püskürtme açısı yapısal parametrelerden biridir. Bu konuda yapılan çeşitli optimizasyon çalışmaları literatürde mevcuttur (Balijepalli *et al.*, 2021; Pham *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022; Ahsan and Noman, 2024). Bu çalışmada işletme

parametreleri dikkate alınmıştır. Bu parametreler enjeksiyon zamanlaması, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon miktarı, enjeksiyon süresi ve bölünmüş enjeksiyon stratejileridir. ECU tarafından kontrol edilen ve optimizasyonu yapılan başlıca parametreler aşağıda başlıklar altında verilmiştir.

### 2.1. Enjeksiyon Zamanlaması

Pistonun üst ölü noktaya (ÜÖN) gelişine göre enjeksiyonun ne zaman başlayacağını ve biteceğini belirleyen açısal konumdur. Genellikle derece cinsinden ifade edilir. Erken enjeksiyon başka bir deyişle püskürtme zamanlamasının yüksek olması, yakıtın, piston henüz sıkıştırma zamanının başlarındaiken silindire püskürtülmesi anlamına gelir. Bu, yakıt-hava karışımının daha uzun süre hazırlanmasına olanak tanır. Motor performansı açısından bakıldığında yanma, piston ÜÖN ulaşmadan önce başlayabilir. Bu, negatif iş olarak adlandırılan ve pistonun hareketine tersi yönünde bir kuvvet oluşturur. Bunun sonucu olarak, motor gücü ve torku düşer, mekanik strese ve verimsizlik meydana gelir. Püskürtme avansının çok fazla olması durumunda, silindir içindeki sıcaklık ve basıncın çok yükselmesine ve vuruntulu yanmanın meydana gelmesine neden olur. Egzoz emisyonları yanma sürecinden doğrudan etkilenmektedir. Püskürtme zamanlamasının optimum değerinin dışında olması durumunda, yanma sıcaklığı ve basıncı değişiklik göstermekte, yanma süresi değişmekte ve sonuçta azot oksit (NOx), hidrokarbon (HC), karbonmonoksit (CO), partikül madde (PM) ve is gibi egzoz emisyonlarının bazılarının kötüleşmesine neden olmaktadır.



**Şekil 1.** Püskürtme zamanlaması

Yakıt enjeksiyonunun zamanlaması motordan motora göre değişiklik göstermektedir. Motorun tasarımından motorun çalışma koşullarına ve motorun çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Bir motorun belirlenen püskürtme zamanlamasından daha geç yakıt püskürtülmesi, erken enjeksiyonda olduğu gibi motor performansını ve egzoz emisyonlarını doğrudan etkileyen bir parametredir. Püskürtme avansının azalması yanmanın genişleme strokuna doğru kaymasına neden olur. Dolayısıyla maksimum basıncın olduğu konum ileri bir açıda ve maksimum basınç değerinin düşmesine

neden olmaktadır. Bu durum motor gücünün ve torkunun düşmesine sebep olmaktadır.

## 2.2. Enjeksiyon Basıncı

Yakıtın enjektörlerden püskürtüldüğü basınçtır. Yüksek basınç, yakıtın daha ince zerreciklere (atomizasyon) ayrılmasını ve yanma odası içinde daha homojen dağılmasını (hava-yakıt karışımı) sağlar. Bu da daha verimli, daha temiz ve daha yüksek güçlü bir yanma demektir. Common rail sistemleri, 2000 bar'ın üzerinde basınçlara çıkabilmektedir. Enjeksiyon basıncının da çok düşük ve yüksek olmasının dezavantajları vardır. Sonuçta yanmayı etkileyen parametrelerden biri de püskürtme basıncıdır. Püskürtme basıncının çok düşük olması yakıt damlacık boyutlarının büyük olmasına ve hava-yakıt karışımının kötüleşmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra büyük damlacıkların nüfuz derinliği daha fazladır ve damlacıklar silindir çeperlerine temas ederek buharlaşmaları zorlaştırır. Bu durum eksik ve verimsiz yanma ile sonuçlanarak motor gücünü ve torkunu düşürür, yakıt tüketimi artar ve aşırı zengin ve fakir karışım bölgeleri meydana geldiği için vuruntulu çalırma meydana gelir.

Püskürtme basıncının çok yüksek olması yakıtın çok daha küçük damlacıklara ayrılmasına neden olur. Yüksek enjeksiyon basıncı yakıtın daha iyi atomize olmasına ve daha iyi hava yakıt karışımının oluşmasını sağlamaktadır. Gereğinden yüksek püskürtme basıncı mekanik zorlanmalara gürültüye neden olmaktadır. Common rail gibi modern püskürtme sistemlerinde püskürtme basıncı 3000 bar'a kadar yükseltilebilmektedir(Khan *et al.*, 2024). Yüksek enjeksiyon basıncı birim zamansa silindire sevk edilen yakıt miktarının artmasına neden olur. Bu da ısı salınım oranının ve pik basıncın artmasına neden olur. Aynı zamanda yüksek silindir içi sıcaklığı meydana gelir. Ancak, NO<sub>x</sub> ve gürültü bu durumda artabilir (Khan *et al.*, 2024). Püskürtme basıncının ve hava-yakıt oranının hassas bir şekilde ayarlanması, yanma verimliliğini yükselterek yanma sürecini iyileştirerek motor performansının artmasını ve egzoz emisyonlarının azalmasını sağlar. Püskürtme basıncının YSA ile optimizasyonu bu hassasiyeti sağlayarak hava yakıt karışımının da hassas bir şekilde ayarlanmasına yardımcı olabilir.

## 2.3. Enjeksiyon Miktarı

Günümüz dizel motorlarında ECU, yakıt enjeksiyon miktarını milisaniye hassasiyetinde hesaplayarak motorun performans, verimlilik ve emisyon dengesini doğrudan yönetmektedir ECU, emme havası kütlesi, motor devri, turbo basıncı, yakıt ve soğutma suyu sıcaklığı gibi çok sayıda sensör verisini anlık olarak işleyerek, her silindir için optimum enjeksiyon miktarını ve zamanlamasını belirler. Bu dinamik kontrol sayesinde motor, düşük devirlerde torku artırmak için yakıt miktarını optimize ederken, yüksek devirlerde gücü maksimize edebilir. Sonuç olarak, ECU'nun yakıt enjeksiyonu üzerindeki bu otonom yönetimi, motorun güç çıkışını ve yakıt ekonomisini en üst düzeye çıkarırken, zararlı emisyonları da sıkı mevzuatlara uygun şekilde minimize edebilmektedir(Gogola and Kósa, 2014).

## 2.4. Enjeksiyon Süresi

ECU, yakıt enjeksiyon süresini diğer enjeksiyon parametrelerinde olduğu gibi yüksek hassasiyetle kontrol ederek motorun tork karakteristiği, yakıt verimliliği ve emisyon performansını doğrudan şekillendirmektedir. ECU, motor devri, yük talebi, basınç ve sıcaklık verilerini dikkate alarak, ana enjeksiyon süresini milisaniye düzeyinde optimize eder. Düşük devirlerde yüksek tork elde etmek için enjeksiyon süresi artırılırken, yüksek devirlerde gücü sürdürmek için daha kısa ancak yüksek basınçlı enjeksiyon stratejileri kullanılmaktadır. Enjeksiyon süresinin doğru ayarlanması, yanmanın sürecinin kontrolüne olanak tanımaktadır. Sonuç olarak, ECU'nun enjeksiyon süresi üzerindeki dinamik hakimiyeti, motorun her çalışma koşulunda maksimum verimlilikle performans sergilemesini, aynı zamanda çevre dostu bir yanma profili oluşturmasını sağlamaktadır.

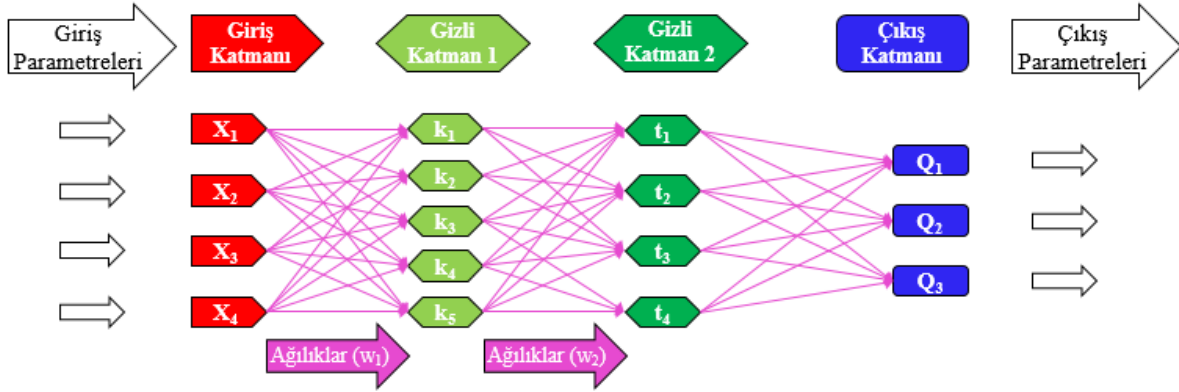
### **2.5. Bölünmüş Enjeksiyon Stratejisi**

Dizel motorlarda ECU tarafından uygulanan bölünmüş enjeksiyon stratejisi (pilot, ana ve art enjeksiyon), motor performansını, verimliliği ve egzoz emisyonlarını optimize etmek için önemli bir rol oynamaktadır. ECU, sensörlerden aldığı motor yükü, motor devri, sıcaklık ve egzoz emisyon verilerine göre, her enjeksiyon fazının miktarını, zamanlamasını ve aralığını şartlara göre anlık olarak ayarlar. Pilot enjeksiyon ile önce silindir içinde küçük bir basınç ve sıcaklık artışı sağlanarak ana enjeksiyonda yakıtın daha yumuşak ve kontrollü bir şekilde yanması tetiklenir. Bu sayede vuruntu ve gürültü önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Ana enjeksiyon, tork ve güç üretiminden sorumlu olup, ECU tarafından yük talebine göre hassas bir şekilde ayarlanmaktadır. Art enjeksiyon ise, egzoz sıcaklığını yükselterek partikül filtresi rejenerasyonunu aktifleştirir ve yanmayı tamamlayarak emisyonları düşürür. Bu çok fazlı yaklaşım, özellikle NOx ve partikül madde arasındaki denge ilişkisini yönetmede esneklik sağlamaktadır. Pilot enjeksiyon ile partikül üretimi azaltılırken, ana enjeksiyonun zamanlaması ile NOx oluşumu kontrol edilebilmektedir. Böylece, ECU'nun bölünmüş enjeksiyon stratejisi üzerindeki ileri seviye kontrolü ile güç, tork yakıt tüketimi ve termik verim gibi motor performansını iyileştirirken, zararlı egzoz emisyon değerlerini de düşürmektedir (Jayanth *et al.*, 2025).

### **3. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)**

YSA, insan beyninin bilgi işleme ve öğrenme yapısından esinlenen, makine öğrenmesi ve yapay zekânın temel taşlarından birini oluşturan matematiksel modelleridir. Birbirine bağlı yapay nöron katmanlarından oluşan bu sistemler, büyük ve karmaşık veri kümelerindeki gizli örüntüleri, ilişkileri ve temsil edici özellikleri otomatik olarak keşfedip öğrenebilmektedir. Giriş ve çıkış katmanları arasında yer alan bir veya daha fazla gizli katman sayesinde, doğrusal olmayan problemleri çözme ve yüksek seviyeli soyutlamalar yapma kabiliyetine sahiptir. Günümüzde görüntü ve ses tanıma, doğal dil işleme, otonom sistemler, tıbbi teşhis, finansal tahminler gibi birçok alanda başarıyla uygulanabilmektedir. Biyolojik bir nörona var olan yapıların işleyişi ile benzerlik gösteren YSA'da, girdiler, dendritlerle benzerlik gösterir. İşlem, hücre gövdesi ile benzerlik gösterir ve çıktılar aksonla benzer işlevi gerçekleştirmektedir.

Son zamanlarda motor performansını modellemede YSA uygulamasına ilgi yoğunlaşmıştır. Bu uygulamalar ile içten yanmalı motorlarda yanma özellikleri, performans ve egzoz emisyon davranışının tahmin edilmesinde güçlü araçlar olduğunu ortaya koymaktadır. Bu modeller ile motor performansı ve egzoz emisyonlarının tahmin edildiği çalışmalar literatürde mevcuttur (Çay *et al.*, 2013; Fu *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022; Odufuwa, Tartibu and Kusakana, 2025). YSA'lar yanma parametreleri ve farklı türdeki yakıtların seçiminde de tahmin ve optimizasyon amacıyla kullanılabilir (Balki *et al.*, 2018; Karimmaslak *et al.*, 2021). Şekil 2'de YSA'nın genel yapısı gösterilmiştir.



**Şekil 2.** YSA'nın yapısı

Fiziksel süreçlerde giriş parametreleri çıkış parametrelerinin değerini etkilemektedir. Giriş parametreleri problemin ham verisini oluşturmaktadır. Her bir giriş parametresinden YSA katmanlarından olan giriş katmanının nöronlarına veri sağlanır. Bu aşamada giriş parametreleri ölçeklendirilir ve bir sonraki katmana aktarılır. Her bir nörondaki verilerin ağırlık derecesi (önem derecesi) vardır ve ayarlanan bir parametredir. Ayarlanabilen bir parametre olması öğrenme için önemlidir. Gizli katmanlar problemdeki doğrusal olmayan ilişkileri modelleme kabiliyeti kazandırır. Burada, gizli katman sayısı ve nöron sayısı problemin karmaşıklık derecesine göre artar veya azalır. YSA'larda her nöronun kendi bağımsız ayar parametresi olan bias, ağırlıkla birlikte modelin öğrendiği temel parametredir. Çıkış katmanı modelin son katmanıdır. Sistemde sonuçların tahmini bu parametrede yer alır.

YSA'lar farklı mimarilerde tasarlanabilir. Nöronlar farklı katmanlar halinde düzenlenerek ağırları oluşturur. Tek katmanlı ileri beslemeli ağ ve çok katmanlı ileri beslemeli ağ olmak üzere ikiye ayrılır. Tek katmanlı mimaride sadece girdi ve çıktı katmanı bulunur. Doğrusal olarak ayrılabilir problemleri çözebilir. Çok katmanlı mimaride ise bir veya daha fazla sayıda gizli katman vardır. Gizli katmanlar verilerdeki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenme kabiliyeti sağlamaktadır. Motor modellemede genellikle bu mimari türü kullanılmaktadır.

#### 4. YSA TABANLI YAKIT ENJEKSİYON OPTİMİZASYONU

Günümüz motor kontrol sistemlerinde, özellikle yakıt enjeksiyon optimizasyonunda, YSA'lar giderek daha kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel haritalama tabanlı yaklaşımların tersine, YSA'lar motorun performansını etkileyen çok sayıda değişkenini (motor hızı, motor yükü, emme havası sıcaklığı, emme havası basıncı, egzoz gazı bileşimi) aynı anda analiz ederek en uygun enjeksiyon zamanlamasını ve basıncını, yakıt miktarını ve püskürtme stratejisini gerçek zamanlı olarak belirleyebilir (Sun *et al.*, 2024). Bu, yanma verimliliğini maksimize ederek yakıt tüketimini ve zararlı emisyonları (NOx, partikül madde) önemli ölçüde azaltırken, aynı zamanda motor performansını (tork, güç, termik verim, özgül yakıt tüketimi) artırmayı mümkün kılar (Li *et al.*, 2021; Fu *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2024). YSA, öğrenme ve adaptasyon yetenekleri sayesinde, motor aşınması veya yakıt kalitesi değişiklikleri gibi faktörlere karşı dayanıklılık sağlar ve motorun ömrü boyunca optimum çalışmayı sürdürmesine yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, YSA tabanlı kontrol stratejileri, hem içten yanmalı motorların geleceği hem de hibrit sistemler için vazgeçilmez bir optimizasyon aracı haline gelmiştir. YSA ile motor çıkış parametrelerinin tahmini konusunda birçok çalışma literatürde mevcuttur. Bu çıkış parametrelerinin tahmini neticesinde giriş parametreleri de optimize edilerek motorun en uygun çalışma durumu sağlanabilmektedir.

Sankar, P ve ark. (Sankar *et al.*, 2022) düşük azot ortamlarında yetişen ve biyodizel kaynağı olarak kullanılan *Azolla pinnata* bitkisinden elde edilen biyodizel karışımının motor performansı ve emisyonlarını incelemişlerdir. Yakıtta farklı dozajlarda alümina parçacıkları eklenerek tek silindirli bir dizel motorda farklı yük ve enjeksiyon zamanlamalarında testler gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçları kullanarak YSA ve tepki yüzeyi metodolojisi modelleri geliştirmişler ve bu modellerin fren termik verim, özgül yakıt tüketimi, HC, CO, NOx ve duman çıkışını tahmin etme kabiliyetlerini karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, tepki yüzeyi metodolojisinin R<sup>2</sup> değerlerinin YSA'dan daha doğru tahminler yaptığı sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda tepki yüzeyi metodolojisinin motor performansı ve emisyonlarını da daha doğru bir şekilde tahmin ettiğini belirlemişlerdir. Yakıtın enjeksiyon zamanının da ÜÖN'den önce 26°'de optimum olduğunu belirlemişlerdir.

Enjeksiyon ile ilgili diğer çalışma Liu ve ark. (Liu *et al.*, 2024) tarafından yapılmıştır. Çift yakıt olarak doğal gaz-dizel yakıtının kullanıldığı common rail pilot enjeksiyonlu bir sisteme sahip bir motorda yanma ve emisyon optimizasyonu üzerine yapılan çalışmada, düşük yük koşullarındaki verimsizliği yükseltmek için enjeksiyon stratejilerine odaklanılmıştır. Tarım makinelerinde kullanılan doğal gaz-dizel yakıtının düşük yüklerde silindir içi basınç ve sıcaklığını düşürdüğü ve yakıt tüketimini arttırdığını bildirmişlerdir.

Bu problemin üstesinden gelebilmek için düşük yük şartlarında pilot enjeksiyon stratejisi kullanılarak enjeksiyon basıncı, pilot enjeksiyon zamanlaması ve pilot enjeksiyon miktarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisini araştırmışlardır. Enjeksiyon basıncının artırılması ile kısa sürede ve homojen bir karışım sağlandığı, maksimum silindir içi basıncının arttığı ve tutuşma gecikme

süresinin kısaldığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, is, HC, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ve C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> emisyonlarının azaldığı ve fren termik verimin yükseldiğini gözlemlemişlerdir.

Pilot enjeksiyon zamanlamasının ileri alınması sonucunda ise, yine homojen bir karışım sağlandığı, ana yanma şiddetinin arttığı, maksimum silindir içi basıncın önce arttığı daha sonra azaldığını belirtmişlerdir. İlk ısı salınım oranının azaldığı, ikincisinin ise arttığını ve toplam yanma süresinin kısaldığını belirlemişlerdir. Aynı uygulamada, is, CO ve HC emisyonlarında azalma gözlemlemişlerdir.

Pilot enjeksiyon miktarının arttırılmasında ise, maksimum basınç ve ısı salınımının arttığı, yanma başlangıcı ve yanma merkezini ileri kaydığı, yanma süresini uzattığı, fakat yanma istikrarını iyileştirdiğini saptamışlardır. Buna ilaveten NO<sub>x</sub> emisyonu hariç diğer emisyonlarda azalma sağlamışlardır.

Pilot enjeksiyon parametrelerinin (basınç, zamanlama ve miktar) optimize edilmesiyle, düşük yük koşullarındaki doğal gaz-dizel çift yakıtlı dizel motorun yanma verimliliği artırılabilir, emisyonlar düşürülebilir ve yakıt ekonomisi iyileştirilebildiği sonucuna varmışlardır.

Sharma P ve Sharma A.K. (Sharma and Sharma, 2025) tepki yüzey metodolojisi ile çift yakıtlı bir dizel motorun enjeksiyon parametrelerinin optimizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada motor performansı ve yanma sürecini araştırmışlardır. Pilot yakıt enjeksiyon basıncının 180 bar'dan 240 bar'a çıkarılmasıyla, yüksek viskoziteli atık yağ biyodizelinin daha iyi atomize olması nedeniyle daha iyi yanma sağlayarak fren termik verim ve silindir içi maksimum basıncının iyileştiğini belirlemişlerdir. Enjeksiyon zamanlamasının mevcut 23°'den 27° avansa alınması, tutuşma gecikmesi süresini artırarak düşük enerjili üreteç gazı için daha fazla yanma süresi sağlamış ve bu da fren termik verim ile maksimum silindir içi basıncında iyileşme sağlamıştır. Bununla birlikte, enjeksiyon zamanlamasında daha fazla ileri almanın bir faydası olmadığını rapor etmişlerdir. RSM tabanlı parametrik modelleme, deney döngülerinin sayısını azaltarak insan emeğinden ve deneysel maliyetten ve zamandan tasarruf sağladığını ifade etmişlerdir. Çift yakıtlı motorun, optimize edilmiş motor verimliliği ile çalıştırılmasını sağlayan en uygun çalışma parametrelerinin belirlendiğini bildirmişlerdir.

Foroutani, S. ve ark. (Foroutani *et al.*, 2021) yakıt enjeksiyon zamanlamasının değiştirilmesinin ve sentez gazı eklenmesinin, ağır hizmet tipi bir dizel motorun çıktıları üzerindeki etkisini incelemiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğini çözmek için optimum türbülans modeli, yakıt püskürtme modeli, yanma modeli ve kirlenici emisyon modeli kullanılmışlardır. İncelenen strateji, yakıt enjeksiyon zamanlamasının değiştirilerek ve farklı oranlarda sentez gazının kullanılmasıdır.

Sentez gazı kullanımının emisyonları önemli ölçüde azaltabileceği tespit etmişlerdir. Öte yandan, sentez gazı oranının artırılması ve enjeksiyon zamanlamasının geciktirilmesi **tutuşma gecikmesi süresini ve silindir içi sıcaklığı düşürdüğünü belirlemişlerdir. En düşük CO emisyonu, %40 sentez gazı karışımıyla ve ÜÖN'den 70° önce yapılan enjeksiyon zamanlamasında elde etmişlerdir. Yine en düşük partikül madde emisyonunun %40 sentez gazı karışımıyla ve**

ÜÖN'den 40° önceki enjeksiyon zamanlamasına ait olduğunu belirtmişlerdir. **En düşük CO<sub>2</sub> emisyonu**, %40 sentez gazı karışımıyla ÜÖN'den 10° önce enjeksiyon zamanlamasında görülürken, **en düşük NOx emisyonunun** geleneksel dizel yakıtın ÜÖN'den 10° önce kullanılmasıyla elde etmişlerdir.

Motorun fren **gücü, özgül yakıt tüketimi ve fren termik verimi** gibi performans parametrelerinin, sentez gazı oranı arttıkça azaldığı ve bu parametrelerin **en yüksek değerlerinin, geleneksel dizel yakıtın ÜÖN'den 40° önce enjeksiyon zamanlamasında** sağlandığı belirtilmiştir. Ayrıca, motorun performansını ve emisyonlarını modellemek için standart bir geri yayılım öğrenme algoritmasına dayalı bir **YSA** modeli geliştirilmiştir. Sonuç olarak YSA'ların, tahmin modeli ile simülasyon verileri arasında yüksek korelasyonla motor performansını ve emisyonlarını tahmin etmek için güçlü bir uygulama olduğu sonucuna varmışlardır.

Elumalai, R. ve ark.(Elumalai *et al.*, 2024), %40 amonyak ve %60 biyodizel karışımıyla çalışan, CRDi sistemine sahip çift yakıtlı bir dizel motorun, bölünmüş enjeksiyon parametrelerinin optimizasyonunu üzerine çalışmışlardır. Optimizasyon için tepki yüzeyi metodolojisi ve YSA modelleri kullanılmıştır. Tepki yüzeyi metodolojisi optimizasyon sonuçlarına göre, en iyi performans için pilot enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'den 54° önce, ana enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'den 19° önce ve pilot yakıt kütlelerinin %42 olmasının önerildiği bildirilmiştir. YSA modeli ile yapılan optimizasyon çalışmasında da kabul edilebilir bir hata oranına sahip olduğunu bildirmişlerdir. Sonuçta Tepki yüzeyi metodolojisi ile amonyak-biyodizel karışımli bir motorda bölünmüş enjeksiyon stratejisinin başarıyla optimize edilebileceğini, ve YSA modelinin bu optimizasyon haritasını son derece yüksek doğrulukla tahmin ederek gerçek zamanlı kontrol sistemleri için güçlü bir araç olabileceğini ortaya koyduğunu doğrulamışlardır.

## 5. SONUÇLAR

Literatürdeki ilgili çalışmalar, içten yanmalı motorların performans ve emisyon karakteristiklerinin iyileştirilmesinde, hem yakıt formülasyonu ve katkı maddeleri gibi temel parametrelerin hem de enjeksiyon stratejileri (zamanlama, basınç, pilot enjeksiyon, çoklu enjeksiyon) gibi kontrol değişkenlerinin kritik rol oynadığını göstermektedir. Yapılan araştırmalar, özellikle düşük yük koşullarında veya alternatif/çift yakıt kullanımında, enjeksiyon parametrelerinin optimizasyonunun yanma verimliliğini artırdığını, emisyonları (is, HC, CO) düşürdüğünü ve yakıt ekonomisini iyileştirebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu karmaşık ve çok parametrelili optimizasyon süreçlerinde, geleneksel deneysel ve simülasyon yöntemlerine ek olarak, YSA ve tepki yüzeyi metodolojisi gibi makine öğrenimi tabanlı modelleme ve tahmin araçlarının giderek daha etkin bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu modeller, parametreler arasındaki doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkileri yüksek doğrulukla öğrenebilmekte, optimizasyon sürecini hızlandırmakta ve geliştirme maliyetlerini düşürmektedir. Dolayısıyla, gelecekteki motor tasarımı ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesinde, deneysel veriler ile makine öğrenimi modellerinin entegre bir şekilde kullanılması, sürdürülebilir ve verimli motor çözümlerine ulaşmada temel bir yaklaşım haline gelmektedir.

İçten yanmalı motorların geleceği, giderek sıkılaştıran emisyon regülasyonları ışığında, verimliliğin artırılması ve egzoz emisyonlarının azaltılması ekseninde şekilleneceği, bu bağlamda, çalışmaların aşağıdaki yönlere odaklanması öngörülmektedir.

- **Çoklu-Optimizasyon ve Otonom Kalibrasyon:** Tek bir performans metriği yerine, **güç, verimlilik, emisyon, dayanıklılık ve maliyet** gibi birbiriyle çelişen hedeflerin aynı anda optimize edildiği çok amaçlı algoritmaların kullanımı öne çıkacaktır. ECU kalibrasyonlarının büyük ölçüde otonom yapay zeka sistemleri tarafından gerçekleştirilmesi beklenmektedir.
- **Sentetik ve Hibrit Yakıtlar ile Uyumlu Sistemler:** Karbon içeriği düşük sentetik veya hidrojenin kullanımı artacağı öngörülmektedir.
- **Hibritizasyon Bağlamında Sistem Seviyesi Optimizasyon:** Motor artık bağımsız bir birim olarak değil, elektrik motoru, batarya ve enerji yönetim yazılımı ile birlikte çalışan bir **hibrit sistem bileşeni** olarak optimize edilecektir. Enjeksiyon stratejileri, motoru yalnızca en verimli çalışma noktalarında kullanacak şekilde, genel araç verimliliği maksimize edilecek şekilde belirlenebilir.

Sonuç olarak, içten yanmalı motorun geleceği, mekanik bir sistem olmaktan çok, **yüksek düzeyde dijitalleşmiş, otonom** ve ileri enjeksiyon teknolojileri ile onları destekleyen yapay zeka tabanlı modelleme ve optimizasyon araçlarının yer alacağı söylenebilir.

## KAYNAKÇA

- Ahsan, M. and Noman, M. (2024) 'Improving Internal Combustion Engine Performance through Inlet Valve Geometry and Spray Angle Optimization: Computational Fluid Dynamics Study', *Engineering Proceedings*, 72(1), pp. 4–11. Available at: <https://doi.org/10.3390/engproc2024072006>.
- Balijepalli, R. et al. (2021) 'Numerical investigation of the effect of spray angle on emission characteristics of a diesel engine fueled with natural gas and diesel', *Energy Reports*, 7, pp. 7273–7287. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.10.089>.
- Balki, M.K. et al. (2018) 'Experimental Study and Prediction of Performance and Emission in an SI Engine Using Alternative Fuel with Artificial Neural Network', *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7(1), pp. 58–64. Available at: <https://doi.org/10.18245/ijaet.438048>.
- Çavuş, V., Tuncer, A. (2017) 'İnsansız Hava Araçları İçin Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanarak Rota Planlama', 7(1), pp. 259–265.
- Çay, Y. et al. (2013) 'Prediction of engine performance and exhaust emissions for gasoline and methanol using artificial neural network', *Energy*, 50(1), pp. 177–186. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.052>.
- Dey, S. et al. (2021) 'Comparative study using RSM and ANN modelling for performance-emission prediction of CI engine fuelled with bio-diesohol blends: A fuzzy optimization approach', *Fuel*, 292(October 2020), p. 120356. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120356>.
- Elumalai, R. et al. (2024) 'Development of an ammonia-biodiesel dual fuel combustion engine's injection strategy map using response surface optimization and artificial neural network prediction', *Scientific Reports*, 14(1), pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51023-1>.
- Foroutani, S. et al. (2021) 'Artificial Neural Network Modeling and Numerical Simulation of Syngas Fuel and Injection Timing Effects on the Performance and Emissions of a

- Heavy-Duty Compression Ignition Engine', ACS Omega, 6(48), pp. 32379–32394. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02829>.
- Fu, J. et al. (2022) 'Application of artificial neural network to forecast engine performance and emissions of a spark ignition engine', Applied Thermal Engineering, 201(PA), p. 117749. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117749>.
- Gogola, R. and Kósa, A. (2014) 'Electronic Control of Fuel Mixture Preparation and Injection in Internal Combustion Engines', American Journal of Mechanical Engineering, 2(7), pp. 231–238. Available at: <https://doi.org/10.12691/ajme-2-7-12>.
- Jayanth, B.V. et al. (2025) 'A comprehensive study on the effects of multiple injection strategies and exhaust gas recirculation on diesel engine characteristics that utilize waste high density polyethylene oil', Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 47(1), pp. 7749–7766. Available at: <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1924313>.
- Karaoğlu, A. and Söyler, H. (2025) 'A New Approach for Improving Biodiesel Conversion Efficiency: A Stacking Ensemble Model Based on Linear Regression Approach with GAN-Enhanced', Arabian Journal for Science and Engineering, pp. 19421–19441. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10227-5>.
- Karimmaslak, H. et al. (2021) 'Optimization of performance and emission of compression ignition engine fueled with propylene glycol and biodiesel–diesel blends using artificial intelligence method of ANN-GA-RSM', Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 15(1), pp. 413–425. Available at: <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1880970>.
- Khan, M.M. et al. (2024) 'Effect of fuel injection parameters on the performance & emissions of biodiesel based CI engine-A review', Results in Engineering, 24(August), p. 103180. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103180>.
- Li, Y. et al. (2021) 'Towards a comprehensive optimization of engine efficiency and emissions by coupling artificial neural network (ANN) with genetic algorithm (GA)', Energy, 225, p. 120331. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120331>.
- Liang, Z. et al. (2024) 'Co-optimization and prediction of high-efficiency combustion and zero-carbon emission at part load in the hydrogen direct injection engine based on VVT, split injection and ANN', Energy, 308(July), p. 133038. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133038>.
- Liu, J. et al. (2024) 'Optimizing combustion and emissions in natural gas/diesel dual-fuel engine with pilot injection strategy', Thermal Science and Engineering Progress, 48(September 2023), p. 102418. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102418>.
- Odufuwa, O.Y., Tartibu, L.K. and Kusakana, K. (2025) 'Artificial neural network modelling for predicting efficiency and emissions in mini-diesel engines: Key performance indicators and environmental impact analysis', Fuel, 387(December 2024), p. 134294. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134294>.
- Pham, V.C. et al. (2022) 'Effects of the Injector Spray Angle on Combustion and Emissions of a 4-Stroke Natural Gas-Diesel DF Marine Engine', Applied Sciences (Switzerland), 12(23). Available at: <https://doi.org/10.3390/app122311886>.
- Sankar, P. et al. (2022) 'Prediction and optimization of diesel engine characteristics for various fuel injection timing: Operated by third generation green fuel with alumina nano additive', Sustainable Energy Technologies and Assessments, 53(PD), p. 102751. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102751>.
- Sharma, P. and Sharma, A.K. (2025) 'Application of Response Surface Methodology for Optimization of Fuel Injection Parameters of a Dual Fuel Engine Fuelled with Producer Gas-Biodiesel blends', Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 47(1), pp. 5240–5257. Available at: <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1892883>.
- Söyler, H. (2025) 'Boost pressure influence on combustion, emission characteristics, and performance of diesel engines with various fuel types', Engineering Science and Technology, an International Journal, 63(x). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101983>.


- Söyler, H. and Balki, M.K. (2025) 'Chemical fingerprinting and cluster-based evaluation of vegetable oils for biodiesel applications', *Case Studies in Thermal Engineering*, 73(May), p. 106703. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106703>.
- Söyler, H., Balki, M.K. and Sayin, C. (2025) 'The impact of injection timing and pressure on a CRDI engine's combustion characteristics', *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, 13(2), pp. 854–864. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.015>.
- Sun, P. et al. (2024) 'Artificial neural network models for forecasting the combustion and emission characteristics of ethanol/gasoline DFSI engines with combined injection strategy', *Case Studies in Thermal Engineering*, 54(November 2023), p. 104007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104007>.
- Wang, G. et al. (2022) 'Study on Characteristics Optimization of Combustion and Fuel Injection of Marine Diesel Engine', *Atmosphere*, 13(8), pp. 1–24. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13081301>.
- Yang, R. et al. (2022) 'An Artificial Neural Network Model to Predict Efficiency and Emissions of a Gasoline Engine', *Processes*, 10(2), pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr10020204>.

## BÖLÜM 2

### YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMINDA YAPAY ZEKA DESTEKLİ YAKLAŞIMLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE ANALİZİ


Ali ÇETİNKAYA

Öğr. Gör., İstanbul Gelişim Üniversitesi,  
İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu, Otonom Sistemler Teknikerliği Programı,  
alcetinkaya@gelisim.edu.tr

 0000-0003-4535-3953

Mustafa TEMÜR

Dr. Öğr. Üyesi., İstanbul Gelişim Üniversitesi,  
İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Gövde ve Yüzey İşlem Teknolojileri  
Programı, mtemur@gelisim.edu.tr

 0000-0001-5076-1922

Küresel enerji talebi, nüfus artışı, ekonomik büyüme ve yaşam standartlarındaki yükseliş nedeniyle sürekli olarak artış göstermektedir. Fosil yakıtlar günümüzde enerji üretiminde hâkim konumda olsa da, sınırlı rezervleri ve çevreye olan olumsuz etkileri, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu hale getirmektedir. Güneş, rüzgâr ve biyoenerji gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji güvenliği ve iklim değişikliği sorunlarının çözümünde önemli bir potansiyel taşımaktadır. Enerji güvenliği: erişilebilirlik, maliyet etkinliği ve çevresel kabul edilebilirlik ilkelerini içermekte olup, enerji arzının çeşitlendirilmesi ve temiz teknolojilerin yaygınlaştırılması bu kapsamda kritik bir rol oynamaktadır. Artan enerji talebini karşılamak ve çevresel etkileri azaltmak için enerji yönetiminin etkinleştirilmesi ve sürdürülebilir üretim modellerinin benimsenmesi gerekmektedir (Söyler, 2024).

Enerji alanında ihtiyaçların karşılanabilmesi için yenilenebilir enerji sistemleri (Renewable Energy Systems – RES), küresel enerji dönüşümünün önemli bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Özellikle mikro şebekeler (microgrids), kırsal ve uzak bölgelerde enerjiye erişimi artırmak ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlamak açısından stratejik öneme sahiptir. Ancak rüzgâr, güneş ve hidroelektrik gibi yenilenebilir kaynakların değişken ve öngörülemez doğası, bu sistemlerin entegrasyonunu karmaşık hale getirmektedir.

Ayrıca YZ ve gelişen teknolojiyle birlikte cihaz kontrolüne duyulan ihtiyaç artmakta, bu süreçte yazılım tabanlı algoritmaların önemi giderek büyümektedir. Bu bağlamda, bulanık mantık, sistemlerin kontrolünde önemli ve yaygın bir yöntem haline gelmiştir (Çetinkaya, 2023).

YZ ve görüntü işleme teknolojileri, son yıllarda birçok sektörde hızla gelişmiş ve yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Nesne algılama, yüz tanıma, otonom sistemler ve tıbbi görüntüleme gibi alanlarda yüksek doğruluk ve otomasyon sağlamaktadır. Derin öğrenme ve veri analitiğiyle desteklenen bu sistemler, güvenlik, sağlık, endüstri ve

tarım gibi alanlarda karar destek mekanizmalarını güçlendirerek verimliliği artırmakta ve insan hatasını azaltmaktadır (Çetinkaya ve Gök, 2024).

YZ karmaşık veri kümelerinden anlam çıkarabilen ve çevresel koşullara dinamik olarak uyum sağlayabilen güçlü bir araç haline gelmiştir. Günümüzde yapay zeka; sağlık, enerji, finans, üretim, güvenlik, eğitim ve ulaşım gibi birçok sektörde süreçleri otomatikleştirerek verimliliği artırmak ve karar alma mekanizmalarını dönüştürmektedir. Bu yönüyle YZ, sadece teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda dijital dönüşümün ve sürdürülebilirliğin yeni bir alanı olarak ele alınmaktadır.

Yapay Zeka (YZ) alt dallarından Yapay Sinir Ağları (ANN), Derin Öğrenme (DL) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Genetik Algoritma (GA) gibi optimizasyon algoritmaları dahil olmak üzere çeşitli AI teknikleri, tahmin doğruluğunu, şebeke istikrarını ve enerji verimliliğini artırmadaki etkinlikleri açısından ele alınmaktadır (Balki ve arkadaşları, 2018; Talaat ve arkadaşları, 2023; Ukoba ve arkadaşları, 2024; Talaat, Kabeel ve Shaban, 2024).

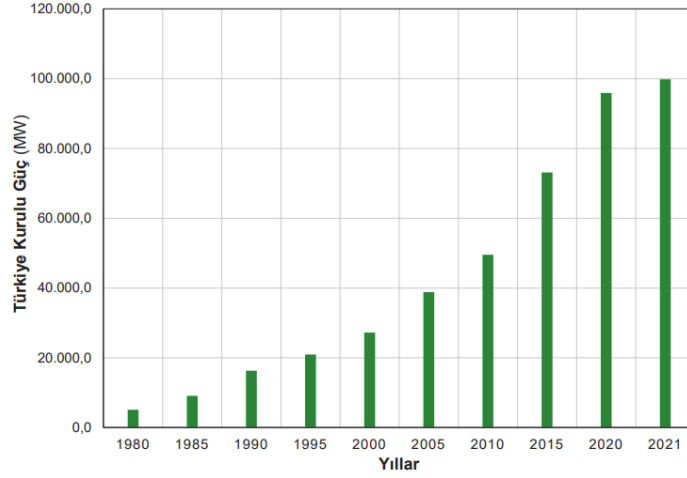
Enerji, insan yaşamının temel gereksinimlerinin karşılanması ve ekonomik kalkınmanın sürdürülebilmesi açısından vazgeçilmez bir unsurdur. Ancak, sanayi devriminden günümüze kadar enerji üretiminde ağırlıklı olarak kullanılan fosil yakıtlar, küresel sera gazı emisyonlarının başlıca kaynağını oluşturarak iklim değişikliğine ve çevresel bozulmaya yol açmaktadır. Artan nüfus ve enerji talebi, fosil yakıtların sınırlı rezervleriyle birlikte enerji arz güvenliğini tehdit ederken, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için enerji sistemlerinde yenilenebilir kaynakların payının artırılması ve karbon salınımını azaltan stratejilerin uygulanması büyük önem taşımaktadır (Halkos ve Gkampoura, 2020). Şekil 1 üzerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım alanlarını, potansiyellerini ve mevcut sınırlılıklarını inceleyen genel bir değerlendirmeyi göstermektedir (Halkos ve Gkampoura, 2020).



**Şekil 1.** Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması

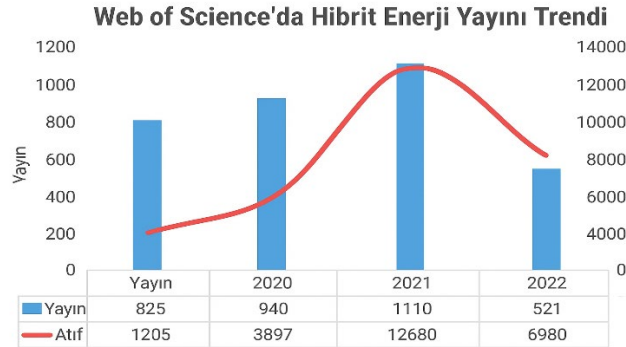
Şekil 2 üzerinde ülkemizde kurulu gücün yıllara bağlı değişimi verilmiştir. Bu grafikte ülkemizde kurulu gücün yıllara bağlı değişimi 1980'lerde 5000 MW seviyelerindeki

kurulu gücün 2021 yılı itibarıyla 100GW seviyesine ulaştığı gösterilmektedir (Dinçer ve Ezan, 2023).



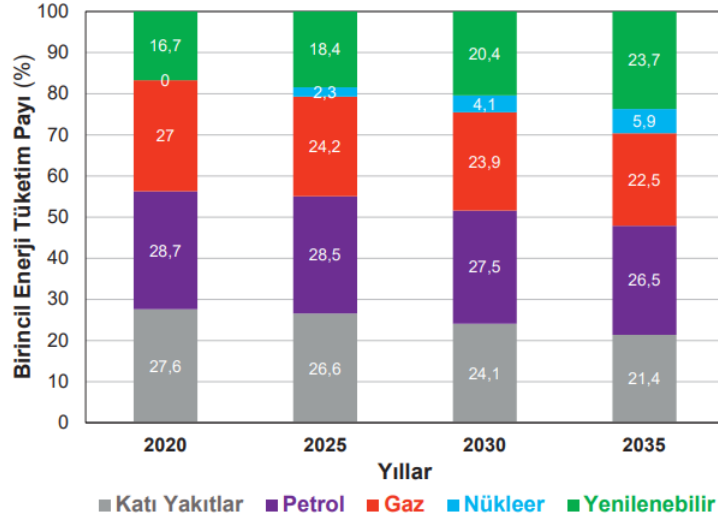
**Şekil 2.** Ülkemizde Kurulu Gücün Yıllara Göre Gelişimi

Şekil 3 üzerinde Web of Science veri tabanında yayımlanan makaleler üzerinde yapılan güncel bir incelemeye göre, Mayıs 2022 sonu itibarıyla son üç yıl içerisinde enerji yönetimi alanında toplam 33.964 bilimsel çalışma yayımlanmıştır. Ayrıca, 2021’de bu çalışmalara yapılan atıf sayısı 12.000’e ulaşmıştır, bu da alanın son dönemde ne denli hızlı bir şekilde önem kazandığını göstermektedir. Elde edilen bu veriler, yapay zeka destekli enerji sistemleri konusunun hem akademik çevrelerde hem de endüstride giderek artan bir şekilde ilgi gördüğünü ve enerji dönüşüm süreçlerinde stratejik bir araştırma alanı haline geldiğini ortaya koymaktadır (Maghami ve Mutambara, 2023).



**Şekil 3.** Şekil 1. Web of Science (WOS) veri tabanında hibrit enerji sistemleri (HES) alanında yayınlanan yayın sayısı ve bu yayınlara yapılan atıf sayısı.

Kaynaklar bazında birincil enerji tüketiminin yıllara göre değişimi Şekil 4’te gösterilmektedir. 2020 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %16,7 iken 2035 yılında payın %23,7’ye yükselmesi öngörülmektedir. Nükleer enerji payının ise 2035 yılında %5,9’e yükselmesi beklentiler arasındadır. Hesaplamalar ışığında kömür payının %21,4’e, doğalgaz payının %22,5’e ve petrol payının ise %26,5’e gerileyeceği tahmin edilmektedir (Dinçer ve Ezan, 2023).



**Şekil 4.** Kaynaklara göre birincil enerji tüketiminin değişimi

## 2. Literatür Özeti

Ulusal Enerji Planı, Enerji Sistemlerde kullanılacak YZ Rollerini, Alternatif Enerji Kaynakları ve Doğal Gaz Lojistiği noktasında oluşturulan raporlarda, doğal kaynaklarda verimlilik artışı ve alternatif enerji politikalarının geliştirilmesini hedeflemektedir. Enerji sistemlerde dijitalleşme dönüşüm sürecinde yapay zeka tabanlı izleme, tahmin ve optimizasyon tekniklerinin enerji sistemlerine entegrasyonları önerilmektedir. Ulusal Enerji Planı bütünlüğünde ele alınan yaklaşımlarda ulusal strateji düzeyinde dönüşümü destekleyerek, dijitalleşmiş ve sürdürülebilir bir enerji altyapısına geçiş vizyonunu ortaya koyulması gerekliliği bildirilmiştir (Dinçer ve Ezan, 2023; Dinçer, Arcaklıoğlu ve Ezan, 2023; T. C. Enerji Bakanlığı, 2022).

Akdeniz Bölgesi'ne ait meteorolojik veriler üzerinden YZ tabanlı yenilenebilir enerji modellemelerinde bölgesel meteorolojik (sıcaklık, bağıl nem, bulutluluk, toprak sıcaklığı ve güneşlenme süresi) kullanarak yapay sinir ağları yardımıyla aylık ortalama güneş ışınımı tahmini gerçekleştirilmiştir. Çalışmada  $R^2$ , RMSE, MAPE, MSE, MABE ve WI istatistiksel değerleri kullanılarak tahmin süresi elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şahan ve Okur, 2016).

Güneydoğu Anadolu Bölgesi için global güneş ışınımı (GGI) ve güneşlenme süresi (GS) değerleri ile güneşlenme süreleri için tahmin işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde  $R^2$  ve MAPE parametreleri kullanılarak istatistiksel modeller üzerinden yenilenebilir enerji kaynakları için tahminleme işlemleri yapılmıştır (Kılıç, Gümüş ve Yılmaz, 2016).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinde kısa dönem enerji üretim tahmini amacıyla meteorolojik verilerle çoklu regresyon temelli matematiksel modeller geliştirilen çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda yenilenebilir enerji sistemlerinde kısa vadeli üretim tahmininin gerekliliğinde matematiksel modellerin önemi vurgulanmaktadır (Alkan, Öztürk ve Tosun, 2018).

Akıllı şebeke sistemlerinde saatlik bazda güneş enerjisi üretimini meteorolojik ölçümler kullanarak tahmin işlemleri gerçekleştirilen çalışmada çoklu doğrusal

regresyon, powell optimizasyonu ve Markov Chain Monte Carlo tabanlı olasılıklı programlama yöntemleri karşılaştırılmıştır (Demirtaş, Akkoyun, Akkoyun ve Çetinbaş, 2019).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan hibrit enerji sistemlerinde (Hybrid Energy Systems, HES) karşılaşılan temel zorluklar; enerji yönetimi, birim boyutlandırma (sizing), talep tarafı yönetimi ve enerji depolama kontrolü üzerine gerçekleştirilen çalışmada, mevcut HES kontrol sistemlerinin karmaşıklık, maliyet, güvenilirlik ve verimlilik açısından iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu iyileştirmede YZ tekniklerinin sınıflandırma, tahmin, optimizasyon ve kontrol problemlerinin çözümünde kullanılabileceği belirtilmiştir (Maghami ve Mutambara, 2023).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını, potansiyellerini ve sınırlılıkların tespiti ekonomik, çevresel ve teknolojik önemi bulunmaktadır. Çalışmada güneş ve rüzgâr enerjisinin 2010–2019 yılları arasındaki büyüme hızları, iklim değişikliği, enerji arz-güvenliği ve politika önerileri ile ilişkilendirildiği belirtilmiştir (Halkos ve Gkampoura, 2020).

Hibrit yenilenebilir enerji kaynaklarının mikro şebekelere entegrasyonu sürecinde YZ uygulamalarında entegrasyon mimarileri, mikro şebeke iletişim zorlukları, kontrol stratejileri ve optimizasyon tekniklerinin birlikte ele alınması gerekliliği vurgulanmıştır. YZ odaklı ANN ile PSO kombinasyonu kullanılarak NMSE (Normalized Mean Square Error) oranı %1,10'a kadar düşürülmüş ve sistemin kontrol doğruluğu önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir (Talaat ve arkadaşları, 2023).

Yenilenebilir enerji sistemlerinin YZ ile optimizasyonunda kaynak değerlendirmesi, enerji tahmini, sistem izlemesi, kontrol stratejileri ve şebeke entegrasyonu gibi çok çeşitli parametrelerin kullanılması gerekliliği vurgulanmıştır. Yenilenebilir enerji ile AI entegrasyonuna dair güncel metodolojileri ve geleceğe dönük yönelimleri bildirmişlerdir (Ukoba ve arkadaşları, 2024).

YZ ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmadaki rolünde akıllı şebekelerde enerji arz-talep dengesi vurgulanmıştır. Çalışmada rüzgâr enerjisinin kesikli doğasından kaynaklanan tahmin zorluklarını aşmak amacıyla makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme (DL) tabanlı bir Geliştirilmiş Öneri Sistemi (PERS) geliştirilerek, rüzgâr hızı tahmini (WSPM), güç tüketimi hesaplama (WSPC) ve türbin çalışma zamanı öneri (RM) modülleri oluşturulmuştur (Talaat, Kabeel ve Shaban, 2024).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik sistemine entegrasyonunda YZ kullanımının katkı sağlamasındaki potansiyel çalışma içinde incelemiştir. Çalışmada, sistem entegrasyonunda maliyetlerinin azaltılmasına yönelik YZ uygulamaları sistematik biçimde değerlendirilerek ve YZ çözümleri ile akıllı şebekelerde üretim tahmini, talep yönetimi ve operasyonel verimlilik artışıyla önemli değer yarattığı vurgulanmıştır (Boza ve Evgeniou, 2024).

YZ'nin yenilenebilir enerji sistemlerindeki uygulamalarında veri temelli modellerin enerji üretim tahmini, optimizasyon ve sistem kontrolü süreçlerine önemi ele alınmıştır. Çalışmada enerji değer zincirindeki üretim, şebeke entegrasyonu ve talep yönetiminde YZ çözümlerinin rolünü sergileyerek, yenilenebilir enerjinin adaptasyon maliyetlerine ilişkin çözüm önerileri sunulmuştur (Alankrita ve Srivastava, 2021).

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik ve sürdürülebilir biçimde tasarlanması amacıyla YZ tabanlı optimizasyon yöntemleri kullanarak güneş, rüzgâr ve hidroelektrik kaynakların hibrit yapılarda kullanımının kritik bir adım olduğunu

vurgulanmıştır. YZ algoritmalarının (genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu, bulanık mantık) sistem performansını maliyet ve güvenilirlik açısından iyileştirdiğini bildirilmiştir (Zahraee, Assadi ve Saidur, 2021).

Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin ekonomik değerlendirilmesinde YZ tabanlı analizlerin rolünü bildirilmiştir. Çalışmada, enerji tahmini ve verimlilik göstergelerini ekonomik parametrelerle ilişkilendiren YZ temelli modellerin kullanılmıştır. Geliştirilen modelde enerji verimliliğini %97,32'ye kadar artırırken yenilenebilir kaynak kullanım oranını da önemli ölçüde gelişim sağlandığı bildirilmiştir (Chen ve arkadaşları, 2024).

Tablo 1 üzerinde referans çalışmalarda kullanılan enerji türü, enerji kaynağı bölgesi, kullanılan YZ tahmin yönetimi, tahminleme işleminde kullanılan veri türü ve gerçekleştirilen işlemlerin sonuçları verilmiştir.

**Tablo 1.** Referans kaynakların incelenmesi.

Referans Bilgisi	Enerji Türü	Bölge	Kullanılan Yöntem	Kullanılan Veri	Yöntem İşlemin sonucu
Şahan ve Okur, 2016	Güneş Enerjisi	Akdeniz Bölgesi	Yapay Sinir Ağı	Meteorolojik veriler	Tahmin
Kılıç, Gümüş ve Yılmaz, 2016	Güneş Enerjisi	Güneydoğu Anadolu bölgesi	Gaussian Analizi	Güneşin geliş açısı verileri	Tahmin
Alkan, Öztürk, & Tosun, 2018	Rüzgar ve Güneş Enerjisi	Batı Karadeniz Bölgesi - Düzce	Çoklu Regresyon Analizi	Meteorolojik veriler	Tahmin
Demirtaş ve Arkadaşları, 2019	Güneş ve rüzgar enerjisi verileri	Avrupa Bölgesi - Hollanda	Makine öğrenmesi yaklaşımı	Atmosferik veriler	Enerji üretimi tahmini
Magham ve Mutambara, 2023	Hibrit Enerji Sistemleri	Şebeke dışı - uzak bölgeler	Optimizasyon	Hes verileri	Enerji yönetimi

### 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğada kendiliğinden yenilenebilen ve tükenme riski bulunmayan enerji türlerini ifade etmektedir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerji gibi kaynaklar, fosil yakıtlara kıyasla daha sürdürülebilir ve çevre dostu alternatifler enerji kaynaklarıdır. Dünya nüfusunun artan enerji talebi ve karbon salınımının, yenilenebilir enerjiye olan yönelimi hızlandırmıştır. Güneş ve rüzgar enerjisi sistemlerinin teknolojinin gelişmesi sayesinde verimliliğinin artması ile enerji sektöründe önemli bir yer edinmiştir. Bu kapsamda enerji arz güvenliğini sağlamak ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak amacıyla yenilenebilir enerji

politikalarını öncelikli hale getirilmesi gerekmektedir (Dinçer ve Ezan, 2023; Dinçer, Arcaklıoğlu ve Ezan, 2023; T. C. Enerji Bakanlığı, 2022; Boza ve Evgeniou, 2024).

YZ ve veri bilimi teknolojilerinin gelişmesi, yenilenebilir enerji sistemlerinin daha verimli ve öngörülebilir şekilde yönetilmesine olanak sağlamaktadır. Güneş ışınımı, rüzgar hızı veya enerji talebi gibi değişkenlerin tahmin edilmesi, üretim planlaması ve şebeke entegrasyonu süreçlerinde YZ modelleri önemli bir rol oynamaktadır. Derin öğrenme, bulanık mantık, genetik algoritmalar ve optimizasyon yöntemleri sayesinde hem enerji üretimi hem de enerji dağıtımda etkin hale gelmiştir. Bu teknolojik dönüşüm, enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra, karbon ayak izini azaltmak ve sürdürülebilir enerji yönetiminde ulusal enerji politikaları için yol gösterici bir zemin oluşturmaktadır (Şahan ve Okur, 2016; Maghami ve Mutambara, 2023; Talaat ve arkadaşları, 2023; Ukoba ve arkadaşları, 2024; Talaat, Kabeel ve Shaban, 2024).

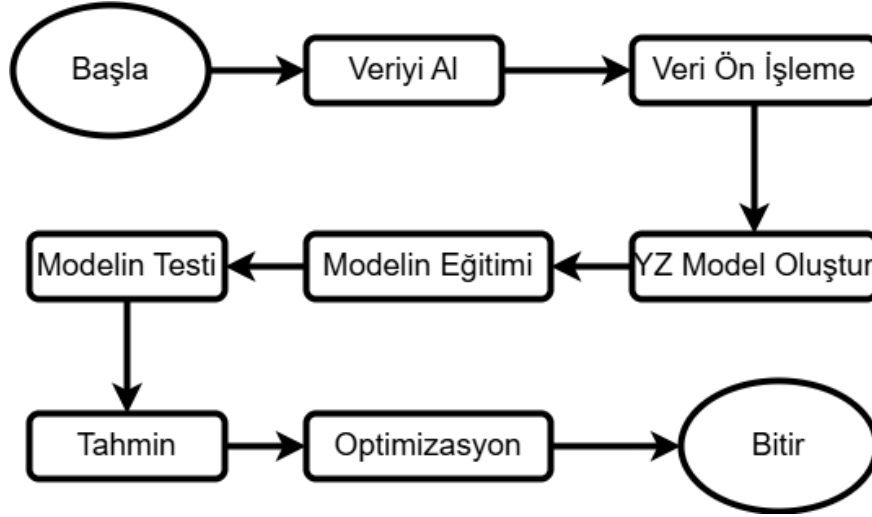
#### **4. Enerji Dönüşümünde Dijitalleşme ve Akıllı Sistemler**

Enerji sistemlerinde dönüşüm, dijital teknolojilerin gelişimiyle birlikte veri merkezli, akıllı ve sürdürülebilir bir yapıya dönüşmüştür. Artan enerji talebi kaynakların verimli kullanımı ihtiyacıyla enerji sistemlerinde dijitalleşme stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu dönüşüm sürecinde yapay zeka, büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT) ve bulut tabanlı sistemler enerjinin üretimden tüketime kadar her aşamasında izleme, kontrol ve optimizasyon kabiliyeti kazandırmaktadır. Dijitalleşmenin temel amacı, enerji üretiminde verimliliği artırmak, kaynak kullanımını azaltmak ve karbon ayak izini minimize etmek olurken, aynı zamanda akıllı sistemler aracılığıyla şebeke kararlılığını ve enerji arz güvenliğini artırmaktadır. Bu bağlamda, akıllı şebekeler, yapay zeka tabanlı tahminleme sistemleri ve dijital ikiz teknolojileri, enerji yönetiminde sürdürülebilirlik ve otonomluğa doğru giden yolun temel yapı taşlarını oluşturmaktadır.

Akıllı sistemler ile enerji üretimi, iletimi ve dağıtım süreçlerini gerçek zamanlı olarak izleyebilen, veri analitiği ile optimize eden ve otomatik karar mekanizmalarına sahip sistemlerdir. Bu sistemler, klasik elektrik şebekelerine göre daha esnek ve adaptif olup, enerji kaynaklarının dijitalleşme entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Enerji talep değişimine göre dinamik ve bulut tabanlı veri merkezleri aracılığıyla toplanan veriler, yapay zeka algoritmaları tarafından analizinden sonra şebekenin anlık yük dengesi, enerji kalitesi ve arıza riskleri belirlenebilmektedir. Böylece, veri odaklı yönetim anlayışıyla enerji altyapısı öğrenen, tahmin eden ve kendini optimize eden bir yapıya dönüştürülerek verimlilik artışı ile birlikte enerji arzında süreklilik, maliyet etkinliğini ve karbon salınımlarında azalmayı da desteklemektedir.

#### **5. Yapay Zekanın Enerji Kaynaklarında Kullanımı ve Analizi**

Yenilenebilir enerji sistemlerinde yapay zekanın kullanımı, veriden bilgiye, bilgiden sonuca giden bütüncül bir süreci içermektedir. Bu süreç Şekil 1 üzerinde verilmiş olan akış şemasında gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Veriden Sonuca Yapay Zekanın İşlem Adımları

Şekil 1 üzerinde gösterilen "Veri Toplama" işleminde enerji üretim ve tüketim süreçleri den gelen veriler bu işlem adımını oluşturmaktadır. Bu aşamada; yenilenebilir enerji sistemindeki verilerin (güneş ışınımı, rüzgar hızı, sıcaklık) kayıtları toplanır. "Veri Ön İşleme" aşamasında toplanan veriler doğrudan kullanılabilir nitelikte olmamasından dolayı eksik verilerin tamamlanması, gürültülerin temizlenmesi, normalizasyon işlemleri ve öznitelik mühendisliği işlemleri gerçekleştirilir. Bu adım, oluşturulacak yapay zeka modelinin başarı sonucu yüksek sonuçlar elde etmesi - üretmesi için kritik öneme sahip bir hazırlık aşamasıdır. Veriler üzerinde işlemler tamamlandıktan sonra tahmin işlemi için gerek olan YZ modelinin oluşturulması işlemine geçilir. Bu adımda giriş ve çıkış parametre-değişken sayısına göre çok değişken yapısı dikkate alınarak YZ tabanlı bir mimari seçilmelidir. Modelin eğitimi aşamasında eğitim, doğrulama, hata parametrelerinin ele alınması gerekmektedir. Bu bağlamda veri eğitimi için minimum %70 - %80 ve test için %30 - % 20 aralığında veri setinin bölünmesi gerekmektedir. Model performans değerlendirmesinde, tahmin doğruluğu ve hata seviyesinin ölçümü için Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Coefficient of Determination ( $R^2$ ) ve Mean Absolute Percentage Error (MAPE) metrikleri kullanılması gerekmektedir. Modelin test aşamasında veri setinin %30 - % 20 aralığında ayrılan kısmı ele alınarak test yapılması gerekmektedir. Eğitim ve test aşamalarının ardından geliştirilen model, tahminleme sürecinde uygulamaya alınmaktadır. Model çıktısı - çıktıları, tasarlanan model üzerinde gerçek zamanlı uygulanarak sonuç elde edilmektedir. Elde edilen tahmin sonucunda modelin başarısını maksimum seviyelere ulaştırmak için işlem aşamalarında "Veri Ön İşleme" aşamasına geri dönülerek işlemler kontrol edilmelidir. Tahmin sonucu yeterli ise model oluşumu gerçekleştirilmiştir.

## SONUÇ

Yenilenebilir enerji ve YZ arasındaki ilişki, enerji sistemlerinin dönüşümünde kilit bir role sahiptir. Yapay zeka, enerji kaynaklarından veri elde edebildiğimiz güneş ve rüzgâr gibi değişken üretim portfolyosuna sahip kaynakların verilerinin analiz ederek ve bu kaynaklardan elde edilen enerji üretimini yüksek doğrulukla tahminleyebilmektedir. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları sayesinde enerji sistemleri, geçmiş meteorolojik veriler ve üretim istatistiklerinden öğrenerek üretim planlamasını optimizasyon ile maksimum verim elde edilebilir. Enerji sistemlerinde şebeke kararlılığını artırır ve maliyetleri azaltmaktadır. Hibrit enerji sistemleri ve mikro şebekelerde yapay zeka tabanlı kontrol yaklaşımları, hem enerji verimliliğini

yükseltmek te hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlamaktadır. Bu entegrasyon sayesinde enerji sektörü, geleneksel üretim yapısından çıkıp öğrenen, tahmin eden ve kendi kendini yöneten akıllı enerji altyapılarına dönüşmektedir.

YZ tabanlı tahminleme, optimizasyon ve kontrol yöntemleri sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının tahmin edilemeyen bir şekilde büyük ölçüde azaltmakta, enerji üretimi daha dengeli ve ekonomik hale getirilmektedir. Bu dönüşüm, mikro şebekelerde ulusal enerji planlarına kadar geniş bir ölçekte, karbon salınımının azaltılması, enerji arz güvenliğinin artırılması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması açısından kritik önem taşımaktadır. Gelecekte, yapay zekânın derin öğrenme, açıklanabilir yapay zekâ ve otonom sistemler gibi alt alanlarının enerji altyapılarına entegrasyonu, hem çevresel hem ekonomik yönden daha dayanıklı ve akıllı enerji ekosistemlerinin oluşumunu hızlandıracaktır.

## KAYNAKÇA

- Alkan, Ö., Öztürk, A., & Tosun, S. (2018). Rüzgar ve güneş santrallerinde kısa dönem enerji üretim tahmini için matematiksel modellerin oluşturulması. *Düzce University Journal of Science and Technology*, 6(1), 188–195.
- Balki, M.K., Çavuş, V., Duran, İ.U., Tuna, R., Sayın, C. (2018) "Experimental Study and Prediction of Performance and Emission in an SI Engine Using Alternative Fuel with Artificial Neural Network", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7 (1) pp. 58-64
- Boza, P., & Evgeniou, T. (2021). Artificial intelligence to support the integration of variable renewable energy sources to the power system. *Applied Energy*, 290, 116754. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116754>
- Chen, C., Hu, Y., Karuppiah, M., & Kumar, P. M. (2021). Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101358. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101358>
- Çetinkaya, A. (2023). *Bulanık mantık ve Python uygulamaları*. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi.
- Çetinkaya, A., & Gök, M. (2024). k-NN sınıflandırma yöntemi. *Makine öğrenmesi algoritmaları* (ss. 186–198). Ankara: Nobel Yayınevi.
- Demirtaş, M., Akkoyun, N., Akkoyun, E., & Çetinbaş, İ. (2019). The probabilistic prediction of solar energy power production based on time in smart grids. *Gazi University Journal of Science, Part C: Design and Technology*, 7(2), 411–424.
- Dinçer, İ., & Ezan, M. (2023). TÜBA-Alternatif enerji kaynakları ve doğal gaz lojistiği raporu.
- Dinçer, İ., Arcaklıoğlu, E., & Ezan, M. A. (2023). Enerjide yapay zekânın rolü raporu.
- Halkos, G. E., & Gkampaoura, E. C. (2020). Reviewing usage, potentials, and limitations of renewable energy sources. *Energies*, 13(11), 2906. <https://doi.org/10.3390/en13112906>
- Kılıç, H., Gümüş, B., & Yılmaz, M. (2016). Güneydoğu Anadolu bölgesi için global güneş ışımalarının ve güneşlenme süresinin istatistiksel metodlar ile tahmin edilmesi ve karşılaştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(1), 73–83.
- Maghami, M. R., & Mutambara, A. G. O. (2023). Challenges associated with hybrid energy systems: An artificial intelligence solution. *Energy Reports*, 9, 924–940. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.044>
- Söyler, H. (2024). Alternatif enerji kaynaklarının kullanımı ile fosil yakıt kullanımının yapay zeka ile karşılaştırılması ve maliyet analizi. *Mühendislik alanında yapay zeka-2* (ss. 158–172). Sinop: Çizgi Kitapevi.


- Srivastava, S. K. (2020, July). Application of artificial intelligence in renewable energy. In 2020 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE) (ss. 327–331). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ComPE49383.2020.9176580>
- Şahan, M., & Okur, Y. (2016). Akdeniz bölgesine ait meteorolojik veriler kullanılarak yapay sinir ağları yardımıyla güneş enerjisinin tahmini. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 11(1), 61–71.
- T. C., Enerji Bakanlığı. (2022). Türkiye ulusal enerji planı. Ankara, Türkiye.
- Talaat, F. M., Kabeel, A. E., & Shaban, W. M. (2024). The role of utilizing artificial intelligence and renewable energy in reaching sustainable development goals. *Renewable Energy*, 235, 121311. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121311>
- Talaat, M., Elkholy, M. H., Alblawi, A., & Said, T. (2023). Artificial intelligence applications for microgrids integration and management of hybrid renewable energy sources. *Artificial Intelligence Review*, 56(9), 10557–10611. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10471-5>
- Ukoba, K., Olatunji, K. O., Adeoye, E., Jen, T. C., & Madyira, D. M. (2024). Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. *Energy & Environment*, 35(7), 3833–3879. <https://doi.org/10.1177/0958305X231137861>
- Zahraee, S. M., Assadi, M. K., & Saidur, R. (2016). Application of artificial intelligence methods for hybrid energy system optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 617–630. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.032>

## BÖLÜM 3

### SU VERİMLİLİĞİ UYGULAMALARINDA YAPAY ZEKA


*Dilek GÜMÜŞ*

*Doç. Dr., Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,  
Çevre Mühendisliği Bölümü, dgumus@sinop.edu.tr*

 0000-0001-7665-3057

*Fatih GÜMÜŞ*

*Doç. Dr., Sinop Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi,  
Biyoloji Bölümü, fgumus@sinop.edu.tr*

 0000-0002-4660-7591

Su, ekosistemlerin devamlılığını sağlayan, insan yaşamını destekleyen ve tarımsal üretim ile endüstriyel faaliyetlerin sürdürülebilirliğinde temel belirleyici rol oynayan vazgeçilmez bir doğal kaynaktır. Küresel ölçekte artan nüfus ve ekonomik faaliyetler, tatlı su talebini sürekli olarak yükseltmektedir. Dünya üzerindeki suyun yaklaşık %97'sinin tuzlu su olması ve toplam tatlı su varlığının yalnızca %3'ünü oluşturması, ayrıca bu tatlı suyun yalnızca %0,5'inin doğrudan insan kullanımı için erişilebilir olması su kaynakları üzerindeki baskıyı dramatik biçimde yükseltmektedir(Sangamnere vd., 2023). Birleşmiş Milletler Dünya Su Değerlendirme Programı (WWAP) verilerine göre günümüzde yaklaşık 3,6 milyar insan yılın en az bir ayında su kıtlığı yaşayan bölgelerde yaşamaktadır; bu sayının 2050 yılına kadar 4,8–5,7 milyara yükseleceği öngörülmektedir(WWAP, 2017). Tatlı su kullanımındaki bu hızlı artış, pek çok bölgede kalıcı su kıtlığı riskini artırmakta ve su yönetiminin bütüncül, sistem odaklı yaklaşımlarla ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Küresel su kıtlığının giderek daha kritik bir sorun hâline gelmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için yenilikçi çözümlerin önemini artırmaktadır. Yapay zekâ (YZ) teknikleri, özellikle makine öğrenimi (ML), veri analitiği ve uzaktan algılama yöntemleri, su kaynaklarının izlenmesi ve yönetilmesine yönelik karar süreçlerini önemli ölçüde geliştirebilmektedir. Bu teknolojiler; su tahsisinin optimize edilmesi, sızıntı ve kirlilik tespitinin hızlandırılması, su bulunabilirliği ve kalite değişimlerinin yüksek doğrulukla tahmin edilmesi gibi alanlarda yöneticilere güçlü araçlar sunmaktadır (Whig vd., 2024).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, YZ'nin pek çok alanda olduğu gibi (Balki & Çavuş, 2023; Çavuş & Sarıkaya, 2021) su arıtımı, su koruma stratejileri ve kaynak yönetimi süreçlerine de entegre edilmesinin su verimliliğini artırmada dönüştürücü bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Makine öğrenimi ve derin öğrenme modelleri; su sistemlerinin optimizasyonu, arıtma süreçlerinin iyileştirilmesi ve küresel ölçekte büyüyen su yönetimi zorluklarına bütüncül çözümler geliştirilmesi açısından giderek daha merkezi bir rol üstlenmektedir.

## **Su Verimliliği**

Su verimliliği, şehir şebekeleri, endüstriyel prosesler, tarımsal üretim ya da kampüs altyapıları gibi sistemlerin aynı hizmet veya ürün çıktısını daha az su girdisiyle üretebilme kapasitesi şeklinde ifade edilebilir. Temel amaç, kaynaklardan su çekimini dolayısıyla su tüketimini azaltırken hizmet/ürün kalitesini ve ekolojik bütünlüğü korumaktır. Bu kapsamda su verimliliği çalışmalarının; talep tarafı yönetimi, kayıp kaçak azaltımı, yeniden kullanım ve geri kazanım uygulamaları, proses optimizasyonu ve davranışsal müdahaleler gibi çok boyutlu stratejilerle bütüncül şekilde ele alınması gerekmektedir. Her gün, tarım, evsel, elektrik ve endüstriyel amaçlar gibi çeşitli kullanımlar için iç su kütlelerinden (örneğin nehirler, göller, sulak alanlar ve rezervuarlar) ve akiferlerden büyük miktarlarda su çıkarılmaktadır. Küresel ölçekte doğal kaynaklardan yapılan su çekimi, yani yüzey ve yeraltı suyu kaynaklarından içme, tarım ve sanayi gibi amaçlarla alınan toplam su miktarı, son yüzyılda nüfus artış hızının yaklaşık iki katı oranında yükselmiş; bu eğilim, su talebinin beklenenden hızlı arttığı bölgelerde su kıtlığını daha da derinleştiren kritik bir baskı unsuru hâline gelmiştir (Callejas Moncaleano vd., 2021). Su talebindeki bu artışın temel nedenlerinden biri, suyun çeşitli sektörlerdeki verimsiz kullanımınıdır. Suyun verimsiz kullanımı; toplum refahını, ülkelerin ekonomik istikrarını ve çevresel sürdürülebilirliği olumsuz etkileyen önemli bir faktördür (Kilemo, 2022). Bu nedenle su kullanım verimliliği, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) arasında yer alan SKA 6.4.1 kapsamında izlenen anahtar göstergelerden biridir. Bununla birlikte su kullanım verimliliği göstergesinde ilerleme, özellikle doğal kaynak baskısının yoğun olduğu, ekonomik büyümenin yavaş seyrettiği ve kurumsal kapasitenin sınırlı kaldığı birçok gelişmekte olan ülkede beklenenden daha yavaş gerçekleşmektedir (Callejas Moncaleano vd., 2021).

Mevcut göstergeler, yakın bir gelecekte küresel su kaynaklarının hızla artan insani ihtiyaçları karşılamada yetersiz kalabileceğine işaret etmektedir. Uyumlu ve kapsamlı küresel eylemler geliştirilmediği takdirde, suya yönelik talep ile mevcut arz arasındaki fark giderek büyüyecek ve bu durum ciddi sosyal, ekonomik ve politik sonuçlar doğuracaktır. Su kaynakları üzerindeki rekabetin artması, ülkeleri kendi nüfuslarının su güvenliğini sağlamak adına daha güçlü politikalar geliştirmeye, yeni yönetim stratejileri oluşturmaya ve yasal düzenlemeleri hayata geçirmeye zorlamaktadır. Bu bağlamda su yönetimi, yalnızca çevresel bir mesele olmaktan çıkıp ulusal kalkınma, toplumsal refah ve bölgesel istikrar açısından stratejik bir öncelik hâline gelmiş ve su verimliliği ile uygulamalar önem kazanmıştır.

## **Su Verimliliği Uygulamaları**

Su verimliliği uygulamaları, politika yapımcılar ve su yöneticileri açısından, su çekimi ile su talebi arasındaki giderek büyüyen farkı azaltmaya yönelik temel müdahale alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bu uygulamalar, suyu daha etkin kullanan, kaynakların korunmasını sağlayan ve ekolojik baskıları azaltan stratejik önlemler bütünüdür. Su tüketiminin azaltılması; su arıtma tesislerine yönelen yükün hafiflemesine, sulama sistemlerindeki su akışının optimize edilmesine ve böylece hem çevresel etkilerin hem de altyapı ile işletme maliyetlerinin düşürülmesine olanak tanır. Dolayısıyla su verimliliği, yalnızca doğal kaynakların korunması açısından değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik ve uzun vadeli sistem dayanıklılığı açısından da kritik bir araçtır (Habibi Rad vd., 2019).

Su verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalar, sektörel ihtiyaçlara ve yerel koşullara göre çeşitlenmekle birlikte, temel olarak suyun daha az kayıpla, daha yüksek etkinlikle ve döngüsel bir yaklaşımla kullanılmasını hedefleyen müdahaleleri kapsar. Kentsel

ölçekte bu uygulamalar; aktif sızıntı tespiti, basınç yönetimi, akıllı sayaç ve izleme sistemleri, düşük debili armatürlerin yaygınlaştırılması ve gri su ve yağmur suyu kullanımının artırılması gibi teknik ve davranışsal önlemleri içerir. Endüstriyel süreçlerde kapalı devre sistemlerin kurulması, proses suyu geri kazanımı, temiz üretim teknikleri ve su enerji eş optimizasyonu ön plana çıkarken; tarımsal alanda damla sulama, sensör tabanlı sulama planlaması, evapotranspirasyon (ET) temelli sulama takvimi ve ürün deseninin su potansiyeline göre yeniden düzenlenmesi gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Bu uygulamaların tümü, su tüketimini düşürmenin yanı sıra enerji kullanımını azaltmakta, işletme maliyetlerini düşürmekte ve doğal ekosistemler üzerindeki baskıyı önemli ölçüde azaltarak sürdürülebilir su yönetimine katkı sağlamaktadır. Türkiye’de yayımlanan Su Verimliliği Hedefi ve Uygulama Kılavuzlarında da bu tür uygulamaların sektörel olarak nasıl hayata geçirilebileceğine yönelik kapsamlı yol haritaları sunmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı SYGM, 2023). Bu uygulamalar, suyu kullanan ana sektörler olan evsel/kentsel, endüstriyel ve tarımsal alanlarda kayıpları minimize etmeyi ve aynı faydayı daha az su ile sağlamayı hedefler.

### ***Evsel ve Kentsel Su Verimliliği Uygulamaları***

Kentsel alanlardaki su verimliliği uygulamaları hem şebeke düzeyinde hem de bireysel tüketim düzeyinde atılan adımları kapsamaktadır. Temel odak noktası, altyapıda meydana gelen su kayıplarını azaltmak ve suyu alternatif kaynaklarla ikame etmektir. Bunlar arasında en etkili uygulamalardan biri kayıp ve kaçak kontrolüdür. Bu uygulama, eskiyen şebeke sistemlerinden kaynaklanan fiziksel (sızıntı) ve ticari (sayaç hatası/yasa dışı kullanım) kayıpların azaltılması şeklindedir (AL-Washali vd., 2016). Bu, Bölgesel Basınç Yönetimi (BBY) sistemleri ve aktif kaçak arama teknolojileri ile sağlanabilir. Akıllı şehir uygulamaları, gerçek zamanlı izleme, otomatik sayaç okuma sistemleri ve yapay zeka destekli talep tahminleri, su dağıtımının optimizasyonunu ve hızlı arıza müdahalesini mümkün kılan uygulamalardır. Bir diğer uygulama ise alternatif su kaynaklarının entegrasyonudur. Yağmur suyu hasadı ve gri suyun (duş, lavabo suları) arıtılarak tuvalet sifonları veya peyzaj sulaması gibi ikincil amaçlarla yeniden kullanımı, içme suyu kaynakları üzerindeki baskıyı azaltan en önemli uygulamalar arasında yer alır (Vuppaladadiyam vd., 2019).



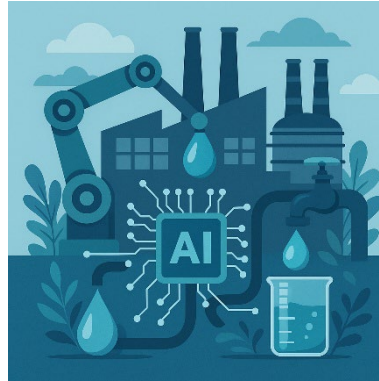
### ***Tarımsal Su Verimliliği Uygulamaları***

Küresel ölçekte en büyük su tüketicisi olan tarım sektörü için su verimliliği uygulamaları, gıda güvenliğini tehlikeye atmadan su kullanım etkinliğini artırmayı amaçlamaktadır. Modern sulama sistemlerine geçiş bu sektörün en önemli uygulamaları arasındadır. Bu uygulama kapsamında geleneksel salma sulama

yöntemlerinden, damla ve mikro-yağmurlama sulama gibi yüksek randımanlı, kontrollü sistemlere geçiş önerilir. Bu sistemler, suyun doğrudan bitki kök bölgesine ulaştırılmasını sağlayarak buharlaşma ve yüzey akış kayıplarını en aza indirir. Hassas tarım ve akıllı sulama teknikleri, toprak nem sensörleri, meteorolojik veriler ve uydu görüntüleri (uzaktan algılama) kullanılarak bitkinin tam olarak ne zaman ve ne kadar suya ihtiyacı olduğunun belirlenmesi (gerçek zamanlı sulama planlaması) ile optimum su kullanımına olanak tanır. Su stresine dayanıklı bitki çeşitlerinin seçimi ile bölgesel iklime ve toprak yapısına uygun, su ihtiyacı düşük olan bitki çeşitlerinin kullanımı sağlanarak kısıtlı sulama gibi yenilikçi kültürel uygulamaların yaygınlaştırılması önemlidir (Yadav vd., 2024).

### ***Endüstriyel Su Verimliliği Uygulamaları***

Endüstriyel su kullanımının azaltılması yönündeki çalışmalar, üretim süreçlerindeki su kullanımını rasyonelleştirmeyi, atıkları azaltmayı ve döngüsel ekonomiye geçişi hızlandırmayı hedefler. Bu uygulamalarda su etütleri ve yönetim planları ile her tesisin su ayak izini ve kritik kullanım noktalarını belirlemek amacıyla detaylı su verimliliği etütleri yapılır. Bu etütler, atık minimizasyonu ve geri kazanım potansiyelini ortaya çıkarır. Kapalı döngü sistemleri ve geri kazanım uygulamalarında proses suyu, soğutma suyu ve yıkama suları gibi atık suların ileri arıtma teknolojileri (membran filtrasyonu, ters ozmoz vb.) kullanılarak arıtılması ve aynı tesiste veya başka bir endüstriyel süreçte yeniden kullanıma sunulması yoluyla su kullanımı önemli ölçüde azaltılabilir (Florides vd., 2024). Sektörel standartların belirlenmesi, çok fazla su tüketen belirli endüstri kolları (tekstil, gıda, enerji) için birim üretim başına maksimum su kullanım miktarlarının belirlenmesi ve yasal düzenlemelerle sektör çapında verimlilik yönündeki uygulamalar teşvik edilebilir.



Belirtilen bu üç ana sektördeki su verimliliği stratejileri, geleneksel yaklaşımlarından dijitalleşen ve öngörüye dayalı yönetim modellerine evrilirken, akademik araştırmalar için yeni ve zorlu bir paradigma oluşturmuştur. Güncel bilimsel literatür artık bu kompleks sistemlerin dinamiklerini anlamaya, AI destekli karar destek mekanizmalarının güvenilirliğini ve ölçeklenebilirliğini test etmeye odaklanmaktadır. Bu bağlamda, su kaynaklarının etkin yönetimi alanındaki son akademik çalışmalar, yalnızca strateji ve politika önerileri sunmakla kalmayıp, aynı zamanda sahada uygulanabilir, çok disiplinli ve teknoloji yoğun çözümler geliştirmeye yönelmektedir.



## Yapay Zeka Uygulamaları

Günümüzde su verimliliği uygulamalarında yapay zekâ (YZ) tabanlı yaklaşımlar, su temini, dağıtım ve sürdürülebilir yönetim süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla giderek daha fazla araştırılmaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileriyle entegre edilen yapay zekâ, öğrenme algoritmaları ve makine öğrenimi (ML) yöntemleri, su yönetim sistemlerinin ve dağıtım altyapılarının karmaşık yapısını analiz edebilmek ve bu sistemlerdeki zorlukların üstesinden gelebilmek için akıllı modelleme araçları geliştirmektedir. YZ ve ML tabanlı modeller; atıksu arıtımı, su kirliliği kontrolü, akıllı tarım uygulamaları, su kullanımının optimizasyonu, su kalitesi ve seviye izleme, otomatik kontrol sistemleri, döngüsel tarım ve topraksız tarım (hidroponik) gibi su temelli tarımsal üretim sistemlerinde başarıyla uygulanmaktadır. Literatürde, su yönetimi alanında en sık kullanılan makine öğrenimi modelleri arasında yapay sinir ağları (YSA), uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), tekrarlayan sinir ağları (RNN), rastgele orman (RF) ve destek vektör regresyonu (SVR) gibi yöntemler yer almaktadır (Krishnan vd., 2022).

Su kalitesinin izlenmesi, akıllı kentlerde güvenilir ve sürdürülebilir su dağıtımının sağlanmasında temel bir bileşendir. Su kaynaklarında kirleticilerin doğru biçimde tespit edilmesi ve etkili giderim süreçlerinin uygulanması, su yönetimi politikalarının vazgeçilmez unsurları arasında yer almaktadır. Güncel su verimliliği planları, arıtılmış atıksuların belirli oranlarda yeniden kullanılmasını hem teşvik etmekte hem de birçok durumda yasal bir gereklilik haline getirmektedir. Bu kapsamda, atıksu arıtım süreçlerinin izlenmesi, optimizasyonu ve performansının artırılmasında yapay zeka temelli yöntemlerin kullanımı giderek daha yaygın ve etkin bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Zhao ve arkadaşları, atık su arıtma sürecine ilişkin farklı yapay zeka tekniklerini araştırmış ve atıksu yönetimi için kullanılan yapay zeka uygulamalarını ve tüm sürecin maliyet ve lojistiğini tartışmışlardır. Yazarlar, atık su arıtma sürecinde kullanılan iki ana etkili yapay zeka yönteminin YSA ve Federatif Öğrenme (FL) olduğu sonucuna varmıştır (Zhao vd., 2020). Başka bir araştırmada, Genetik Algoritmalar (GA) kullanarak atık suda ölçülecek Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), pH seviyeleri, Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ), azot, bulanıklık ve kükürt gibi ana parametreleri tartıştılar. Araştırmacılar, ayrıca ağır metallerin ve diğer atıksuların izinin, %85-90 doğruluk üretebilen diğer AI yöntemleriyle birleştirilmiş ANN uygulanarak belirlenebileceğini rapor ettiler (Malviya & Jaspal, 2021). Geniş bir yelpazedeki atıksu kirleticilerinin giderimi için en yaygın kullanılan teknik adsorpsiyondur.

Araştırmacılar sülfürik asitle aktivasyon ve amonyum hidroksitle hidrotermal işlem yoluyla üretilen yeşil alglerden (*Ulva lactuca*) türetilen biyokömür-amonyak gibi yeni bir adsorban kullanılarak sulu çözeltilerden metilen mavisi (MV) boyasının uzaklaştırılmasını araştırmışlardır. Araştırmacılar en uygun YSA modelini değerlendirmek için, örnek verilerinin %70'i eğitim için kalan %30'u doğrulama ve test için kullanmışlar ve MV boya adsorpsiyonuna en uygun YSA modelini elde etmek için geri yayılım algoritmasını kullanarak yüksek korelasyonlar elde etmişler (Shoaib et al., 2025).

Su buharlaşması, özellikle tropikal bölgelerde su kıtlığının ana parametrelerinden biridir. Bu kapsamda Soltani ve arkadaşları, yapay zeka algoritması kullanılarak atık su havuzunda yüzen bir güneş enerjisi sisteminin su kaybını yüzey buharlaşmasının nasıl etkilediği araştırmışlardır. Tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması, yapay sinir ağı tarafından yapılan tahminlerin geleneksel regresyon tahminlerinden daha doğru olduğunu göstermiştir. Yapay sinir ağını eğitmek için kullanılan yöntemler arasında, Levenberg-Marquardt tekniği, doğru çıktılar üretme açısından en iyi performansı göstermiştir. En iyi yapay sinir ağı yapısının, 9 girdi, 35 gizli nöron ve bir çıktı nöronundan oluşan ve ortalama karesel hatası  $4,64658 \times 10^{20}$  lik korelasyon katsayısı 0,9999 olan yapı olduğu bulunmuştur (Khalifeh Soltani vd., 2022). Tarım sektöründe su yönetimi hem gıda güvenliğinin sağlanması hem de ülke ekonomisinin sürdürülebilir büyümesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Yapılan bir çalışmada Ubidots sunucusunu kullanan IoT tabanlı akıllı tarım sulama ve izleme sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem, IoT kullanarak su pompası yönetimini otomatikleştiren ve güneş ışığı, sıcaklık ve nem seviyelerini insan etkileşimi olmadan izleyen akıllı bir sulama ve izlemeden oluşmaktadır. Sistemin donanım bileşenleri arasında bir toprak nem sensörü, bir güneş ışığı sensörü, sıcaklık ve nem (DHT11) sensörleri, bir ESP32 mikrodenetleyici ve bir pompa motoru bulunmaktadır. Sensörler, ESP32 mikrodenetleyicisinin pompa motorunu düzgün bir şekilde çalıştırmak için ihtiyaç duyduğu bilgileri toplamaktan sorumludur. Sensörlerden gelen verileri uzaktan çalıştırmak ve izlemek için ESP32, kablosuz bir sensör ağı aracılığıyla bilinen Ubidots sunucusuyla da entegre edilmiştir. Başlangıçta, DHT11, toprak nem sensörleri ve güneş ışığı seviye sensörleri gibi sensörler tarladan veri toplar ve bunları ESP32 mikrodenetleyicisine gönderir. Mikrodenetleyici daha sonra alınan verileri önceden depolanan verilerle karşılaştırır. Değerler eşik değerinden büyükse, ilgili cihazlar açılır ve sensör değerini ve pompa motorunun durumunu Ubidots sunucusuna günceller. Yazarlar geliştirdikleri bu sistemin güneş pilleri, sensörler ve merkezi kontrol ünitesi için güç kaynağı olarak kullanılabileceğini belirtmişler ve güneş enerjisinin kullanımın, tüm sistem için daha ucuz bir güç kaynağı sağlayacağını da rapor etmişlerdir(Mohiuddin vd., 2024).



IoT tekniklerinin su yönetim sistemiyle entegrasyonu, su tedarik zinciri sistemindeki kritik zorlukları azaltmak için çok çeşitli faydalar sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda su kıtlığının en önemli nedenlerinden birinin, su kaynaklarının kötü yönetimine yol açan uygun altyapının eksikliği olduğu vurgulanmıştır. Tüketim için yeterli fiziksel su bulunmasına rağmen, suyun tüketicilere ulaştırıldığında, verimli bir su yönetim sisteminin olmaması nedeniyle önemli bir miktarının israf edilmekte olduğu vurgulanmış ve mevcut sorunları IoT tekniklerinin dahil edilmesiyle çözülebileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar IoT tabanlı su yönetim sistemini formüle ederek su kaynağı israfını azaltmak için uygun çözümler sunmuşlardır (Maroli vd., 2021).

Sızıntı tespiti, su dağıtımı ve su kalitesi tahmini gibi üç temel alanda su yönetimini optimize etmek için gelişmiş yapay zeka tekniklerinin kullanımını inceleyen bir çalışmada, yapay zeka modellerini gerçek zamanlı veriler ve IoT teknolojileriyle entegre ederek, su yönetiminin uyarlanabilirliğini artırarak, verimli ve sürdürülebilir kaynak kullanımı için gerçek zamanlı izleme ve karar almanın mümkün olduğunu raporlamışlardır. Çalışmanın kapsamında Random Forest, Gradient Boosting, AdaBoost ve Bagging gibi topluluk öğrenme modellerini uygulayarak bu yaklaşımlarla, su dağıtımını optimize edilerek ve sızıntılardan kaynaklanan kayıpları en aza indirerek doğru su kalitesi tahminleri ile operasyonel verimliliğin artırılabilirliğini belirtmişlerdir (Ortiz & Zamudio-García, 2025). Benzer şekilde Farooq ve arkadaşları yapay zekanın, erken sızıntı tespitini, öngörücü bakımı ve talep tahminini geliştirerek verimli su dağıtımını ve maliyet düşüşünü desteklediğini belirtmişlerdir. Yapay zeka destekli akıllı sulama ve hassas tarım teknolojilerinin, sürdürülebilir tarımda su verimliliğini artırdığını ve ürün verimini yükselterek kaynak israfını en aza indirdiğini vurgulamışlardır. Aynı zamanda yapay zekanın, su kalitesi izlemede gerçek zamanlı kirletici tespitini kolaylaştırarak arıtma sistemlerini iyileştirdiğini ve kimyasal kullanımını azaltarak halk sağlığını koruduğunu bildirmişlerdir. Yapay zekanın, kişiye özel su tasarrufu teknikleri ve eğitim kaynakları sağlayarak kamu bilincini artırma yönünde etkin olduğunu ve sürdürülebilir uygulamaları teşvik ettiğini de rapor ederek ML ve veri analitiğindeki gelecekteki gelişmelerin, su tasarrufu çabalarını önemli ölçüde dönüştürmesi yönündeki beklentilerini de vurgulamışlardır (Farooq vd., 2025).

Araştırmalar giderek artan bir su kıtlığına ve yeni teknolojiler aracılığıyla su dayanıklılığını güçlendirme ihtiyacına sıklıkla vurgu yapmaktadır. Özellikle, yapay zekanın (YZ) verimli su hasadı, yönetimi ve dağıtımında stratejik bir araç olarak rolü belirtilmektedir. Yağmur suyu hasadı, su temini ihtiyaçlarını karşılamak için yüzyıllardır bilinen en eski uygulamadır. Bu konuya bugünkü teknolojik yaklaşım ise bu yönüde yapay zekanın dahil edilmesini, makine öğrenimi modellerinin geliştirilmesini, mevsimselliğin istatistiksel analizini, akış deseni tespitini ve kalite kontrol yöntemlerini kolaylaştırmasını ifade etmektedir. Yağmur suyu hasadı ile, yüzey akışını toplama, depolama ve yeniden kullanma süreci, özellikle kuraklığa eğilimli bölgelerde su bulunabilirliğini iyileştirmek için su verimliliği uygulamalarında doğa temelli bir çözüm olarak sunulmaktadır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada ML ve coğrafi bilgi teknikleri kullanılarak yağmur suyu hasadı uygunluğu ve ürün su talebi değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme için 7 ML modeli kullanılmıştır: rastgele orman (RF), gradyan artırma (GB), destek vektör regresyonu (SVR), sinir ağı (NN), aşırı gradyan artırma (XGBoost), K-en yakın komşular (KNN) ve bir topluluk modeli (EM). Bunlar arasında EM en iyi performansı göstermiştir (Kabir vd., 2025). Yağış tahmini, yağmur suyu yönetimi ve hasadı sistemlerinin etkin planlanmasında kritik bir bileşendir (Maldonado Benitez vd., 2025). Altobelli ve arkadaşları, yağış tahminlerini

ve depolama tankı su seviyelerini temel alarak gerçek zamanlı çalışan bir kontrol sistemi geliştirmiştir. Sistem, hava tahmini verilerini kullanarak depolama hacmini önceden optimize etmekte, böylece aşırı akışları önleyip kanalizasyona deşarjı sınırlamaktadır. Adaptif kontrol algoritması, içme suyu tüketimini azaltırken hidrolojik dengenin korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu tür proaktif ve veri odaklı yaklaşımlar, kentleşmenin neden olduğu tepe akış artışlarını azaltarak sürdürülebilir su döngüsünün desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Altobelli vd., 2023).



Kentsel atıksuların önemli bir bölümünü oluşturan gri sular su verimliliği uygulamalarının temelinde yer alır. Bu suların bileşiminin ve kirlilik düzeylerinin doğru şekilde analiz edilmesi, etkili bir geri kazanım sisteminin tasarlanması açısından kritik öneme sahiptir. Son dönemde araştırmalar, gri suyun geri dönüşüm sürecinde yapay zekâ (YZ) tekniklerinin bu belirsizlikleri azaltmada önemli bir araç olabileceğini göstermektedir. Özellikle yapay sinir ağları (YSA) ve rastgele orman (RF) modelleri, mikro kirleticilerin (mikroplastikler, yüzey aktif maddeler, boyalar, ilaç kalıntıları vb.) gideriminde yüksek tahmin doğruluğu sağlamış; fizikokimyasal, biyolojik ve ileri oksidasyon süreçlerinin optimizasyonunda umut verici sonuçlar vermiştir. Ayrıca YZ tabanlı yaklaşımlar, bu sistemlerde sıklıkla kullanılan membranlardaki kirlenme davranışlarını yüksek hassasiyetle modelleyerek arıtma performansını artıran etkili stratejiler geliştirilmesine olanak tanımışlardır. Bir biyoreaktör içindeki hem yerleşik hem de atık mikrobiyal topluluklar için %100 tahmin doğruluğu gösteren rastgele orman (RF) modeliyle muazzam bir başarı elde edilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapay zeka araştırmalarının, mikroplastikler (MP'ler) gibi ortaya çıkan kirleticileri tespit etme ve tanımlama, yeniden kullanım amacıyla arıtılmış gri su kalitesini değerlendirme ve yapay zeka modellerini eğitmek için veri toplama amacıyla bulut bilişim ve IoT gibi teknolojilerden yararlanma konularındaki gelişmelere öncelik verilmesi gerektiği bildirilmiştir (Mustafa vd., 2025). Gri su ile yapılan başka bir çalışmada araştırmacılar kullanılmayan sudan faydalanmak amacıyla alüminyum elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon ile gri suyun arıtımını incelenmiştir. Gri suların arıtımında optimum koşulları belirledikleri ve işletme maliyetini hesapladıkları çalışmada bulanıklık giderimi üzerinde değişkenlerin etkisini simüle etmek için bir yapay zeka programı geliştirmişlerdir. Üç girişli (akım yoğunluğu, elektroliz süresi ve elektrotlar arası boşluk) ve bir çıkışlı (bulanıklık giderimi) bir 3–6–1 sinir ağı ile deneysel sonuçları başarıyla simüle etmişler ve elde ettikleri sistemde en etkili girdi olarak akım yoğunluğunu bulmuşlardır. Gelecekteki çalışmaların odağında önerilen teknolojilerin saha ölçeğinde uygulamalarla sürekli modda incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Nasr vd., 2016).

## Sonuçlar ve Gelecek Beklentiler

Son dönemde yapılan çalışmalar, yapay zekânın su yönetimi alanındaki dönüştürücü potansiyelini açık biçimde ortaya koymakta ve kentleşme, nüfus artışı ile iklim değişikliğinin neden olduğu karmaşık sorunların çözümünde bu teknolojilerin daha geniş ölçekli olarak benimsenmesi gerektiğini göstermektedir. Yapay zeka destekli izleme, tahmin ve optimizasyon sistemleri, yalnızca suyun etkin kullanımını sağlamakla kalmayıp, kaynak yönetiminde karar destek süreçlerini güçlendirmekte ve süreç otomasyonuna dayalı yeni bir yönetim anlayışının gelişmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, giderek daha değişken ve belirsiz bir iklim ortamında, yapay zekâ destekli su verimliliği uygulamalarının su sektöründe işletme verimliliğini artıracığı, kayıpları azaltacağı ve sürdürülebilir kaynak yönetimi için yenilikçi bir dönemi başlatacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla geleceğe dönük araştırmaların, bu teknolojilerin yerel koşullara uyarlanması, veri altyapısının güçlendirilmesi ve politika düzeyinde entegrasyonuna odaklanması büyük önem taşımaktadır.

Geleceğe dönük olarak yapay zeka temelli su yönetimi çalışmalarında sürdürülebilir başarı, yalnızca teknolojik gelişmelerin hızına değil, aynı zamanda disiplinler arası ortaklıklara, kurumsal kapasite artışına ve güçlü bir veri altyapısının oluşturulmasına bağlıdır. Özellikle IoT, uzaktan algılama sistemleri ve büyük veri analitiğiyle bütünleşik çalışan yapay zekâ modelleri, su kaynaklarının izlenmesi, tahmin edilmesi ve planlanmasında yenilikçi fırsatlar sunmaktadır. Bununla birlikte, veri güvenliği, standardizasyon eksikliği, modellerin genelleştirilebilirliği ve maliyet-etkin uygulama mekanizmaları gibi konular halen çözüm bekleyen araştırma öncelikleri arasında yer almaktadır. Dolayısıyla gelecekteki çalışmaların yalnızca algoritmik performans göstergelerine değil, aynı zamanda su yönetimi karar süreçlerinin çevresel, ekonomik ve sosyal yönlerine de odaklanması gerekmektedir. Bu bütüncül yaklaşım benimsendiğinde, yapay zeka destekli su verimliliği sistemleri sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu, uzun vadeli ve kapsayıcı çözümler üreten stratejik bir araç haline gelebilecektir.

## KAYNAKÇA

- Altobelli, M., Evangelisti, M., & Maglionico, M. (2023). Multi-Objective Performance of Detention Basins and Rainwater Harvesting Systems Using Real-Time Controls with Rainfall Forecasts. *Water*, 16(1), 71. <https://doi.org/10.3390/w16010071>
- AL-Washali, T., Sharma, S., & Kennedy, M. (2016). Methods of Assessment of Water Losses in Water Supply Systems: a Review. *Water Resources Management*, 30(14), 4985-5001. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1503-7>
- Balki, M.K., Çavuş, V. (2023) "Yağ Asitlerinden Biyodizel Yakıt Özelliklerinin Tahmini", Kitap: Mühendislikte Yapay Zekâ Araştırmaları, Ankara/Türkiye: Nobel Bilimsel Eserler, Bölüm Sayfaları: 1 / 21, ISBN: 978-625-393-209-1
- Callejas Moncaleano, D. C., Pande, S., & Rietveld, L. (2021). Water Use Efficiency: A Review of Contextual and Behavioral Factors. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.685650>
- Çavuş, V., Sarıkaya, M. (2021) "Yapay Sinir Ağları ve Güneş Enerji Sistemlerinde Uygulamaları", Kitap: Yapay Zeka Uygulamalarında Güncel Konular ve Araştırmalar, Konya/Türkiye : Çizgi Kitapevi, Bölüm Sayfaları: 7 / 22, ISBN: 978-605-196-623-6
- Farooq, M. U., Murtaza, G., Mahmood, M. H., Rai, S. I., Tanveer, H., Haq, E. U., Muhammad, H., & Sabir, R. M. M. (2025). *AI-Powered Solutions for Sustainable Water Conservation* (ss. 473-512). <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-0680-3.ch016>
- Florides, F., Giannakoudi, M., Ioannou, G., Lazaridou, D., Lamprinidou, E., Loukoutos, N., Spyridou, M., Tosounidis, E., Xanthopoulou, M., & Katsoyiannis, I. A. (2024). Water

- Reuse: A Comprehensive Review. *Environments*, 11(4), 81. <https://doi.org/10.3390/environments11040081>
- Habibi Rad, M., Sarkheil, H., & Khojastehpour, R. (2019). Analysing water use efficiency and productivity in Iran's metropolises. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 172(2), 102-108. <https://doi.org/10.1680/jwama.17.00025>
- Kabir, Md. N., Hasan, M. N., Hridi, T. T., Islam, Md. M., Barua, E., Mostan, N., & Sayem, S. M. S. (2025). Optimizing Artificial Rainwater Harvesting in the Northwest Zone of Bangladesh: Integrated Machine Learning and a GIS-Based Multicriteria Approach. *Water Conservation Science and Engineering*, 10(2), 56. <https://doi.org/10.1007/s41101-025-00381-0>
- Khalifeh Soltani, S. R., Mostafaeipour, A., Almutairi, K., Hosseini Dehshiri, S. J., Hosseini Dehshiri, S. S., & Techato, K. (2022). Predicting effect of floating photovoltaic power plant on water loss through surface evaporation for wastewater pond using artificial intelligence: A case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101849. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101849>
- Kilemo, D. B. (2022). The Review of Water Use Efficiency and Water Productivity Metrics and Their Role in Sustainable Water Resources Management. *OALib*, 09(01), 1-21. <https://doi.org/10.4236/oalib.1107075>
- Krishnan, S. R., Nallakaruppan, M. K., Chengoden, R., Koppu, S., Iyapparaja, M., Sadhasivam, J., & Sethuraman, S. (2022). Smart Water Resource Management Using Artificial Intelligence—A Review. *Sustainability*, 14(20), 13384. <https://doi.org/10.3390/su142013384>
- Maldonado Benitez, V. M., Morales Matamoros, O., & Moreno Escobar, J. J. (2025). Towards Resilient Cities: Systematic Review of the Literature on the Use of AI to Optimize Water Harvesting and Mitigate Scarcity. *Water*, 17(13), 1978. <https://doi.org/10.3390/w17131978>
- Malviya, A., & Jaspal, D. (2021). Artificial intelligence as an upcoming technology in wastewater treatment: a comprehensive review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 177-187. <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1913242>
- Maroli, A. A., Narwane, V. S., Raut, R. D., & Narkhede, B. E. (2021). Framework for the implementation of an Internet of Things (IoT)-based water distribution and management system. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(1), 271-283. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01975-z>
- Mohiuddin, M., Islam, Md. S., & Shanjida, S. (2024). Internet of Things (IoT)-Based Smart Agriculture Irrigation and Monitoring System Using Ubidots Server. *ECSA-11*, 99. <https://doi.org/10.3390/ecsa-11-20528>
- Mustafa, M., Epelle, E. I., Macfarlane, A., Cusack, M., Burns, A., & Yaseen, M. (2025). Innovative approaches to greywater micropollutant removal: AI-driven solutions and future outlook. *RSC Advances*, 15(16), 12125-12151. <https://doi.org/10.1039/D5RA00489F>
- Nasr, M., Ateia, M., & Hassan, K. (2016). Artificial intelligence for greywater treatment using electrocoagulation process. *Separation Science and Technology*, 51(1), 96-105. <https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1062399>
- Ortiz, J. A., & Zamudio-García, V. M. (2025). Optimising Water Use Through Smart Models and Artificial Intelligence. İçinde *Smart Water Technology for Sustainable Management in Modern Cities* (ss. 165-196). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8074-1.ch008>
- Sangamnere, R., Misra, T., Bherwani, H., Kapley, A., & Kumar, R. (2023). A critical review of conventional and emerging wastewater treatment technologies. *Sustainable Water Resources Management*, 9(2), 58. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00829-y>
- Shoaib, A. G. M., Yilmaz, M., El Sikaily, A., Hassaan, M. A., El-Nemr, M. A., & El Nemr, A. (2025). Isotherm, kinetics and ANN analysis of methylene blue adsorption onto nitrogen doped Ulva lactuca Biochar. *Scientific Reports*, 15(1), 10642. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92973-y>
- Tarım ve Orman Bakanlığı SYGM. (2023). *Değişen İklim Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2023–2033)*.


- Vuppaladadiyam, A. K., Merayo, N., Prinsen, P., Luque, R., Blanco, A., & Zhao, M. (2019). A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(1), 77-99. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9487-9>
- Whig, P., Sharma, P., Aneja, N., Elngar, A. A., & Silva, N. (2024). *Artificial Intelligence and Machine Learning for Sustainable Development*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003497189>
- WWAP. (2017). *Wastewater: the untapped resource: the United Nations world water development report 2017*. United Nations Education, Scientific and Cultural Organization.
- Yadav, M., Vashisht, B. B., Jalota, S. K., Jyolsna, T., Singh, S. P., Kumar, A., Kumar, A., & Singh, G. (2024). Improving Water Efficiencies in Rural Agriculture for Sustainability of Water Resources: A Review. *Water Resources Management*, 38(10), 3505-3526. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03836-6>
- Zhao, L., Dai, T., Qiao, Z., Sun, P., Hao, J., & Yang, Y. (2020). Application of artificial intelligence to wastewater treatment: A bibliometric analysis and systematic review of technology, economy, management, and wastewater reuse. *Process Safety and Environmental Protection*, 133, 169-182. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.014>

## BÖLÜM 4

### ALG TEMELLİ ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU İÇİN YAPAY ZEKA UYGULAMALARI


*Fatih GÜMÜŞ*

*Doç. Dr., Sinop Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi,  
Biyoloji Bölümü, fgumus@sinop.edu.tr*

 0000-0002-4660-7591

*Dilek GÜMÜŞ*

*Doç. Dr., Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,  
Çevre Mühendisliği Bölümü, dgumus@sinop.edu.tr*

 0000-0001-7665-3057

Su, gezegenimizin en kritik doğal kaynaklarından biridir. Sanayileşmiş ülkelerde su kalitesinin giderek bozulması ve gelişmekte olan ülkelerde temiz suya erişimin sınırlı olması küresel ölçekte önemli bir çevresel tehdit oluşturmaktadır (Muñoz vd., 2009). Birleşmiş Milletler Dünya Su Kalkınma Raporu'na göre (UN-Water, 2021), dünya genelinde yılda yaklaşık 2212 km<sup>3</sup> atıksu üretilmektedir. FAO'nun AQUASTAT verilerine göre bu hacim, küresel ölçekte tüm sektörler tarafından gerçekleştirilen toplam su çekiminin yaklaşık %56'sına karşılık gelmektedir (Han vd., 2023). Bu durum, kullanılan suyun önemli bir bölümünün nihai olarak atıksuya dönüştüğünü ve dolayısıyla atıksu arıtım süreçlerinin küresel su güvenliği açısından kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Belediyelere, tarımsal drenajlara ve endüstriyel faaliyetlere bağlı olarak atıksuların mikroplastikler, ağır metaller, yüksek nitrat ve fosfat konsantrasyonları ile çeşitli organik ve inorganik karbon bileşikleri bakımından kirlenmesi; ekosistem bütünlüğünü bozmakta, besin zincirine zarar vermekte ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Kentsel ve endüstriyel atıksu miktarlarının hızla artması ve çevresel kalite standartlarının giderek sıkılaştırılması, atıksuların sürdürülebilir bir şekilde arıtılmasını zorunlu hale getirmiştir.



Ancak atıksuların arıtımı (AA), değişken kirletici yapısı, farklı ölçeklerdeki atıksu sistemleri ve yerel çevresel koşullar nedeniyle tek bir teknolojiyle yönetilemeyecek kadar çok boyutlu ve karmaşık bir küresel sorun olarak kabul edilmektedir (Wollmann vd., 2019). Bu bağlamda, biyolojik arıtma süreçlerinin yeniden değerlendirilmesi ve doğa-temelli çözümlerin arıtma teknolojilerine entegre edilmesi son yıllarda dikkat çekici bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Özellikle mikroalg ve makroalglerin atıksu arıtımında kullanımı; azot ve fosfor gibi besin elementlerinin, çeşitli organik kirleticilerin ve belirli mikrokirleticilerin giderimi açısından yenilikçi, sürdürülebilir ve umut vadeden bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

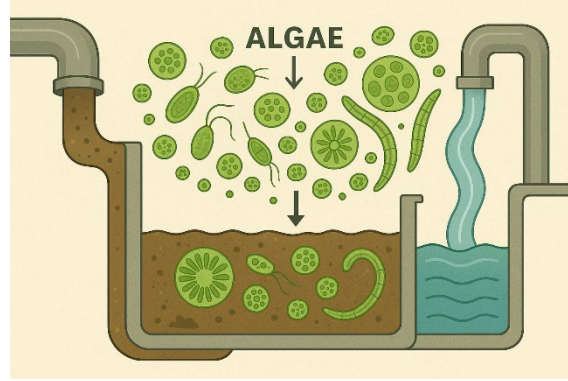
Alg-temelli sistemler yalnızca atıksu arıtımı sürecini desteklemekle kalmaz; aynı zamanda biyokütle üretimi, karbon yakalama, biyoyakıt, hayvan yemi, gübre öncülleri gibi değerli yan ürünlerin geri kazanımı gibi ekonomi-çevre entegrasyonunu da mümkün kılar. Ancak bu teknolojilerin büyük ölçekli uygulanabilirliği önünde hâlâ çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Biyokütle üretiminin dengesizliği, işletme parametrelerinin optimizasyonunun güçlüğü, sistemlerin değişken atıksu karakterine uyum sağlamakta güçlük çekmesi ve ışık ve sıcaklık gibi parametrelerin etkisi alg temelli uygulamalardaki başlıca problemlerdir (Abdelfattah vd., 2023). Bu noktada, alg-temelli sistemlerin modellemesi, kontrolü ve optimizasyonunda yapay zeka (YZ) ve makine öğrenmesi (ML) yaklaşımlarının önemli bir rol oynayabileceği düşünülmektedir.

### **Atıksu Arıtma Sistemlerinde Mikroalglerin Kullanımı**

Mikroalgler, metabolik ihtiyaçlarını karşılamak için doğal kaynakları (örneğin karbondioksit, güneş ışığı ve besinler) kullanan ve karşılığında karbonhidratlar, lipitler ve diğer yararlı ürünleri üreten tek hücreli mikroorganizmalardır (Chen vd., 2022). Alglerin inorganik karbonu (CO<sub>2</sub>) biyokütleyle dönüştürmesi mikroalg tanımında önemli bir özelliktir ancak, bazı mikroalg türleri, fotoototrofik büyüme yerine heterotrofik büyüme de gerçekleştirir. Bu türler enerji kaynağı olarak organik karbonu kullanırlar ve ışıksız ortamlarda yani tamamen karanlıkta büyüyebilirler. Ayrıca her iki yöntemi de kullanan genellikle miksotrof olarak adlandırılan bazı mikroalg türlerinden de bahsedilebilir. Bununla birlikte siyanobakteriler (mavi-yeşil algler) prokaryotik olmalarına ve bu nedenle gerçek algler olmamalarına rağmen, ökaryotik mikroalglerle benzer bir fizyoloji ve ekolojiye sahiptirler ve birçok biyoteknolojik uygulamaları mevcuttur. Nehirler, göller ve okyanuslar gibi sucül ortamlarda yaşayan mikroalgler ve siyanobakteriler topluca fitoplankton olarak adlandırılır. Ekosistemlerin başlıca birincil üreticileridirler ve zooplankton ve balıklar için enerji ve organik madde sağlarlar. Mikroalgler yüksek bir üstel büyüme hızına sahip olduklarından, karasal bitkilere kıyasla daha yüksek alansal biyokütle verimliliklerine ulaşırlar. Dahası,

mikroalg yetiştiriciliği verimli topraklara bağlı olmadığı için tarıma uygun olmayan arazilerde yapılabilir. Birçok mikroalg türü sınırlı tatlı su kaynaklarımıza bağımlı kalmayarak deniz suyunda yetişebilir (Thoré, 2023).

Mikroalgler hem alansal hem de metabolik esneklikleri, yani fotoototrofik, miksotrofik veya heterotrofik metabolizma gerçekleştirme kabiliyetleri nedeniyle, atıksu arıtımında ümit verici biyolojik sistemlerdir. Atıksu arıtımında mikroalgler sudaki kirleticilerin doğrudan gideriminde kullanıldığı gibi fotosentezden (simbiyotik ortak kültürler) ilave oksijen sağlayarak bakteri sistemlerinin (mikroalg-bakteri kümeleri) arıtma performansının iyileştirilmesinde, böylece doğrudan (gazlama performansı) veya dolaylı (karıştırma performansı) oksijen temininin sağlanarak toplam enerji maliyetlerinin azaltılması için de kullanılmaktadır (Wollmann vd., 2019).



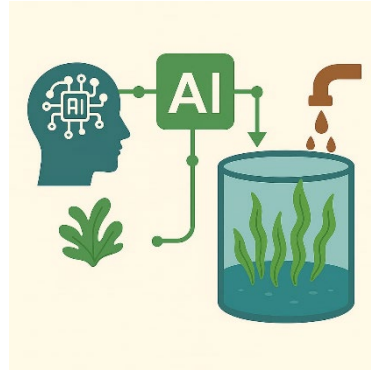
Mikroalglerin özellikleri ve prosesin çalışma koşulları gibi çeşitli işletme parametreleri, atıksu arıtma sistemlerinde alglerin üretkenliğini ve verimini etkiler. Alglerle atıksu arıtımı sudaki organik ve inorganik içerikle yakından ilişkilidir. Bu nedenle, üretkenliği artırmak ve minimum atıkla yüksek arıtma verimi elde etmek için verimli bir yöntem belirlemek amacıyla bu prosesleri optimize etmek çok önemlidir. Birden fazla girdiye sahip bir prosesi modellemek ve yorucu deneyler yapmadan çıktığı doğru bir şekilde tahmin etmek yapay zeka (YZ) araçları kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu araçlardan makine öğrenmesi alglerin büyüme optimizasyonunda, besin geri kazanımında, gerçek zamanlı karar destek sistemleri, alg biyokütlesinde kalite kontrolü, enerji verimliliği optimizasyonu ve daha birçok alanda öngörücü modellemede yaygın olarak kullanılmaktadır (Mafat et al., 2024).

### **Atıksu Arıtma Sistemlerinde Makroalglerin Kullanımı**

Mikroalglerin makroskobik karşılıkları makroalgler veya deniz yosunlarıdır. Makroalgler, sucul ekosistemlerde hızla çoğalabilen ve büyük biyoküteller oluşturabilen organizmalar olarak dikkat çekmektedir. Bu organizmaların sahip olduğu geniş yüzey alanı, yoğun hücre yapısı ve çeşitli fonksiyonel organik gruplar (örneğin hidroksil, karboksil grupları) onları yalnızca biyokütle veya biyoyakıt hammaddesi olarak değil, aynı zamanda su kalitesini iyileştirmek amacıyla da kullanılabilir bir kaynak haline getirir. Özellikle atıksu arıtımında, makroalg biyokütlesi ya da makroalglerden elde edilmiş türevler (örneğin aktif karbon haline getirilmiş ya da modifiye edilmiş alg matriksleri gibi) adsorpsiyon işlemleri başta olmak üzere çeşitli arıtma teknolojilerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar makroalglerin çeşitli organik ve inorganik kirleticilere karşı adsorpsiyon ve katalitik bozunma gibi süreçlerinde umut vaat ettiğini vurgulamaktadır (Suresh et al., 2024). Kırmızı makroalg kullanılarak hazırlanmış hidro-karbonlaştırılmış biyoadsorban ile arsenik gideriminin %84,75 seviyesine kadar çıktığı bildirilmektedir. (Khanzada vd., 2023). Başka bir çalışmada ise, makroalglerden atık sulardan organik

boyaların hızlı bir şekilde giderilmesi için ucuz, kolay hazırlanan ve mükemmel adsorpsiyon performanslı bir biyosorbent geliştirilmiştir (Qulatein & Sari Yılmaz, 2023). Bu tür çalışmalar, makroalglerin düşük maliyetli, yenilenebilir, çevreci adsorbanlar ve malzemeler olarak atıksu arıtımında kullanılabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, biyolojik temelli bu tür arıtma stratejileri, klasik kimyasal ve fiziksel arıtım yöntemlerine alternatif veya tamamlayıcı olarak ön plana çıkmaktadır. Bu çerçevede, makroalgere dayalı arıtım yaklaşımlarını yalnızca adsorpsiyon temelli uygulamalarla sınırlamayan, aynı zamanda biyoremediasyon ve biyokütle üretimini birlikte ele alan bütüncül bir endüstriyel ekoloji modeli ortaya çıkmaktadır (Zrimec vd., 2022).

Atıksu, yüksek kaliteli suya veya ticari kültür ortamlarına duyulan ihtiyacı azaltan bir üretim matrisi olarak değerlendirildiğinde; alglar bir yandan ortamdan azot, fosfor, organik karbon ve iz mineralleri geri kazanırken, diğer yandan büyük ölçekli biyokütle üretimine olanak tanır.



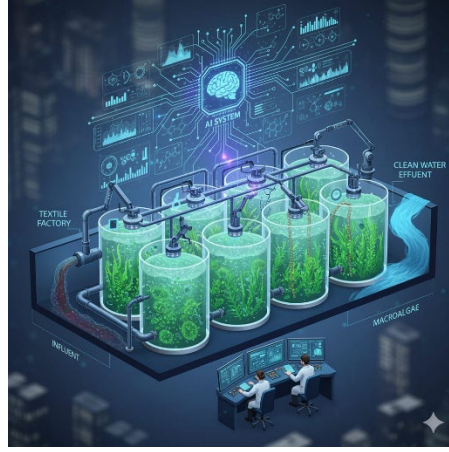
Atık suyun bir büyüme ortamı olarak kullanılması son dönemde araştırmacıların ilgisini çekmiş ve makroalglerin besin açısından zengin ortamlarda gelişmesini sağlayarak üretim maliyetlerini düşürmeyi hedeflemişlerdir. Bu yöntemin ayrıca, fazla besin maddelerini emerek su kirliliğini azaltmaya, ötrofikasyonu önlemeye ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaya yardımcı olduğunu belirtmişlerdir (Srimongkol vd., 2022). Özellikle makroalgler, heterojen atık substratlarda büyüme esneklikleri ve elde edilen biyokütlenin çoklu kullanım potansiyeli (doğrudan biyosorbent; piroliz/aktivasyon sonrası alg-türevli biyokömür/aktif karbon gibi gelişmiş malzemelere dönüştürülmesi) sayesinde endüstriyel uygulamalar için güçlü bir aday olarak öne çıkmaktadır (Mondal vd., 2024). Hasat, ayırma ve kuru biyokütle hazırlama maliyetlerinin mikroalgere göre daha düşük olması, makroalg temelli arıtım sistemlerini hem ekonomik açıdan hem de işletme kolaylığı bakımından daha avantajlı bir konuma taşımaktadır. Bu operasyonel üstünlük, makroalg bazlı süreçlerin adsorpsiyon gibi diğer ileri arıtım teknolojileriyle birlikte kullanıldığında, kaynak geri kazanımını merkeze alan daha bütüncül ve döngüsel bir arıtım çerçevesi oluşturmasına olanak sağlamaktadır.

### **Alg Temelli Atıksu Arıtma Sistemlerinde Yapay Zeka Uygulamaları**

Çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak geri kazanımı açısından pek çok arıtma sistemine alternatif oluşturan alg-temelli arıtma sistemlerinin performansı, çok sayıda biyolojik, fizikokimyasal ve operasyonel parametrenin karmaşık etkileşimlerine bağlıdır (Yu vd., 2024). Bu parametrelerin optimal kontrolü ve sistem performansının öngörülmesi, geleneksel deneysel yaklaşımlarla oldukça zaman alıcı ve maliyetlidir. Yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleri, son yıllarda enerji, akaryakıt özelliklerinin ve işsizlik oranlarının tahmini gibi pek çok farklı bilim alanında kullanılmış (Balki vd., 2018; Çavuş & Sarıkaya, 2021; Özyılmaz-Misican, Çavuş, 2023) ve aynı zamanda su kalitesi

uygulamalarında da önemli bir araç haline gelmiştir (Sundui vd., 2021). Bu teknikler, karmaşık sistemlerin modellenmesi, performans tahminleri, optimizasyon ve gerçek zamanlı kontrol için güçlü çözümler sunmaktadır. Alg-temelli arıtma sistemlerinde YZ uygulamaları, sistem performansının iyileştirilmesi, operasyonel maliyetlerin azaltılması ve ölçeklendirme süreçlerinin hızlandırılması açısından büyük bir potansiyel barındırmaktadır (Sahu vd., 2023).

Alg-temelli arıtma sistemlerinin başarılı bir şekilde modellenmesi ve optimizasyonu, tüm sistemin performansını etkileyen kritik parametrelerin doğru bir şekilde tanımlanması ve izlenmesi ile yakından ilişkilidir. Bu parametreler, biyolojik parametreler, fizikokimyasal parametreler, operasyonel parametreler ve kirletici giderim parametreleri olarak dört ana kategoride yer alabilir (Hossain vd., 2022; Yu vd., 2024). Biyolojik parametrelerle, alg popülasyonunun üretkenliği ve sistemin kararlılığı doğrudan belirlenebilir. Bu parametreler biyokütlenin konsantrasyonu gibi kantitatif hedefler sağladığı gibi, sınıflandırma/gözetim girdileri, tür kompozisyonu gibi kalitatif hedefleri de belirtmektedir. Alg büyüme hızı ( $\mu$ ), sistemin biyokütle üretim kapasitesinin temel göstergesidir. Yapay sinir ağı (YSA) ile optimize edilen bir çalışmada, optimal biyokütle verimi 948 mg/L olarak raporlanmış ve pH ile alıkonma süresi en kritik girdiler olarak bulunmuştur (Yu vd., 2024). Büyüme hızı, genellikle optik yoğunluk (OD) ölçümleri veya kuru hücre ağırlığı (DCW) üzerinden dolaylı olarak hesaplanmaktadır. Biyokütle konsantrasyonu, sistem performansının en temel çıktılarından biridir ve genellikle g/L veya mg/L birimleri ile ifade edilmektedir. Klorofil-a, fotosentetik aktivitenin ve alg sağlığının önemli bir göstergesidir. Klorofil-a ölçümleri spektrofotometrik yöntemlerle, floresans yöntemi ve HPLC (Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi) pigment profili analizi ile gerçekleştirilebilir. Tür Kompozisyonu ve Biyoçeşitlilik alg-bakteri konsorsiyumlarına dayanan sistem analizleri, tür dağılımının verim ve kirletici giderimi ile korele olduğunu göstermektedir. Tür kompozisyonunun belirlenmesi için morfolojik tanımlama için mikroskopik analizler, moleküler yöntemler, hücre karakterizasyonu için akış sitometrisi ve görüntü işleme ve ML tabanlı sınıflandırma kullanılmaktadır (Sahu vd., 2023). Fizikokimyasal parametreler; Ph, sıcaklık, çözülmüş oksijen konsantrasyonu, ışık şiddeti, ortamdaki azot, karbon ve fosfor gibi besin maddeleri alg büyümesini ve metabolik aktiviteyi doğrudan etkileyen çevresel faktörlerdir. Bu parametreler, modeller içerisinde hem sistem davranışını belirleyen temel girdiler (sürükleyici özellikler) hem de süreç performansını optimize etmek amacıyla ayarlanabilen kontrol değişkenleri olarak işlev görmektedir (Meenatchisundaram vd., 2024). Operasyonel parametreler ise, hidrolik bekleme süresi (HRT) ve katı alıkonma süresi gibi sistemin hidroliğini ve biyokütle konsantrasyonunu belirleyen kritik tasarım parametreleridir. Karıştırma, havalandırma, CO<sub>2</sub> Enjeksiyonu ve reaktör konfigürasyonu da algal sistemi etkileyen diğer değişkenlerdir. Kirletici giderim parametreleri, sistem performansının nihai çıktılarıdır ve çeşitli mevzuat ve standartlara uyum için sürekli izlenmesi gerekmektedir. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), organik kirlilik yükünün temel göstergeleridir ve izlenmesi gereken temel parametreler arasındadır. Bu parametreler giderilmek istenilen hedef kirleticiye göre değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin; azot, fosfor, ağır metaller (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni), mikro-kirleticiler (ilaçlar, pestisitler, endokrin bozucular) ve başta tekstil endüstrisi atıksuları olmak üzere pek çok sektörde kullanım alanı bulan çeşitli boyar maddeler bunlar arasında sayılabilir.



Modern alg-temelli arıtma sistemlerinde, parametrelerin gerçek zamanlı izlemesi ve kontrolü için çeşitli sensör ve analitik teknolojiler kullanılmaktadır (Vemana & Ranjan, 2025). Çeşitli elektrokimyasal problemler, optik sensörler ve iyon seçici elektrotlar yardımıyla online izlemeler yapılabilmektedir. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemleri, IoT (Nesnelerin interneti) platformları, bulut tabanlı veri depolama ve işleme ve gerçek zamanlı veri görselleştirme ve alarm sistemleri veri toplama yöntemleri arasında yer almaktadır.

Yapay sinir ağları (YSA, Artificial Neural Networks), biyolojik sinir sistemlerinin işleyişinden esinlenerek geliştirilmiş ve karmaşık, doğrusal olmayan ilişkileri yüksek doğrulukla modelleyebilen güçlü bir makine öğrenimi yaklaşımıdır. Alg-temelli arıtma süreçlerinde yaygın olarak uygulanan yapay zeka teknikleri arasında YSA'nın öne çıktığı bildirilmektedir. Bu bağlamda, çok katmanlı algılayıcı (MLP-ANN) mimarileri, bir girdi katmanı, bir veya birden fazla gizli katman ve bir çıktı katmanından oluşan yapısal düzenleri sayesinde en sık tercih edilen YSA türlerinden biridir. Literatürde YSA regresyon modelleri kullanılarak biyokütle veriminin tahmin edildiği ve bu modellerin yüksek korelasyon katsayılarıyla başarılı sonuçlar verdiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğunda pH, sıcaklık, HRT ve besin konsantrasyonları gibi süreç parametreleri girdi değişkenleri olarak kullanılmış; çıktı değişkeni ise biyokütle konsantrasyonu olarak modellenmiştir (Yu vd., 2024).

Sınırlı deneysel veri koşullarında bile yüksek doğruluk sağlayabilen modellerin geliştirildiği çalışmalar da mevcuttur. Örneğin Meenatchisundaram vd. (2024), biyokütle verimini optimize etmeye yönelik geliştirilmiş bir ML modeli tasarlamış ve yedi farklı ML algoritmasını karşılaştırmıştır. YSA modeli, 0,98'lik  $R^2$  değeri ve en düşük hata oranı ile diğer yöntemlerden üstün performans göstermiştir. Bu bulgular, alg-temelli sistemlerde operasyonel parametrelerin optimal değerlerinin belirlenmesinde YSA'nın güçlü ve güvenilir bir araç olduğunu ortaya koymaktadır (Meenatchisundaram vd., 2024).

Derin öğrenme, çok katmanlı sinir ağı mimarilerinden yararlanan ve özellikle büyük veri kümeleri üzerinde yüksek doğruluk sağlayan bir yapay zekâ alt dalıdır. Bu kapsamda Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN), görüntü işleme temelli uygulamalarda öne çıkmakta; mikroalg tür tanıma, morfolojik sınıflandırma ve örnekleme otomasyonunda yüksek doğruluk oranları sunmaktadır. Bu modeller, mikroskopik görüntülerden otomatik tür tayini yapılması ve biyokütle kalite kontrolünün hızlandırılması gibi pratik avantajlar sağlamaktadır. Zaman bağımlı süreçlerin modellenmesinde ise Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ve özellikle uzun kısa süreli bellek (LSTM) mimarileri yaygın kullanılmaktadır. LSTM modelleri, mevsimsel değişkenlik ve uzun dönemli bağımlılıkların temsil edilmesindeki üstünlükleri

nedeniyle mikroalg büyümesi gibi zaman serisi temelli biyolojik süreçlerde sıkça uygulanmaktadır. Bazı karşılaştırmalarda rastgele vektör fonksiyon bağlantı (RVFL) ağı daha düşük hata değerleri ile öne çıksa da LSTM modellerinin zaman serisi tahminlerindeki istikrarlı performansı dikkat çekmektedir. Mohit ve Remya (2024) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, organik madde ve besin maddesi başlangıç konsantrasyonlarının gri sudan toplam organik karbon (TOK), TC,  $\text{NH}_4^+$ , TN ve  $\text{PO}_4^{3-}$  giderimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tepki Yüzey Metodolojisi (RSM) AdaBoost (Uyarlanabilir Güçlendirme) ve XGBoost (Aşırı Gradyan Artırma Algoritması) birleştirilerek, TOC,  $\text{NH}_4^+$  ve  $\text{PO}_4^{3-}$  arasındaki etkileşimler ile arıtma verimliliğine katkıları değerlendirilmiştir. Araştırmada XGBoost'un tüm modeller içinde en yüksek  $R^2$  ve en düşük MAE ile MSE değerlerine ulaştığı bildirilmiş; RSM'nin AdaBoost ve XGBoost ile entegrasyonunun arıtma performansını tahmin etmede güçlü bir doğrulama aracı olduğu ortaya konmuştur (Mohit & Remya, 2024). Gradient Boosting temelli algoritmalar, zayıf öğrencileri ardışık biçimde bir araya getirerek güçlü tahmin modelleri oluşturur. Bu algoritmalar arasında XGBoost, hız, ölçeklenebilirlik ve performans açısından sağladığı yüksek korelasyonlu optimizasyonlar nedeniyle öne çıkan bir makine öğrenimi tekniğidir.

Yapılan bir çalışmada araştırmacılar, atıksu koşullarında bulunanlara benzer çevresel koşullar altında mikroalg biyokütlesinin büyüme eğrisini tahmin etmek için zaman serisi tabanlı bir tahmin modeli geliştirmişlerdir. Bu kapsamda mikroalg büyümesiyle ilgili topladıkları verileri bir modeli eğitmek için kullandılar. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM), Aşırı Gradyan Artırma (XGBoost), Oto-Regresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA), Rastgele Vektör Fonksiyonel Bağlantısı (RVFL), Fizik Bilgilendirilmiş Sinir Ağları (PINN) ve Prophet gibi model performans ölçütlerini karşılaştırarak en iyi modeli belirlediler. Araştırmacılar önerilen RVFL modelinin mikroalg büyümesini etkili bir şekilde tahmin edebileceğini, maliyetli ve yoğun emek içeren laboratuvar denemelerine olan ihtiyacı azaltabileceğini için mikroalg bazlı atık su arıtımını ilerletebileceğini belirttiler (Meenatchi Sundaram vd., 2025).

Singh vd. (2023) yaptıkları çalışmada atıksularda mikroalg biyokütle üretiminin karar ağacı tabanlı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar makine öğrenimi algoritmalarının, deneysel çalışmalar olmadan mikroalg bazlı atık su arıtma veri setini analiz ederek yetiştirme parametrelerini kolayca optimize edebileceğini öne sürerek, bir ML olan karar ağacı algoritmasını, mikroalg bazlı veri setlerini analiz etmek ve yüksek büyüme oranına ve mikroalg biyokütlesi üretimine yol açan farklı optimize edilmiş tanımlayıcı değişken kombinasyonlarını tahmin etmek için kullanmışlardır. Analizden elde edilen sonuçların, herhangi bir laboratuvar deneyi gerektirmeden pilot ve endüstriyel ölçeklerde kolayca uygulanabileceğini belirtmişlerdir (Singh vd., 2023).

Etkili atık su arıtımı ve biyokütle üretimi arayışında, mikroalgler ve bakteriler arasındaki simbiyotik ilişki de araştırmalara konu olmuştur. Bu kapsamda da yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenimi (YÖ), dönüştürücü katalizörler olarak öne çıkmaktadır. Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi, atık su arıtımı ve mikroalg-bakteri simbiyozundaki karmaşık zorlukları ele alarak yenilikçi teknolojik çözümler geliştirmektedir (Sahu vd., 2023).

Al-Huqail vd. (2025) yaptıkları çalışmada, özellikle *Chlorella vulgaris* ve *Scenedesmus obliquus*'tan elde edilen mikroalg biyokütlesinin, su arıtma uygulamaları için yüksek performanslı karbon malzemelerine dönüşümünü optimize etmek için gelişmiş makine öğrenmesi algoritmalarını kullanmışlardır. Mikroalg kültürlerinin yetiştirilmesi, Pekiştirmeli öğrenme yani (Reinforcement Learning, RL) kullanılarak veri toplanması ve analizi, yetiştirme koşullarının optimize edilmesi ve üretilen aktif

karbon malzemelerinin performans değerlendirmesini kapsayan bir dizi çalışma gerçekleştirmişler ve RL ile biyolojik süreçleri başarılı bir şekilde entegre ederek optimizasyonlarda yüksek korelasyon sağlandığını belirtmişlerdir (Al-Huqail vd., 2025).

Yapılan başka bir çalışmada ağır metal giderimi için uygun maliyetli biyoadsorbanlar olarak bir deniz alg türü olan *Undaria pinnatifida* kullanılmıştır. Araştırmacılar bu çalışmada, *Undaria pinnatifida* tarafından  $Cu^{+2}$  adsorpsiyon kapasitesini tahmin etmek için makine öğrenimi (ML) tekniklerini geleneksel modellerle entegre ederek ağır metal giderimi için daha verimli stratejiler sağlamayı hedeflemiştir. Çalışma kapsamında alglerin ağır metal adsorpsiyon kabiliyeti üzerindeki çevresel etkileri değerlendirmek için XGBoost, RF, AdaBoost ve CatBoost dahil olmak üzere çeşitli makine öğrenimi modelleri uygulanmıştır. Uygulanan modeller, karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri ve çok boyutlu verileri işlemede oldukça etkili olduklarından, özellikle adsorpsiyon çalışmaları için uygun modellerdir. Regresyonaak makine öğrenimi modelleri, sıcaklık, başlangıç konsantrasyonu ve temas süresi gibi temel faktörleri regresyona tabi tutarak adsorpsiyon davranışını yüksek doğrulukla tahmin etmede son derece uyumlu bulunmuştur(H. Chen vd., 2025).

Sahu vd., (2024) yaygın bir boya kirleticisi olan Remazol Red 5B'nin etkili bir şekilde renk gideriminde alg ve alg-bakteri simbiyozunun (ABS) etkinliğini araştırmışlardır. Bu kapsamda araştırmacılar tarafından çeşitli makine öğrenimi modelleri bir ortak kültür sistemi içindeki boya gideriminin verimliliğini tahmin etmek için kullanılmıştır. Boya giderim verimliliğini tahmin etmek için Karar Ağaçları, Rastgele Orman, Destek Vektör Regresyonu ve Yapay Sinir Ağları değerlendirilmiştir. Rastgele Orman modeli, 0,98'lik bir  $R^2$  değeri sergileyerek en doğru model olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte Destek Vektör Regresyonu ve Yapay Sinir Ağlarının da güçlü tahmin yetenekleri gösterdiklerini belirtmişler ve atıksu arıtma proseslerinde tahmin doğruluğunu artırmak için gelişmiş hesaplama yöntemlerinin kullanılmasının önemini vurgulamışlardır (Sahu vd., 2024).

Günümüzde Yapay Sinir Ağları (YSA), laboratuvar koşullarında elde edilen deneysel veri setlerinden yararlanarak özellikle boya ve ağır metal gibi kirleticilerin giderim verimlerinin yüksek doğrulukla tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir modelleme yaklaşımıdır. Nitekim tekstil endüstrisi atıksularında Cr (VI) giderimini inceleyen bir çalışmada, etkin bir adsorban olarak alg kökenli biyokömür kullanılmış ve malzemenin maksimum adsorpsiyon kapasitesi deneysel olarak belirlenmiştir. Bu deneysel veriler doğrultusunda, adsorpsiyon sürecinin simülasyonu ve optimizasyonu amacıyla bir makine öğrenmesi yöntemi olan MLP-2-7-1 yapısındaki yapay sinir ağı modeli uygulanmış ve optimum giderim etkinliğinin tahmininde başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Khan vd., 2023).

Yapılan çalışmalardan da görüldüğü gibi makine öğrenimi (ML) algoritmaları, karmaşık sistemlerin otomasyonu ve karar destek mekanizmalarının güçlendirilmesinde sağladığı dayanıklılık ve öngörü kapasitesi nedeniyle uzun süredir mühendislik uygulamalarının merkezinde yer almaktadır. Son yıllarda bu algoritmalar, özellikle atıksu arıtma tesislerinde (AAT) operasyonel güvenliğin sağlanması, süreç istikrarının sürdürülmesi ve gerçek zamanlı veri analitiğinin geliştirilmesi amacıyla da yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır (Sundui vd., 2021). Kanalizasyon atıksuları, pH, organik yük ve çevresel değişkenler açısından yüksek zamansal dalgalanma gösterebildiği için, sensör kayması veya boru hattı sızıntısı gibi ekipman arızalarının sistem performansını hızla olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir (Yuan vd., 2019). Bu nedenle gerçek zamanlı izleme, yalnızca arıtım

performansının korunması için değil, aynı zamanda besin geri kazanımı ve alg tabanlı biyokütle üretimi hedeflenen çıktılara ulaşılması gibi ileri biyoteknolojik uygulamalar için de kritik hale gelmiştir. Bununla birlikte, alg biyoreaktörlerinde kullanılan ticari sensörlerin sınırlı çeşitliliği ve yüksek maliyeti, özellikle küçük ve orta ölçekli sistemlerde izleme olanaklarını kısıtlamaktadır. Atıksu gibi fizikokimyasal özellikleri sürekli değişen akışlarla doğrudan temas eden sensörler, zamanla kararsız okumalar üretebilmekte veya operasyonel arızalara eğilim gösterebilmektedir. Bu durum, alg yetiştirme süreçlerini optimize etmek amacıyla geliştirilen kontrol algoritmalarının doğruluğunu doğrudan etkiler. Bu nedenle, mikrodenetleyicilerle uyumlu düşük maliyetli sensörlerin yapay zekâ tabanlı algoritmalarla birlikte kullanılması, süreç otomasyonunu hem daha erişilebilir hem de daha güvenilir hâle getirebilecek bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Alg biyoreaktörlerinin otomasyonu reaktör tipine ve proses hedefine göre değişse de ML algoritmalarının çevrimiçi sensörlerle entegre edilerek süreç parametrelerinin akıllı şekilde yönetilmesini sağlayan hesaplamalı kontrol prensipleri, daha yüksek biyokütle verimi ve düşük işletme maliyeti için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu doğrultuda araştırmacılar, doğrusal olmayan ve dinamik sistemlere uyum sağlayabilen model tahminli kontrol, sinirsel-bulanık kontrol ve hibrit öğrenme yapıları gibi gelişmiş yapay zekâ kontrol tekniklerinin alg tabanlı atıksu arıtım süreçlerine uygulanmasını önermektedir. Nitekim, gerçek zamanlı veri kalitesinin artırılmasında çevrimiçi sensörlerin kritik önemi çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Örneğin Han vd., (2018), çıkış suyu kalitesi ve enerji tüketimi açısından AAT performansını optimize etmek amacıyla bulanık sinir ağı (FNN) yaklaşımını kullanmış; sensör verilerini FNN ve Temel Bileşenler Analizi (PCA) ile birleştiren ve SCADA altyapısına veri aktarabilen bütünlük bir hibrit yazılım geliştirmişlerdir. (Drewnowski, (2019), benzer şekilde veri odaklı kontrol yaklaşımlarının sensör güvenilirliğini artırmadaki rolünü vurgulamıştır. Çözünmüş oksijen ve NH<sub>4</sub> çevrimiçi sensörlerinin sürekli veri topladığı ve kontrol sisteminin denetleyici kontrol ve veri toplama sistemi (SCADA) ile bütünlük çalıştığı gelişmiş bir kontrol mimarisinin tam ölçekli bir AAT'de başarılı bir şekilde uygulanabildiğini bildirmiştir. Bu tür çalışmalar, alg tabanlı arıtma sistemlerinde yapay zekânın hem süreç izleme kapasitesini geliştirdiğini hem de reaktör verimliliğini artıran proaktif bir kontrol aracı olarak önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

### **Sonuçlar ve Geleceğe Yönelik Beklentiler**

Hem evsel hem de endüstriyel kaynaklı atıksular, çok sayıda organik ve inorganik bileşik içermeleri nedeniyle karmaşık arıtım süreçlerini gerektirmektedir. Geleneksel arıtma teknolojileri, yüksek enerji gereksinimleri, kimyasal tüketimi ve işletme maliyetleri nedeniyle pek çok durumda sürdürülebilirlik açısından yetersiz kalmakta; üstelik oluşan yeni nesil kirleticilerin (mikrokirleticiler, ağır metaller, boyar maddeler vb.) tamamen giderilmesinde sınırlı etkililik göstermektedir. Bu bağlamda alg-temelli arıtma sistemleri, yüksek biyokütle verimi, düşük karbon ayak izi ve besin geri kazanımı gibi çevresel avantajları nedeniyle umut vadeden yenilikçi bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Alg-temelli sistemlerin performansını artırmada yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (ML) tekniklerinin entegrasyonu geleceğin en önemli araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Bu teknikler; büyüme dinamiklerinin modellenmesi, optimal işletme koşullarının tahmini, enerji tüketiminin azaltılması ve kirletici giderim verimlerinin artırılması gibi çok boyutlu çıktılara katkı sağlayabilmektedir. Ancak bu teknolojilerin yaygın uygulamaya geçebilmesi için sensör teknolojilerindeki eksiklikler, veri kalitesi sorunları, ekonomik fizibilite ve düzenleyici çerçeveler gibi bazı teknik ve yönetsel

engellerin aşılması gerekmektedir. Yerel iklim koşullarının, ışık rejimlerinin, atıksu karakterizasyonunun ve mevsimsel değişkenliğin doğru şekilde dikkate alınması; uzun süreli pilot çalışmalar yürütülmesi ve veri paylaşımını destekleyen açık inovasyon politikalarının benimsenmesi bu süreçte kritik öneme sahip olacaktır.

Türkiye, sahip olduğu uygun iklim kuşağı, geniş kıyı şeritleri, biyoçeşitlilik potansiyeli ve artan arıtma tesisi ihtiyacı ile alg-temelli süreçlerin uygulanması açısından önemli bir avantaja sahiptir. Bu potansiyelin etkin bir şekilde değerlendirilebilmesi ise YZ destekli izleme, optimizasyon ve kontrol sistemlerinin yaygınlaştırılmasına bağlıdır. Alg biyoreaktörlerinin karmaşık dinamikleri göz önüne alındığında, gerçek zamanlı ayarlamalar yapabilen ML tabanlı kontrol stratejileri hem işlem kararlılığını hem de biyokütle üretim verimini artıran güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır. Daha da önemlisi, YZ'nin öngörülmesi, sistem performansının gelecekteki değişimlerini tahmin ederek olası proses aksaklıklarının önceden tespit edilmesine ve proaktif kontrol stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yetenek, sürdürülebilirlik odaklı su arıtma uygulamalarında YZ'yi vazgeçilmez bir bileşen haline getirmektedir. Atıksu arıtımında, simbiyotik mikroorganizma yetiştiriciliğinde ve mikro ve makro alg biyoteknolojisinde YZ-ML entegrasyonu giderek daha fazla benimsenmekte; enerji verimliliği, proses kararlılığı ve operasyonel maliyetlerin azaltılması açısından yeni açılımlar sunmaktadır. Öyle ki, literatür, YZ'nin su kalitesi kontrolünde sürdürülebilir, uyarlanabilir ve güvenilir çözümler geliştirme potansiyelini açıkça göstermektedir. Gelecek araştırmaların farklı kirletici grupları, değişen atıksu içerikleri ve çeşitli adsorpsiyon ortamları üzerinde genelleştirilebilir sonuçlar verebilecek daha gelişmiş, veri zenginleştirme teknikleriyle desteklenmiş YZ modellerine odaklanması önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, sensör teknolojilerinin geliştirilmesi, hibrit modelleme yaklaşımlarının yaygınlaştırılması ve YZ destekli optimizasyon araçlarının standartlaştırılması, alg-temelli arıtma sistemlerinin sürdürülebilir bir çözüm olarak küresel ölçekte benimsenmesine katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA

- Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S.-H., Elsamahy, T., Li, S., El-Sheekh, M. M., Schagerl, M., Kornaros, M., & Sun, J. (2023). Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science and Ecotechnology*, 13, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100205>
- Al-Huqail, A., Mohammed, K. J., Suhatri, M., Almujiabah, H., Toghrol, S., Alnahdi, S. S., & Ponnore, J. J. (2025). Optimizing microalgal biomass conversion into carbon materials and their application in water treatment: a machine learning approach. *Carbon Letters*, 35(2), 861-880. <https://doi.org/10.1007/s42823-024-00837-8>
- Balki, M.K., Çavuş, V., Duran, İ.U., Tuna, R., Sayın, C. (2018) "Experimental Study and Prediction of Performance and Emission in an SI Engine Using Alternative Fuel with Artificial Neural Network", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7 (1) pp. 58-64
- Chen, H., Zhang, R., Qu, X., Shan, T., Wang, Y., Zhou, R., & Zhao, S. (2025). Optimizing Cu<sup>2+</sup> + adsorption prediction in *Undaria pinnatifida* using machine learning and isotherm models. *Journal of Hazardous Materials*, 492, 138202. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138202>
- Chen, J., Dai, L., Mataya, D., Cobb, K., Chen, P., & Ruan, R. (2022). Enhanced sustainable integration of CO<sub>2</sub> utilization and wastewater treatment using microalgae in circular economy concept. *Bioresour. Technol.*, 366, 128188. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128188>

- Çavuş, V., Sarıkaya, M. (2021) "Yapay Sinir Ağları ve Güneş Enerji Sistemlerinde Uygulamaları", Kitap: Yapay Zeka Uygulamalarında Güncel Konular ve Araştırmalar, Konya/Türkiye : Çizgi Kitapevi, Bölüm Sayfaları: 7 / 22, ISBN: 978-605-196-623-6
- Özyılmaz-Misican, D., Çavuş, V. (2023) "İşsizlik Oranlarının Yapay Sinir Ağları ile Öngörüsü", Kitap: Disiplinlerarası Yapay Zekâ Araştırmaları, Ankara/Türkiye : Nobel Bilimsel Eserler, Bölüm Sayfaları: 91 / 110, ISBN: 978-625-398-981-1
- Drewnowski, J. (2019). Advanced Supervisory Control System Implemented at Full-Scale WWTP—A Case Study of Optimization and Energy Balance Improvement. *Water*, 11(6), 1218. <https://doi.org/10.3390/w11061218>
- Han, H., Zhu, S., Qiao, J., & Guo, M. (2018). Data-driven intelligent monitoring system for key variables in wastewater treatment process. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(10), 2093-2101. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.03.027>
- Han, M., Zhang, C., & Ho, S. H. (2023). Immobilized microalgal system: An achievable idea for upgrading current microalgal wastewater treatment. *Environmental Science and Ecotechnology*, 14, 100227. <https://doi.org/10.1016/J.ESE.2022.100227>
- Hossain, S. M. Z., Sultana, N., Jassim, M. S., Coskuner, G., Hazin, L. M., Razzak, S. A., & Hossain, M. M. (2022). Soft-computing modeling and multiresponse optimization for nutrient removal process from municipal wastewater using microalgae. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102490. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102490>
- Khan, A. A., Naqvi, S. R., Ali, I., Arshad, M., AlMohamadi, H., & Sikandar, U. (2023). Algal-derived biochar as an efficient adsorbent for removal of Cr (VI) in textile industry wastewater: Non-linear isotherm, kinetics and ANN studies. *Chemosphere*, 316, 137826. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137826>
- Khanzada, A. K., Rizwan, M., Al-Hazmi, H. E., Majtacz, J., Kurniawan, T. A., & Mąkinia, J. (2023). Removal of Arsenic from Wastewater Using Hydrochar Prepared from Red Macroalgae: Investigating Its Adsorption Efficiency and Mechanism. *Water*, 15(21), 3866. <https://doi.org/10.3390/w15213866>
- Mafat, I. H., Palla, S., & Surya, D. V. (2024). Machine Learning and Artificial Intelligence for Algal Cultivation, Harvesting Techniques, Wastewater Treatment, Nutrient Recovery, and Biofuel Production and Optimization. İçinde *Value Added Products From Bioalgae Based Biorefineries: Opportunities and Challenges* (ss. 463-487). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-1662-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-97-1662-3_18)
- Meenatchi Sundaram, K., Kumar, D., Lee, J., Barathi, S., & Rajendran, K. (2025). Time series forecasting of microalgae cultivation for a sustainable wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 196, 106845. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106845>
- Meenatchisundaram, K., Gowd, S. C., Lee, J., Barathi, S., & Rajendran, K. (2024). Data-driven model development for prediction and optimization of biomass yield of microalgae-based wastewater treatment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 63, 103670. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103670>
- Mondal, A. K., Hinkley, C., Krishnan, L., Ravi, N., Akter, F., Ralph, P., & Kuzhiumparambil, U. (2024). Macroalgae-based biochar: preparation and characterization of physicochemical properties for potential applications. *RSC Sustainability*, 2(6), 1828-1836. <https://doi.org/10.1039/D4SU00008K>
- Muñoz, I., Gómez-Ramos, M. J., Agüera, A., Fernández-Alba, A. R., García-Reyes, J. F., & Molina-Díaz, A. (2009). Chemical evaluation of contaminants in wastewater effluents and the environmental risk of reusing effluents in agriculture. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28(6), 676-694. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2009.03.007>
- Piroonporn Srimongkol, Pajareeya Songserm, Papassara Sangtanoo, Wannapawn Watsuntorn, & Aphichart Karnchanatat. (2022). *Microalgae-based wastewater treatment for developing economic and environmental sustainability: Current status and future prospects*.
- Qulatein, H. A., & Sari Yilmaz, M. (2023). Preparation of low-cost and non-conventional macroalgae-based biosorbent for fast and effectively selective dye adsorption.


- Materials Chemistry and Physics*, 303, 127741.  
<https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2023.127741>
- Sahu, S., Kaur, A., Singh, G., & Arya, S. K. (2024). Integrating biosorption and machine learning for efficient remazol red removal by algae-bacteria co-culture and comparative analysis of predicted models. *Chemosphere*, 355, 141791.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141791>
- Sahu, S., Kaur, A., Singh, G., & Kumar Arya, S. (2023). Harnessing the potential of microalgae-bacteria interaction for eco-friendly wastewater treatment: A review on new strategies involving machine learning and artificial intelligence. *Journal of Environmental Management*, 346, 119004. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119004>
- Singh, V., Verma, M., Chivate, M. S., & Mishra, V. (2023). Machine learning-based optimisation of microalgae biomass production by using wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111387.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111387>
- Sundui, B., Ramirez Calderon, O. A., Abdeldayem, O. M., Lázaro-Gil, J., Rene, E. R., & Sambuu, U. (2021). Applications of machine learning algorithms for biological wastewater treatment: Updates and perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(1), 127-143. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01993-x>
- Suresh, R., Rajendran, S., Chen, W.-H., Soto-Moscoso, M., Sundaram, T., Jalil, A. A., & Rajamani Sekar, S. K. (2024). A review on algae-mediated adsorption and catalytic processes for organic water pollution remediation. *Frontiers in Materials*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1432704>
- Thoré, E. S., M. K., B. M. G., & B. T. (2023). Microalgae. C. B. 33(3), R.-R. (t.y.). *microalgae*. UN-Water, 2021. (t.y.). [unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-for-all/](https://unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-for-all/)
- Vemana, A., & Ranjan, I. (2025). *S.A.B.E.R - Sustainable AI-automated Bioreactor for Environment Remediation*. <https://doi.org/10.31224/4876>
- Wollmann, F., Dietze, S., Ackermann, J. U., Bley, T., Walther, T., Steingroewer, J., & Krujatz, F. (2019). Microalgae wastewater treatment: Biological and technological approaches. *Engineering in Life Sciences*, 19(12), 860-871.  
<https://doi.org/10.1002/ELSC.201900071>
- Yu, K. L., Ong, H. C., & Zaman, H. B. (2024). Integrated energy informatics technology on microalgae-based wastewater treatment to bioenergy production: A review. *Journal of Environmental Management*, 368, 122085.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122085>
- Yuan, Z., Olsson, G., Cardell-Oliver, R., van Schagen, K., Marchi, A., Deletic, A., Urich, C., Rauch, W., Liu, Y., & Jiang, G. (2019). Sweating the assets – The role of instrumentation, control and automation in urban water systems. *Water Research*, 155, 381-402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.034>
- Zrimec, M. B., Malta, E., Dunbar, M. B., Cerar, A., Reinhardt, R., & Mihelič, R. (2022). Wastewater Cultivated Macroalgae as a Bio-resource in Agriculture. İçinde *Sustainable Global Resources Of Seaweeds Volume 1* (ss. 435-449). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91955-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91955-9_23)

## BÖLÜM 5

### İŞYERİ GÜVENLİĞİNDE YAPAY ZEKA UYGULAMALARI: MAKİNE ÖĞRENİMİ, DERİN ÖĞRENME VE BİLGİSAYAR GÖRME TRENDLERİNE BİBLİYOMETRİK BİR BAKIŞ


*Süleyman ŞİMŞEK*

*Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Aydın Üniversitesi, [suleymansimsek@aydin.edu.tr](mailto:suleymansimsek@aydin.edu.tr)*

 0000-0002-0593-8036

*Habibe ER*

*Doktora Öğrencisi, İstanbul Aydın Üniversitesi, [her@stu.aydin.edu.tr](mailto:her@stu.aydin.edu.tr)*

 0009-0006-9565-6476

Endüstri 4.0 çağında, teknolojik dönüşümün sağladığı tüm ilerlemelere rağmen iş kazaları ve işle ilişkili hastalıklar, hem küresel hem de ulusal düzeyde insan sağlığı ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından ciddi bir sorun olmaya devam etmektedir (Machin ve Liu, 2024). Uluslararası Çalışma Örgütü'ne (ILO) göre, her yıl yaklaşık 2,9 milyon insan iş kazası veya işle ilişkili hastalıklar nedeniyle yaşamını yitirmektedir (ILO, 2023; Takala vd., 2024). Her yıl yaklaşık altmış bin ölümcül kaza meydana gelirken inşaat sektöründe tüm işyeri ölümlerinin % 35'ini oluşturmaktadır (Wadsworth ve Walters, 2019). Her yıl yaklaşık 395 milyon kişi ise, ciddi iş kazalarına maruz kalmaktadır (Kjellén, 2023; Yu et al., 2019).

Katı kurallarla yürütülen iş güvenliği hizmetlerine karşın sadece Avrupa Birliği ülkelerinde bile 2021 yılında 3,1 milyon iş kazası raporlanmış olup bu kazaların 3.347'si ölümlerle sonuçlanmıştır (Eurostat, 2024). Türkiye özelinde bakıldığında, Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) verilerine göre, 2022 yılında 588.823 iş kazası meydana gelmiş, bu kazaların sonucunda 1.517 çalışan hayatını kaybetmiştir (SGK, 2023). Bu veriler, ışığında geleneksel İSG yaklaşımlarının sınırlılıkları daha görünür hâle gelmiştir. Alınan önlemlerin sadece mevzuata uyumla değil, aynı zamanda yaşam hakkının korunması açısından da vazgeçilmez olduğu açıkça ortaya konmaktadır.

Operasyonel İSG risk yönetimi ve değerlendirmesi uygulamalarında nitel, nicel ve hibrit yöntemlerin birlikte kullanıldığı bir çerçeve içinde yürütülmektedir (Aven, 2016; Barghi 2020; Zhasmukhambetova vd., 2025). Nitel yöntemler uzman yargısına dayanırken, nicel yöntemler geçmiş kaza verilerinden matematiksel çıkarımlardan yararlanarak kontrol sağlar. Hibrit yaklaşımlar ise petrol ve rafineri, inşaat ve kimyasal prosesler gibi karmaşık ve dinamik alanlara uyum sağlayacak şekilde kullanılır (Zhasmukhambetova vd., 2025). Çoğunlukla kontrol listeleri, HAZOP, FTA gibi tekniklerin yanı sıra bulanık ABC sınıflandırması ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi karma teknikler de öne çıkar. Geleneksel 2B çizimlerin statik doğası sahadaki dinamik tehlikeleri yakalamakta yetersiz kalırken, Bina Bilgi Modellemesi (BIM) güvenlik verilerinin nesne-temelli ve proaktif biçimde modellenmesine olanak

sağlamaktadır (Wang, 2012; Jin ve Zou, 2019). BIM ekosistemi; bilgi grafikleri, bilgi çıkarımı ve kural-tabanlı denetimler ile entegre edildiğinde, tehlike tanıma ve risk sınıflandırmasını gerçek zamana yakın bir doğrulukla tespit edebilmektedir (Zhang vd., 2019; Tan vd., 2024;). Büyük, dinamik ve belirsizliğin yüksek olduğu projelerde tercih edilen hibrit yaklaşımlar, uzman yargısını nicel modellemelerle birleştirerek karar kalitesini artırma potansiyeli sunmaktadır (Barghi, 2020; Zhasmukhambetova vd., 2025). Bibliyometrik kanıtlar da inşaat güvenliği risk değerlendirmesi çalışmalarında yöntem ve tema çeşitliliğinin son on yılda hızla arttığını göstermektedir (Junjia vd., 2023).

Son zamanlarda yürütülen çalışmalarda, proje güvenliği yönetiminin sadece iyileştirilmesine odaklanmakla kalmayıp aynı zamanda sürdürülebilirlik ve saha ekiplerinin profesyonel değerlendirmelerine dayalı risk sınıflandırmalarının da öne çıktığı görülmektedir. Genellikle sürdürülebilirlik yönetim ve sosyal sorumluluğun önemli bir yönü olarak ortaya çıkar (Sanni-Anibire vd., 2020; Muñoz-La Rivera vd., 2021). Tabi ki, bu dönüşümün merkezinde Yapay Zekâ (YZ)'nın teknolojik olarak ilerlemesi yer almaktadır. Makine Öğrenimi (ML), Derin Öğrenme (DL) ve Bilgisayar Görmesi (CV) tabanlı yöntemler özellikle tehlike tanıma, davranış analizi, kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanım takibi, ergonomik izlem ve kapsamlı risk analitiği gibi kullanım alanlarında ölçeklenebilir çözümler sunmaya başlamıştır (Fang vd., 2018; Lee vd., 2023). Yapılan son çalışmalarda kask-maske-yüksek görünüş sağlayan yelek gibi KKD öğelerinin tespiti için YOLO ailesi ve türevlerinin yüksek doğruluk (çoğunlukla mAP  $\geq$  %85) sağlayabilmesine karşın yanlış alarm ve veri kalitesi gibi uygulama zorluklarının halen sürdüğü de görülmektedir (Lo vd., 2022; Liu vd., 2024; Vukicevic vd., 2024; Damilos vd., 2024). Bu engelleri aşmak amacıyla, YZ çözümleri; BIM'e entegre edilen giyilebilir sensörler, nesnelere interneti (IoT) ve Virtual Reality/Artificial Reality (VR/AR) tabanlı eğitim sistemleriyle bütünleştirilerek kullanıldığında, hem proaktif izlemeyi güçlendirmekte hem de deneysel öğrenmeyi destekleyerek güvenlik kültürünü kalıcı biçimde iyileştirilmesine imkan tanımaktadır (Piroozfar vd., 2019; Bao vd., 2022; Patel vd., 2022; Leong vd., 2024; Tan vd., 2024). Böylece sahada "anlık durum farkındalığı" yükseltilirken eğitim içeriği kişiselleştirilmekte ve müdahale süreleri kısaltılmaktadır.

Bu bölüm, Scopus ve Web of Science Core Collection veri tabanlarından derlenen literatürü VOSviewer ile analiz ederek; (i) yıllara göre yayın hacmi ve ivme, (ii) ülkeler/kurumlar/yazarlar arası işbirliği ağları, (iii) ML-DL-CV-"occupational safety" anahtar sözcük kümelenmeleri, (iv) en etkili dergiler ve yayınlar ile (v) YZ uygulamalarında öne çıkan temalar ve kavramsal boşlukları ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Birleşmiş Milletler (BM) Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA/SDG) bağlamı açısından da çalışmanın odağı, özellikle SKA 3 (Sağlık ve Kaliteli Yaşam), SKA 8 (İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme) ve SKA 9 (Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı) ile doğrudan ilişkilidir. İSG'de, YZ tabanlı çözümler; iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesi (SKA 3.9), güvenli ve üretken çalışma ortamlarının güçlendirilmesi (SKA 8.8) ve dijital dönüşümle yenilikçi altyapının teşviki (SKA 9) açısından politika ilişkili kanıt üretir (Birleşmiş Milletler [BM], 2015; ILO, 2024). Özetle, bu makale bibliyometrik analiz yoluyla dokuz temel araştırma sorusunu ele almaktadır (Machin ve Liu, 2024).

**AS1:** YZ, temelli işyeri güvenliği araştırmalarında özellikle ML, DL ve CV uygulamaları hangi akademik eğilimler, işbirlikleri ve tematik odaklarda öne çıkmaktadır?

**AS2:** İşyeri güvenliğinde, YZ uygulamaları üzerine yapılan araştırmaların yıllara, ülkelere, kurumlara ve dergilere göre dağılımı nasıldır ve bu yayınlar arasındaki atıf ilişkileri hangi ağ yapısını ortaya koymaktadır?

**AS3:** ML, DL ve CV teknikleri İSG alanında hangi risk değerlendirme, kaza önleme ve işçi sağlığını koruma amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır ve gelecekte hangi yönelimler beklenmektedir?

**AS4:** YZ temelli İSG çalışmalarında kullanılan yöntemsel yaklaşımlar nelerdir ve bunların güçlü/zayıf yönleri nasıl değerlendirilebilir?

**AS5:** YZ uygulamalarının işyeri güvenliği bağlamında karşılaştığı temel sınırlılıklar, veri kısıtları ve etik sorunlar nelerdir?

**AS6:** YZ tabanlı İSG çözümleri, SKA (özellikle SKA 3, SKA 8 ve SKA 9) ile hangi noktalarda kesişmektedir ve bu alanda politika geliştirmeye nasıl katkı sağlamaktadır?

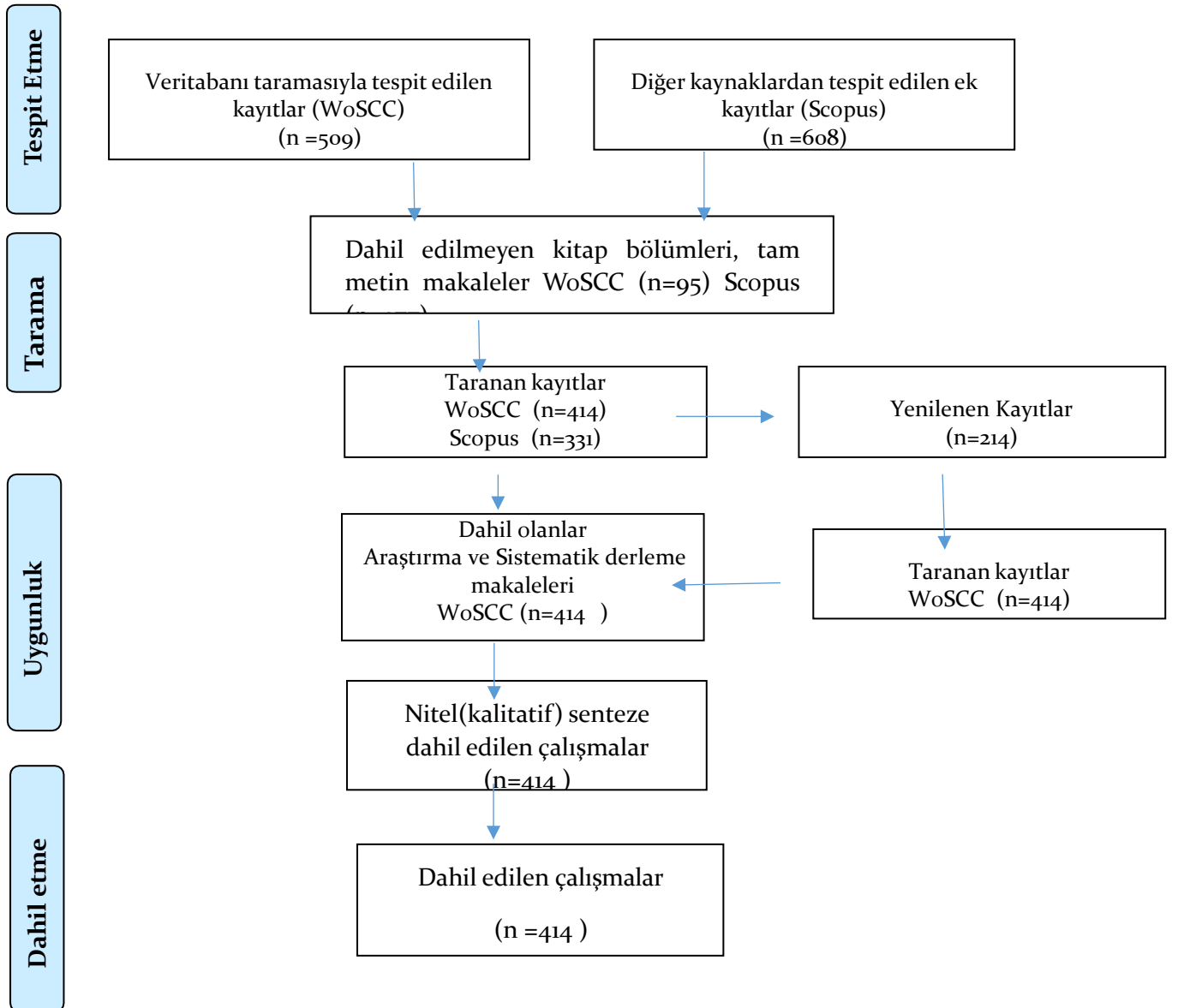
**AS7:** Gelişmiş ülkeler ile gelişmekte olan ülkeler arasında YZ tabanlı iş güvenliği araştırmalarında hangi farklılıklar görülmektedir?

**AS8:** Akademi–sanayi işbirlikleri, fon sağlayıcı kurumların desteği ve uluslararası ağ yapıları, YZ-İSG araştırmalarının gelişimini nasıl şekillendirmektedir?

**AS9:** YZ tabanlı iş güvenliği araştırmalarında gelecek için hangi çok disiplinli araştırma boşlukları bulunmaktadır?

## Seçim Süreci ve Kapsamı

Makale seçim süreci Şekil 1'de, PRISMA (Sistemik İncelemeler ve Meta-Analizler için Tercih Edilen Raporlama Öğeleri) akış şemasına göre gerçekleştirilmiştir. Kayıtlar başlık, özet ve anahtar kelimelere göre taranmış ve dahil etme/hariç tutma kriterlerine göre değerlendirilmiştir.



Şekil 1. PRISMA diyagramı araştırma metodolojisi ve araştırma sonuçları

## YÖNTEM

### Araştırma Modeli

Bu çalışma, 1991 ile 2025 yılları arasında işyeri güvenliğinde YZ uygulamalarından ML, DL ve CV konusunda yayınlanan akademik makaleleri analiz etmek amacıyla bibliyometrik bir analiz olarak tasarlanmıştır.

### Veri Toplama Araçları

Bu çalışma, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında YZ temelli teknolojilerin kullanımını inceleyen akademik yayınları değerlendirmek amacıyla betimleyici bibliyometrik yaklaşım ve görselleştirme temelli bilimsel haritalama yöntemi benimsenmiştir. Veri toplama işlemi, Science Citation Index Expanded (SCIE) içinde yer alan Web of Science Core Collection (WoSCC) ve Scopus veri tabanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aramada Tablo 1’de görüleceği üzere her iki veri tabanında ("occupational safety" OR "workplace safety") AND ("machine learning" OR "artificial intelligence" OR "deep learning" OR "computer vision") gibi terimlerden oluşturulmuş, Boolean operatörleriyle sorgular birleştirilmiştir.

### Verilerin Toplanması

Veri çıkarma işlemi, veri tabanı güncellemelerinden kaynaklanan tutarsızlıkları önlemek için 28 Temmuz 2025 tarihinde tek bir oturumda gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın literatür taraması esnasında YZ uygulamalarının İSG alanındaki ilk görünürlüğü 1991 yılıdır. İlk taramada Scopus (n:608) ve WoSCC (n:509) yayın elde edilmiştir. Çalışmaya yalnızca hakemli dergilerde yayınlanan 1991- 2025 yılları arasında yayımlanmış olan İngilizce ve Türkçe yazılmış araştırma ve sistematik derleme makaleleri dahil edilirken editör makaleleri, özetler, kitap bölümleri ve konferans bildirileri hariç tutulmuştur. Bu eleme sonrası Scopus (n:331) ve WoSCC (n: 414) uygun yayın kalmıştır. Excel ortamında yürütülen eşleşme analizinde, her iki veri tabanında ortak olarak bulunan 214 kayıt tespit edilmiştir. Tablo 1’de veri çıkarımında da gösterildiği üzere, Scopus özelinde bu eşleşen kayıtlar çıkarıldığında geriye kalan yayın sayısının sınırlı olması (n: 117) ve WoSCC'nin daha geniş içerik sunması nedeniyle, analiz yalnızca WoSCC verileri üzerinden yürütülmüştür.

**Tablo 1.** Araştırma Sorgusu

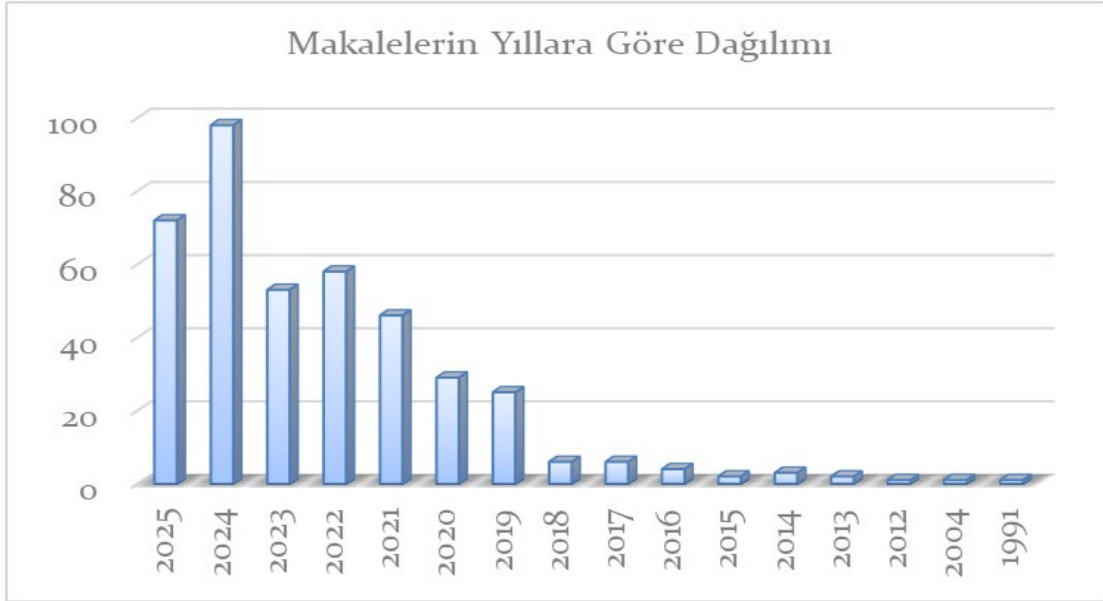
	<b>Araştırma Anahtar Kelimeleri</b>	<b>Sonuç</b>
<b>Scopus</b>	ALL= [("occupational safety" OR "workplace safety") AND ("machine learning" OR "artificial intelligence" OR "deep learning" OR "computer vision")]	331
	Duplikasyon olan makale	214
	Duplikasyonların çıkarılmasından sonra kalan	117
<b>WoSCC</b>	ALL= [("occupational safety" OR "workplace safety") AND ("machine learning" OR "artificial intelligence" OR "deep learning" OR "computer vision")]	414
	PY= (1991–2025) ve Türkçe ve İngilizce olanlar n=414	
<b>VOSviewer</b> <b>Analizine Dahil</b> <b>olan</b>	WoSCC n:414	414

## Verilerin Analizi

Sonuç olarak, Web of Science Core Collection üzerinden elde edilen toplam 414 yayının veri analizi için açık kaynaklı bir yazılım olan VOSviewer (versiyon 1.6.19) kullanılmıştır. Yazılım aracılığıyla anahtar kelime eşgörünüm (co-occurrence), yazar işbirliği ağı (co-authorship), ülke-temelli araştırmaların dağılımı, atıf sayısı bazlı etki, yayın yıllarına göre dağılım (zaman serisi eğilimleri) analizleri gerçekleştirilmiştir.

## BULGULAR

YZ temelli İSG araştırmalarının yıllar içerisindeki artışı incelendiğinde, 2019 yılının kritik bir eşik olduğu görülmektedir. Öyle ki, 1991-2019 yılları arasında yayımlanan toplam makale sayısı, sadece 2019 yılındaki araştırma sayısına eşittir. Bu durum, Şekil 2'de açıkça gösterdiği gibi, YZ uygulamalarının İSG alanında son derece hızlı ve artan bir ilgiyle ele alındığını ortaya koymaktadır. Bu yükseliş, teknolojinin İSG sorunlarına getirdiği potansiyel çözümlerin ne kadar önemli hale geldiğini gözler önüne sermektedir.



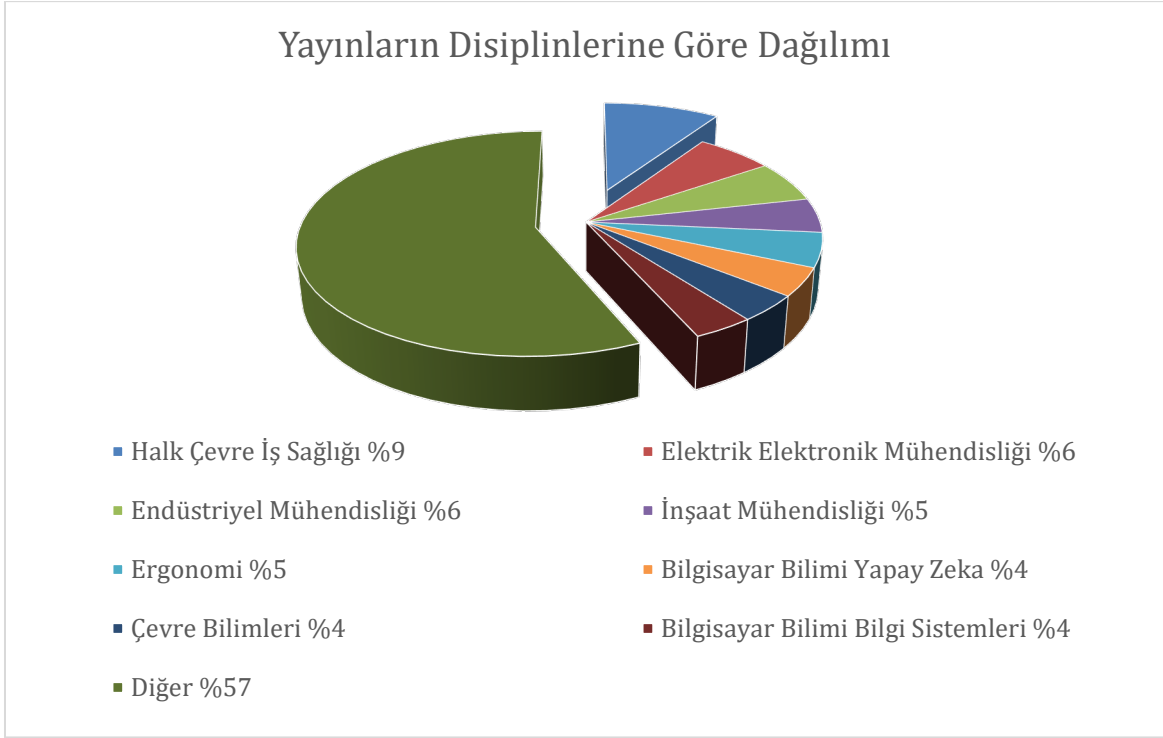
**Şekil 2.** Yıllara Göre Yayın Sayısı Dağılımı (1991–2024)

### Yapay Zeka ve İSG Araştırmalarında Alan Dağılımı

Yapay Zeka (YZ) temelli İSG araştırmalarının alanlara göre dağılımı incelendiğinde, mühendislik en çok katkı sağlayan disiplin olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3'te gösterilen ilk 10 araştırma alanı arasında mühendislik, en yüksek yayın sayısına sahiptir. Toplam 66 farklı araştırma alanı bu konuya katkı sunarken, bazı alanlardaki yayın sayılarının oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Günümüzde giderek artan bir risk faktörü olan ısı stresi konusunda termodinamik alanında sadece bir makale yayımlanmıştır. Bu durum, özellikle belirli ve acil sorunlara yönelik çalışmaların henüz yeterli seviyede olmadığını göstermektedir. Öne çıkan diğer alanlar arasında Materyal Bilimi ve Psikoloji 16 yayımla, Otomasyon Kontrol Sistemleri ise 10 yayımla temsil edilmektedir.

Grafikte "Diğerleri" başlığı altında birleştirilen 56 araştırma alanı, tek başlarına düşük yayın sayısına sahip olsalar da, toplam yayın sayıları bakımından ilk 10 alandaki toplam yayın sayısına neredeyse eşittir. Bu durum, YZ'nin İSG alanında çok çeşitli ve dağınık disiplinlerde incelendiğini, ancak henüz belirli konuların baskın bir şekilde ele

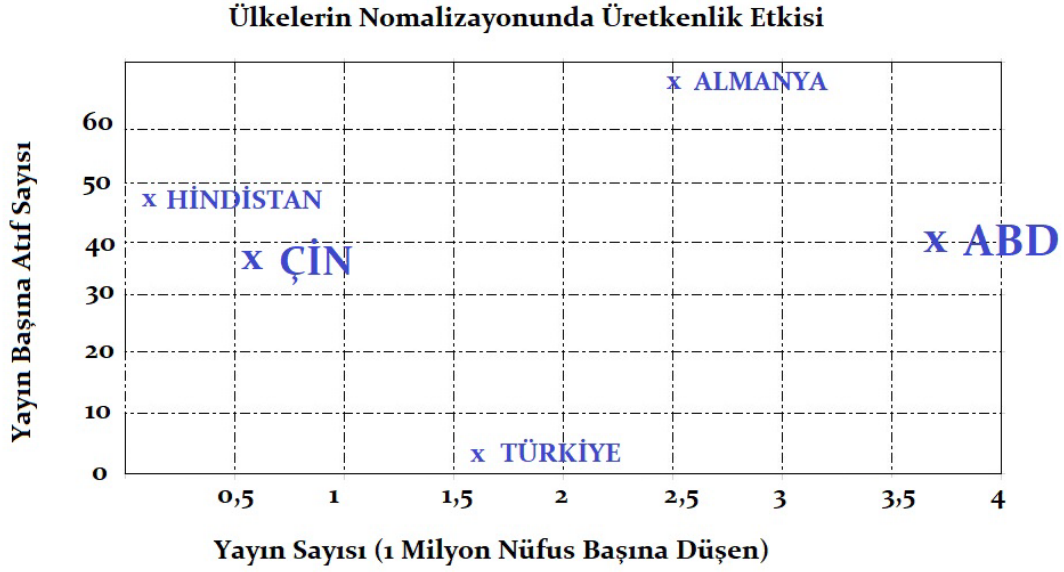
alınmadığını ortaya koymaktadır. Bu çeşitlilik, gelecekte daha odaklanmış ve derinlemesine çalışmalar için önemli bir potansiyel barındırmaktadır.



**Şekil 3.** Araştırma Alanlarına Göre Yayın Dağılımı (İlk 10 Alan)

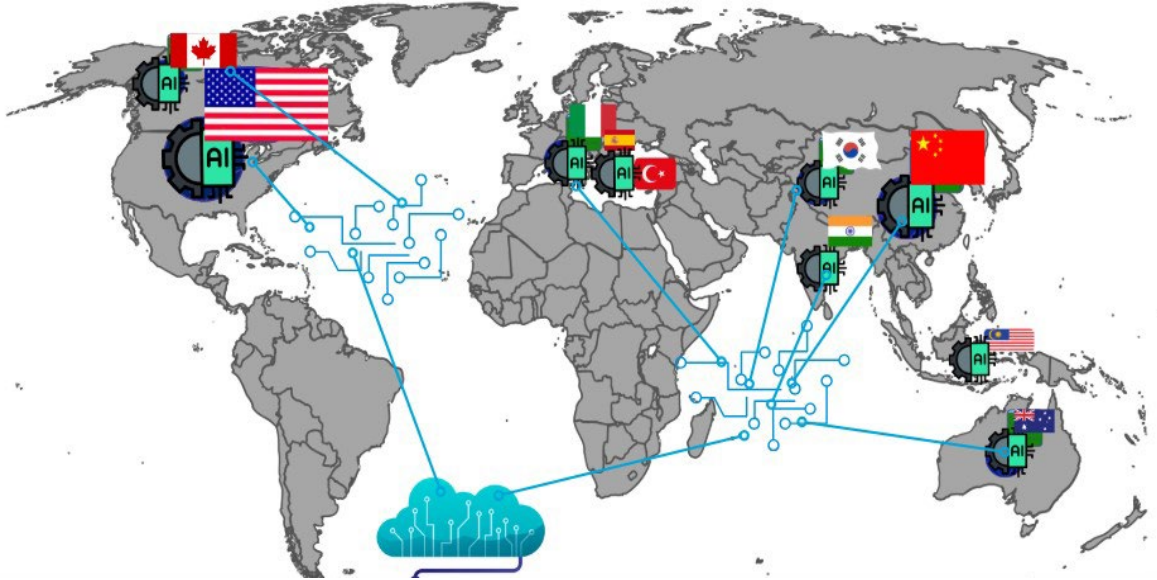
### Ülkelerin Araştırmalara Katkıları

YZ temelli İSG araştırmalarına en fazla katkı sağlayan ülkeler incelendiğinde, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) açık ara lider konumdadır. Ülke karşılaştırmalarında yalnızca mutlak yayın sayısı yerine kişi başı yayın, GDP'ye oranlı yayın ve Ar-Ge harcamasına oranlı yayın hesaplanmıştır. Ayrıca yayın başına atıf medyanları Mann-Whitney testi ile karşılaştırılmış, gelişmiş ülkeler lehine anlamlı fark ( $p < 0.01$ ) bulunmuştur. Bu sonuçlar, Şekil 4'te de görüleceği üzere, gelişmiş ülkelerin daha yüksek görünürlük ve etki düzeyine sahip olduğunu göstermektedir (Kahraman, 2021).



**Şekil 4.** Ülke Normalizasyon Grafiği (Kişi Başına Yayın İle Atıf/ Yayın Oranı Kıyaslaması)

Onu sırasıyla Çin, Kanada, İtalya ve Güney Kore takip etmektedir. Türkiye ise 63 ülke arasında yayımlanan 14 makale ile 10. sırada yer alarak bu alandaki etkinliğini göstermektedir. Şekil 5, ülkelerin yayın sayılarındaki dağılımı görselleştirmektedir.



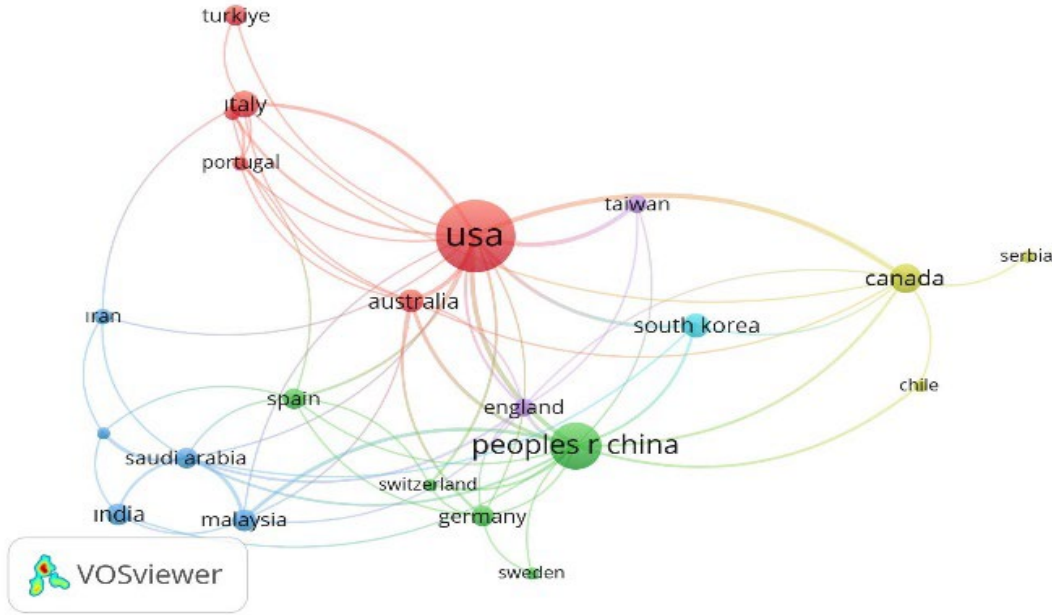
**Şekil 5.** Ülkelere Göre Yayın Sayısı (yazar tarafından tasarlanmıştır)

Bu liderlik, sadece yayın sayısı ile sınırlı değildir. Tablo 1'deki verilere göre, ABD 165 makale yayımlayarak 3610 atıf almış ve 46 bağlantı gücüne ulaşmıştır. Çin ise ABD'nin yarısından daha az makale (69 yayın) yayımlamasına rağmen, 1722 atıf ve 33 bağlantı gücü ile bu alanda sağlam bir şekilde ilerlediğini kanıtlamaktadır. Bu durum, Çin'in yayımladığı makalelerin yüksek etki gücüne sahip olduğunu göstermektedir.

**Tablo 1.** Ülkelere Göre Yayın Sayısı, Atıf ve TBG Değerleri

	<b>Değişkenler</b>	<b>Makale Sayısı</b>	<b>Atıflar</b>	<b>TBG</b>
<b>Ülkelere Göre</b>	ABD	165	3610	46
	Çin	69	1722	33
	Kanada	26	615	15
	İtalya	22	174	11
	Güney Kore	18	234	8
	Avustralya	17	680	17
	Hindistan	16	250	5
	Malezya	15	110	12
	İspanya	14	361	8
	Türkiye	14	36	2

Ana sıralamada üst sıralarda yer almasalar da, bazı ülkelerin yayımladıkları makalelerin etki gücü ve işbirliği potansiyeli dikkat çekicidir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, Suudi Arabistan, 13 makalesine karşın 147 atıf alarak ve 18 bağlantı gücü sergileyerek bu alandaki işbirliklerinin ve etkileşimlerinin yoğunluğunu kanıtlamaktadır. İngiltere, 11 yayımla 490 atıf alarak yayımlanan makalelerinin yüksek bilimsel etki yarattığını göstermektedir. Ayrıca 13 bağlantı gücü ile işbirliklerinde aktif bir rol oynamaktadır. İsviçre, sadece 5 yayın yapmasına rağmen 260 atıf alması, bu az sayıda makalenin bile alan üzerinde büyük bir etki yarattığını ve sıkça referans gösterildiğini ortaya koymaktadır. 2 bağlantı gücü ise işbirliği ağlarının genişlemediğini, ancak mevcut işbirliklerinin yüksek nitelikli olduğunu düşündürmektedir. Bu veriler, yayın sayısının tek başına bir ölçüt olmadığını, atıf ve bağlantı gücü gibi metriklerin bir ülkenin veya kurumun bu alandaki gerçek etkisini ve bilimsel işbirliklerinin kalitesini daha iyi yansıttığını göstermektedir.



**Şekil 6.** Ülke Temelli Bilimsel İşbirliği Ağı

### **En Etkili Çalışmalar ve Yazarlar**

WoSCC veri tabanında yer alan en çok atıf alan 10 çalışma incelendiğinde, bu alandaki en etkili kaynaklar ve yazarlar ortaya çıkmaktadır. Çalışmada kullanılan ağ analizlerinin tekrarlanabilirliği için VOSviewer ayarları (tam sayım, eş-görünüm eşiği = 5, bağlantı gücü normalizasyonu) ve filtre kriterleri belirtilmiştir (Fang vd, 2020; Lee vd., 2023). Tablo 2, bu çalışmaların yayımlandığı dergileri, aldıkları toplam atıf sayısını ve yıllık atıf ortalamalarını detaylandırmaktadır.

Bu analizde, Malhotra ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yayımlanan çalışmanın popülerliği özellikle dikkat çekmektedir. Çalışma toplamda 250 atıf almasına rağmen, yıllık ortalama 55,5 atıf ile alandaki etkisini kısa sürede kanıtlamıştır. Bu durum, makalenin güncelliğini ve yüksek ilgi gördüğünü göstermektedir.

Yayımların yayımlandığı dergilere bakıldığında, en çok makalenin "Automation In Construction" dergisinde yer alması, araştırmaların ana odak noktasının inşaat sektörü olduğunu vurgulamaktadır. Bu durum, inşaat sektörünün yüksek riskli yapısı nedeniyle YZ temelli İSG çözümlerine olan ihtiyacın ve ilginin bir göstergesidir.

**Tablo 2.** Değişkenlerin Frekansı, Atıf Sayıları ve Toplam Bağlantı Gücü (TBG)

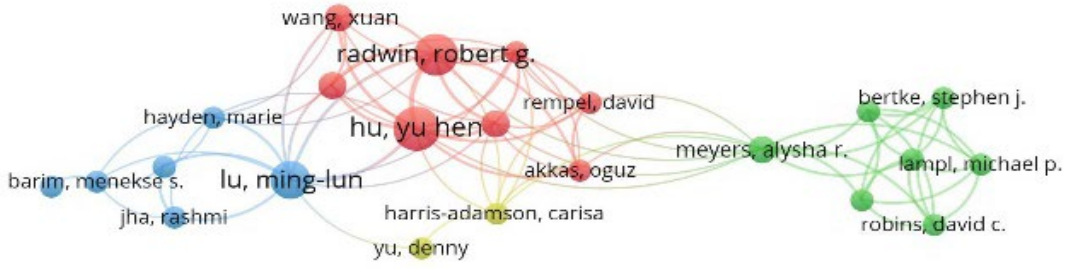
Yazar	Kaynak	Toplam Atıf Sayısı	Yıllık Atıf Ortalaması
Nath vd. 2020	Automation In Construction	278	50,5
Malhotra vd., (2021).	Sleep	250	55,5
Fang vd., 2020	Advanced Engineering Informatics	205	37,2
Zhang vd., 2019	Automation In Construction	201	30,9
Lun ve Zhao, 2015	International Journal Of Pattern Recognition And Artificial Intelligence	191	16,6
Jin ve Zou, 2019	Safety Science	189	29
Del Mar Segui vd., 2015	Journal Of Clinical Epidemiology	181	17,2
Memarzadeh vd, 2013	Automation In Construction	181	14,48
Marshall vd., 2016	Journal Of The American Medical Informatics Association	164	14,2
Yu vd., 2019	Automation In Construction	137	21

Tematik bir analizle en çok atıf alan 10 kaynak Tablo 3'te sıralanmıştır. Yazarlar bazında incelendiğinde ise, Hu Yu Hen ve ekibi, 8 yayını ve 55 atıf alarak en çok atıf alan yazar grubudur. Bu durum, yazarın ve ekibinin bu alandaki lider konumunu pekiştirmektedir.

**Tablo 3.** Yayın, Atıf Sayıları ve Toplam Bağlantı Gücü (TBG)

Yazarlar	Yayın Sayısı	Atıflar	TBG
Yu Hen Hu	8	55	28
Robert G Radwin	7	48	27
Ming Lun Lu	6	47	20
<b>En Fazla Yayın Yapan Yazarlar</b>			
Philip Boyer,	5	32	12
David Burns,	5	32	12
Cari Whyne,	5	32	12
J. Maiti,	5	165	6

Tematik görselleştirmede yazarlar sekiz farklı kümede gruplanmaktadır (Şekil 7). Bu kümeler arasında mavi kümede Ming Lun Lu, kırmızı kümede Hu Yu Hen ve Robert G. Radwin, yeşil kümede Alysha R. Meyers gibi önde gelen araştırmacılar yer almaktadır. Bu kümeler, farklı araştırma konularında uzmanlaşmış ve kendi aralarında yoğun işbirlikleri kurmuş grupları temsil etmektedir. Her bir küme, YZ temelli İSG araştırmalarının çeşitli yönlerine odaklanarak alana önemli katkılar sağlamaktadır.



**Şekil 7.** Yazarlar Arası İş Birliği Ağı (VOSviewer Küme Renklerine Göre)

### Araştırmaların Anahtar Kelime ve Konu Dağılımı

Analiz edilen çalışmaların anahtar kelimeleri ve teknolojik yaklaşımları, bu alandaki temel odak noktalarını ortaya koymaktadır. Tablo 4'te görüldüğü gibi, en sık tekrar eden anahtar kelimeler sırasıyla ML (n:115), YZ (n:54) ve DL (n:48)'dir. Bu durum, araştırmaların ağırlıklı olarak bu teknolojiler üzerine yoğunlaştığını göstermektedir. En çok atıf alan yayınların anahtar kelime, çalışma alanı ve teknoloji tercihlerini incelediğimizde (Tablo 5), DL, ML ve CV teknolojilerinin ön planda olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.** Yayın, Atıf Sayıları ve Toplam Bağlantı Gücü (TBG)

	Değişkenler	Makale Sayısı	Atıflar	TBG
<b>Anahtar Kelimeler</b>	Makine öğrenmesi (ML)		115	98
	Yapay Zeka (YZ)		54	62
	Derin Öğrenme (DL)		48	53
	İş Sağlığı (IS)		36	52
	Bilgisayar Görmeşi(CV)		24	28
	İş sağlığı ve Güvenliği(İSG)		21	31
	Ergonomi		17	21
	Doğal Dil İşleme(NLP)		16	28
	Güvenlik		16	28
	İnşaat Güvenliği		16	19

Özellikle inşaat sektöründe yürütülen çalışmalarda (Nath vd, 2020; Fang vd., 2020; Zhang vd., 2019; Jin ve Zou, 2019; Memarzadeh vd., 2013; Yu vd., 2019) gibi yazarların altı makalesi öne çıkmaktadır. Bu makalelerin derinlemesine incelenmesi sonucunda, DL, giyilebilir teknolojiler ve ML gibi teknolojik yaklaşımların sıkça kullanıldığı tespit edilmiştir. Diğer çalışma alanlarına bakıldığında ise, farklı teknolojik tercihler göze

çarpılmaktadır. İSG eğitimlerinde kinetik tabanlı derin öğrenme (Lun ve Zhao, 2015), sağlık bilişimi alanında ML ve çoklu modelleme (Marshall vd., 2016), ofis ortamında iş sağlığı için psikometrik modelleme (del Mar Seguí vd., 2015) ve uyku tıbbında ise ML, DL ve giyilebilir teknolojilerin bir arada kullanıldığı (Malhotra vd., 2021; Patel vd., 2022) görülmektedir.

Bu veriler, farklı sektörlerin ve İSG konularının, sorunlarını çözmek için çeşitli YZ temelli yaklaşımlara yöneldiğini göstermektedir. Bu çeşitlilik, YZ'nin İSG alanındaki geniş uygulama yelpazesini ortaya koymaktadır.

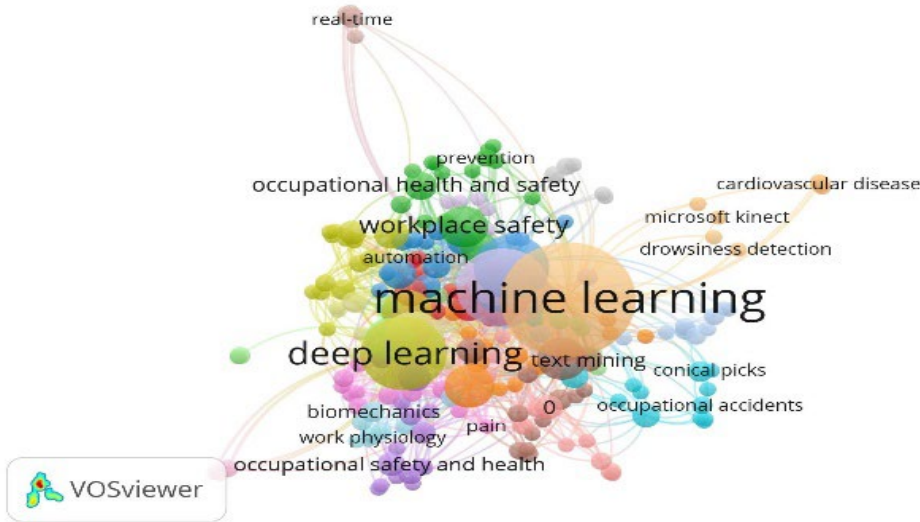
**Tablo 5.** En Fazla Atıf Alan Yayınlar, Anahtar Kelimeler ve Teknolojileri

Yazarlar	Anahtar Kelimeler	Teknolojiler
Nath vd., 2020	Personal protective equipment (PPE), Construction safety, Deep learning, Transfer learning, Image dataset, Real-time object detection	YOLO tabanlı Derin Öğrenme (CNN), VGG-16, ResNet-50, Xception
Malhotra, vd., (2021).	Sleep, apnea, hypoxia, cardiovascular, lung, hypopnea	ML, DL, Giyilebilir Teknolojiler
Fang vd., 2020	Behaviour-based safety, Unsafe behaviour, Computer vision, Deep learning, Convolutional neural network	CV, CNN
Zhang vd., 2019	Construction site accident analysis, Machine learning, Text mining, Natural language processing, Sequential quadratic programming, Optimization	Doğal Dil İşleme (NLP), Ensemble ML, SVM, DT, KNN, Naive Bayes
Lun ve Zhao, 2015	Human motion recognition, machine learning, microsoft kinect	Hareket Tanıma, DL, Kinect destekli İnsan Poz Takibi
Jin ve Zou, 2019	Construction safety, Human factor, Scientometric review, Science mapping, Literature review	Bibliyometrik analiz, Veri Madenciliği, Akıllı Teknolojiler
del Mar seguí vd., 2015	Asthenopia, Computer terminals, Occupational health, Occupational exposure, Eye diseases, Diagnosis	Psikometrik Modelleme, Rasch Analizi (ML içermeyen anket çalışması)
Memarzadeh vd., 2013	Histogram of oriented gradients, Support vector machine, HSV colors, Resource tracking, Performance monitoring	Görüntü İşleme, HOG + Color, SVM
Marshall vd., 2016	systematic review, data mining, natural language processing, randomized controlled trials as topic, bias	ML, Doğal Dil İşleme (NLP), Multi-task Model
Yu vd, 2019	Occupational safety and health, Construction worker, Ergonomic, Deep learning, Machine learning, Computer vision	CV, 3D Motion Capture, Biyomekanik Modelleme

Şekil 8'de gösterilen tematik analiz, YZ temelli İSG araştırmalarının altı anahtar kelime kümesi etrafında şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu kümeler, alandaki farklı odak noktalarını ve yaklaşımları temsil etmektedir. Kırmızı küme, en temel konuları ele

almaktadır: iş sağlığı, iş güvenliği, iş kazaları, izleme ve genel güvenlik. Bu kümedeki anahtar kelimelerin, araştırmaların temel amacını oluşturduğu görülmektedir. Mavi küme, daha çok teknolojik ve metodolojik konulara odaklanmaktadır. ML, inşaat güvenliği, Doğal Dil İşleme (NLP), güvenlik yönetimi ve veri madenciliği. Bu küme, özellikle veri analitiği ve yeni teknolojik araçların kullanımına işaret etmektedir. Turkuaz küme, ileri düzey YZ teknolojilerini ve uygulamalarını içermektedir. DL, objektif tarama ve KKD. Bu küme, spesifik güvenlik sorunlarına yönelik derinlemesine teknolojik çözümleri temsil etmektedir. Yeşil küme, YZ, YSA, risk yönetimi ve İSG gibi daha geniş ve stratejik konuları kapsamaktadır. Bu küme, YZ'nin İSG'deki genel stratejik rolüne vurgu yapmaktadır. Mor küme ise sanal gerçeklik (VR), sensörler, YZ ve inşaat endüstrisi gibi gelişmekte olan teknolojilerle belirli bir sektörü birleştirmektedir. Bu küme, sanal ortamlar ve sensörler aracılığıyla güvenlik simülasyonları ve izleme sistemlerinin potansiyeline dikkat çekmektedir.

Bu tematik kümelenme, YZ temelli İSG araştırmalarının sadece temel kavramlarla sınırlı kalmayıp, farklı teknolojileri ve sektörleri bir araya getiren çok yönlü bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle "iş sağlığı" anahtar kelimesi 36 kez kullanılarak, bu alandaki araştırmaların önemli bir parçası haline gelmiştir ve bağlantı gücü açısından DL ile neredeyse eşdeğerdir. Bu, araştırmaların hem teknolojik hem de pratik sağlık boyutuna aynı derecede önem verdiğinin bir göstergesidir.



**Şekil 8.** Anahtar Kelime Küme Dağılımı (Renkli Haritalama)

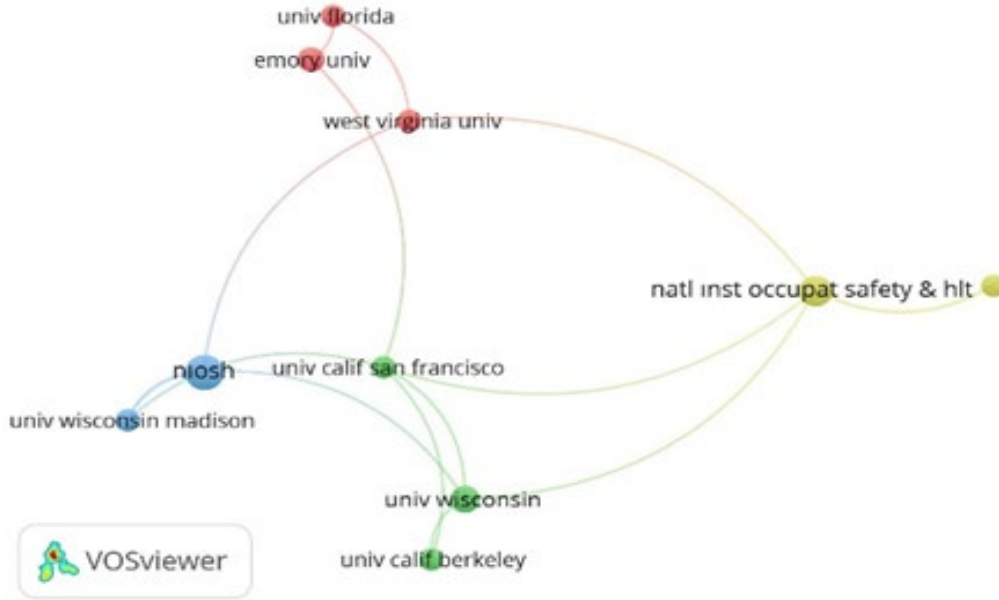
### **Kurumsal Katkıları ve Etkileşimler**

YZ temelli, İSG araştırmalarına en çok katkı sağlayan kurumsal yapılar arasında Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü (NIOSH), Michigan Üniversitesi ve Toronto Üniversitesi öne çıkmaktadır. Tablo 6, bu kurumların yayın sayıları, atıfları ve bağlantı güçlerini detaylandırmaktadır.

**Tablo 6.** Kurum, Makale/ Atıf Sayıları Ve Toplam Bağlantı Gücü (TBG)

	Üniversite / kurum	Yayın Sayısı	Atıflar	TBG
Üniversiteler	NIOSH	10	205	4
	Nat. Ins. OHS	8	47	5
	Toronto Üniversitesi	8	57	4
	Michigan Üniversitesi	8	272	1
	Colorado Sch Mines Üniversitesi	8	78	0

Şekil 9'daki tematik analiz, üniversitelerin 16 farklı kümede toplandığını göstermektedir. Bu kümelerden mavi kümede, NIOSH (10 yayın, 205 atıf, 4 bağlantı gücü) ve Michigan Üniversitesi (8 yayın, 47 atıf, 5 bağlantı gücü) gibi güçlü kurumlar bir araya gelmiştir. Kırmızı kümede ise Emory Üniversitesi yer almaktadır. Bu kümelenmeler, kurumlar arası işbirliği ağlarının yapısını gözler önüne sermektedir.

**Şekil 9.** Kurumların Tematik Gösterimi

### Yayın Kaynakları ve Finansman

Araştırmaların yayımlandığı dergiler incelendiğinde (Tablo 7), en çok yayına ev sahipliği yapan dergi "International Journal of Occupational Safety and Ergonomics" (18 yayın) olmuştur. Onu 15'er yayınlara "Safety Science" ve "Sensors" dergileri takip etmektedir.

**Tablo 7.** En Çok Yayın Yapılan Dergiler (%)

Dergilerin Kimlikleri	Makale Sayısı	%
International Journal Of Occupational Safety And Ergonomics	18	4,34
Safety Science	15	3,62
Sensors	15	3,62
IEEE Access	14	3,38
Applied Sciences Basel	11	2,65
Automation In Construction	9	2,17
International Journal Of Environmental Research And Public Health	9	2,17
Journal Of Construction Engineering And Management	9	2,17
Work A Journal Of Prevention Assessment Rehabilitation	8	1,93
Frontiers In Public Health	7	1,69

Yayıncılar açısından bakıldığında, Elsevier 101 yayınlı toplam yayınların %25'ine sahip olarak açık ara lider konumdadır. MDPI ise 84 yayınlı ve %20,5'lik pay ile ikinci sırada yer almaktadır. SAGE grubu ise 11 yayınlı ve %2,65 ile en az temsil edilen yayıncı grubudur (Tablo 8).

**Tablo 8.** Yayıncılara Göre Yayınların Dağılımı (%)

Değişkenler	Makale Sayısı	%
Elsevier	101	24,3
MDPI	85	20,5
Taylor & Francis	44	10,6
Springer Nature	30	7,24
IEEE	28	6,76
Asce-Amer Soc Civil Engineers	15	3,62
SAGE	11	2,65

WoSCC araştırmamıza dahil ettiğimiz veri tabanının Tablo 9'da da görüldüğü üzere, neredeyse yarısının fonlarla desteklendiği görülmüştür. En fazla fon sağlayan kurum ABD devletidir. Department of Health and Human Services (89), Centers For Disease Control Prevention USA (84) ve National Institute For Occupational Safety Health NIOSH (83) bu üç kurum toplamda 256 yayına finansal destek sağlayarak araştırmacıların bu alanda çalışmasına büyük katkı sunmuştur. ABD'yi, 44 yayına destek sağlayan Çin izlemektedir. Bu veriler, bu alandaki araştırmaların büyük ölçüde devlet destekli fonlarla yürütüldüğünü ve özellikle ABD'nin bu konuda öncü rol oynadığını göstermektedir.

**Tablo 9.** Önde Gelen Kurumların Yayın ve Atıf Bilgileri (%)

	<b>Kurum Adı</b>	<b>Makale Sayısı</b>	<b>%</b>
<b>Fon Sağlayıcı</b>	United States Department Of Health Human Services	89	21,5
	Centers For Disease Control Prevention USA	84	20,2
	National Institute For Occupational Safety Health NIOSH	83	20
	National Natural Science Foundation Of China NSFC	22	5,31
	National Science Foundation NSF	22	5,31

YZ tabanlı teknolojilerin iş sağlığı ve güvenliği alanında giderek artan bir şekilde uygulandığını ve özellikle gelişmiş ülkelerde bu konuda ciddi bir bilimsel üretim olduğunu göstermektedir. Anahtar kelime kümeleri ve ülke/kurum iş birlikleri, araştırma eğilimlerinin teknoloji ve veri analitiği temelli yönlere kaydığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, YZ tabanlı teknolojilerin iş sağlığı ve güvenliği alanında giderek artan bir şekilde uygulandığını ve özellikle gelişmiş ülkelerde bu konuda ciddi bir bilimsel üretim olduğunu göstermektedir. Anahtar kelime kümeleri ve ülke/kurum iş birlikleri, araştırma eğilimlerinin teknoloji ve veri analitiği temelli yönlere kaydığını ortaya koymaktadır.

## TARTIŞMA

Bu bibliyometrik analiz, yapay zekâ (YZ) temelli teknolojilerin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki yükselen etkisini kapsamlı biçimde ortaya koymuştur. Son on yılda bu teknolojilerin İSG araştırmalarının merkezine yerleştiği ve çok disiplinli iş birliklerinin hızla arttığı görülmektedir. Yayın dağılımı incelendiğinde, 1991–2019 yılları arasında oldukça sınırlı sayıda yayın bulunurken, 2019 yılı itibarıyla belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın; pandemi koşulları, dijitalleşmenin hız kazanması, büyük veri analitiği kapasitesinin genişlemesi ve iş yerlerindeki güvenlik uygulamalarının otomasyon ihtiyacıyla doğrudan ilişkili olduğu değerlendirilmektedir (Hennigh vd., 2021; Jasiulewicz-Kaczmarek vd., 2022; Papandrea, 2020).

### Çok Disiplinli Yaklaşım

Elde edilen bulgular, İSG uygulamalarının mühendislik, bilgisayar bilimleri, çevre sağlığı ve ergonomi gibi farklı disiplinlerle yakın iş birlikleri yaptığını göstermektedir. Bu durum, İSG'nin yalnızca bir işyeri sorunu değil; teknoloji, sürdürülebilirlik ve halk sağlığı ile kesişen çok boyutlu bir araştırma sahası olduğunu ortaya koymaktadır (Pishgar vd., 2021; Dreval vd., 2025; Westgaard ve Winkel, 2011). Bu bağlamda, mühendislik, halk sağlığı ve İSG eğitim programlarında YZ okuryazarlığı, veri analizi ve etik farkındalık derslerinin müfredata dahil edilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca, YZ uygulamalarında çalışanların mahremiyeti, kişisel verilerin korunması ve algoritmik tarafsızlık konularında yasal düzenlemelerin geliştirilmesi gerekmektedir (Pishgar vd., 2021).

### Ülke ve Kurum Temelli Analizler

Ülke düzeyinde, ABD'nin yüksek atıf sayıları ve bağlantı gücü, bu alandaki liderliğini ortaya koymaktadır. Çin ve Kanada gibi ülkeler yayın sayısı bakımından öne

çıkma ile birlikte, atıf yoğunluğu açısından ABD ile aynı düzeye ulaşamamıştır (Nath vd., 2020; Howard, 2019). Türkiye ise 14 yayın ile ilk 10 ülke arasında yer alsa da düşük atıf sayısı ve bağlantı gücü, uluslararası görünürlüğün sınırlı olduğunu göstermektedir (Kahraman, 2021; Khairuddin vd., 2022). Türkiye'nin Avrupa Birliği Horizon programları gibi büyük ölçekli projelere daha fazla katılım göstermesi, hem ağ gücünü hem de yayınların etki düzeyini artıracaktır.

### Anahtar Kelime ve Kümelene Analizi

Anahtar kelime analizinde, ML, DL, AI ve CV gibi tekniklerin iş kazası tahmini, kişisel koruyucu donanım (KKD) tanıma, güvenli alan belirleme ve risk değerlendirme konularında yoğunlaştığı görülmektedir (LeCun vd., 2015; Chen vd., 2018; Di vd., 2024). Kümelene analizinde ise bir kümede kaza izleme ve ergonomi vurgusu, diğerinde YSA ve güvenlik yönetimi gibi teknolojik yaklaşımların öne çıkması, alanın hem kavramsal hem de teknik çeşitliliğini ortaya koymaktadır (Memarzadeh vd., 2013; Fang vd., 2020; Omidokun vd., 2025; Chou vd., 2025; Soltanmohammadlou vd., 2025; Ding vd., 2025).

YZ destekli PPE tespitine ilişkin simülasyon çalışmalarında, kaza oranlarında %15 azalma öngörülmektedir (ILO, 2023; Eurostat, 2024). Ayrıca, raporlanmış pilot projeler, YZ tabanlı risk izleme sistemlerinin uygulandığı şantiyelerde kayıp iş günü/100 çalışan oranının %10 azaldığını göstermektedir (Dreval vd., 2025). Bu bulgular, YZ'nin yalnızca teorik bir araç değil, pratikte de iş güvenliği iyileştirmeleri sağlayan bir teknoloji olduğunu kanıtlamaktadır (Jasiulewicz-Kaczmarek vd., 2022).

### Araştırma Boşlukları

Literatürün derinlemesine incelenmesi sonucunda, "Tehlike Türü × YZ Tekniği × Sektör × Veri Tipi" çerçevesinde araştırma boşlukları belirlenmiştir. Bu bulgular Tablo 1'de sunulmuştur (Omidokun vd., 2025; Lung vd., 2025; Di vd., 2024; Ding vd., 2025).

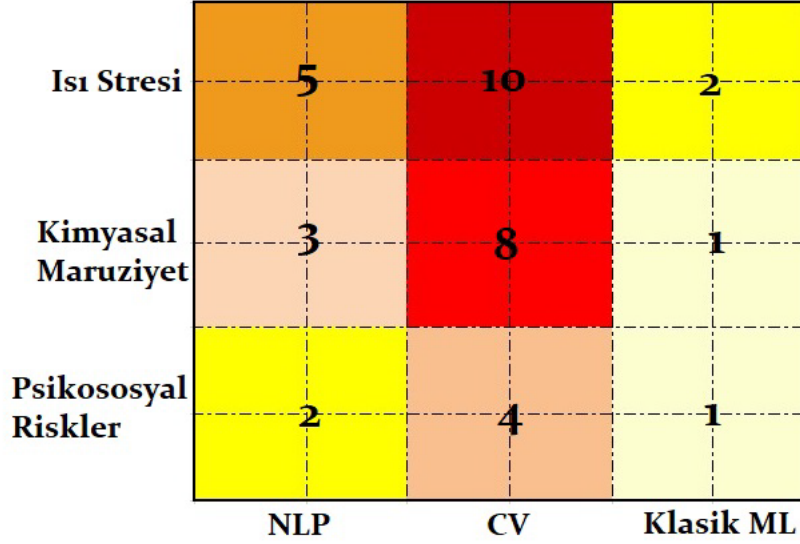
**Tablo 10.** Literatürde Araştırma Alanlarındaki Mevcut Boşluklar (Yayın Sayısı n)

Tehlike Türü	YZ Tekniği	Sektör	Veri Tipi	Yayın Sayısı (n)
Isı Stresi	NLP	İnşaat	Gerçek Zamanlı Sensör Verileri	<5
Kimyasal maruziyet	CV	Kimya/metal	Açık veri	<3
Psikososyal riskler	ML	Ofis	Anket+sensör hibrit	<2

Isı haritası, hangi tehlikelerin hangi YZ teknikleri ile en çok ilişkilendirildiğini görselleştirmekte, odak noktaları ve yetersiz araştırılan alanları ortaya koymaktadır. Bulgular, özellikle kimyasal maruziyet ve ısı stresi gibi tehlikelerde CV tekniklerinin

öne çıktığını, klasik ML modellerinin ise en az kullanılan yöntemler arasında kaldığını göstermektedir.

### Araştırma Boşluğu Isı Haritası (Tehlike x Metot)



**Şekil 10.** Literatürdeki Araştırma Alanlarındaki Boşlukların Isı Haritası

Ayrıca, Tablo 11’de ML, DL ve CV tekniklerinin literatürde raporlanan başarı ölçütleri sunulmuştur (Fang vd., 2018; Lee vd., 2023; Vukicevic vd., 2024; Tan vd., 2024).

**Tablo 11.** ML, DL ve CV için Literatürde Araştırma Alanlarındaki Mevcut Boşluklar (n)

Uygulama Alanı	Yöntemler	Başarı Ölçütleri	Açık Veri/Doğrulama
PPE Tespiti	YOLOv3/v5, CNN	mAP 0.85–0.92	Çoğunlukla sınırlı, dış doğrulama az
Davranış Analizi	Pose Estimation, LSTM	Precision ~0.80	Veri setleri kapalı
Ergonomi	Kinect, Biomekanik Model	Postür doğruluğu >%85	Genelleme sınırlı
NLP Kaza Analizi	Word2Vec, BERT	F1 0.78–0.89	Veri seti kısıtlı, diller sınırlı
VR/AR-DT-BIM	Entegratif Modeller	Kullanıcı performansı ↑	Çoğu pilot ölçek

### Fonlama ve Politika Katkıları

ABD merkezli NIOSH gibi kurumların önemli fonlamaları, İSG araştırmalarının yalnızca akademik değil, aynı zamanda politika ve iş gücü sağlığı stratejileri açısından da değerli olduğunu göstermektedir. Türkiye’de ise sistematik fon desteği azdır; çalışmalar genellikle bireysel çabalarla yürütülmektedir. TÜBİTAK ve BAP gibi ulusal fon kaynaklarının artırılması, Türkiye’nin akademik görünürliğini yükseltebilir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bulgular ışığında;

Gelişmekte olan ülkelerde YZ temelli çözümlerin yerleştirilmesi,

Veri güvenliği, etik ilkeler ve çalışan mahremiyetine ilişkin düzenlemelerin güçlendirilmesi,

Akademi–sanayi iş birliklerinin teşvik edilmesi,

Mobil sensör teknolojileri ve gerçek zamanlı risk analitiği sistemlerinin yaygınlaştırılması,

Yerli YZ çözümlerinin geliştirilmesi için üniversite–özel sektör ortaklıklarının artırılması önerilmektedir (Howard, 2019; Čartolovni vd., 2022; Chetty vd., 2024; Lung vd., 2025).

YZ, İSG’de tehlike tanıma, risk değerlendirme ve önleyici tedbirlerin uygulanmasında yeni bir paradigma sunmaktadır. Ancak bu ilerlemenin güçlü iş birlikleri, fon kaynakları, etik çerçeveler ve kapsayıcı politikalarla desteklenmesi kritik önem taşımaktadır. Böylelikle daha güvenli ve sürdürülebilir çalışma ortamlarının oluşturulması mümkün olacaktır.

## KAYNAKÇA

- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Bao, Y., Li, H. & Zhang, C. (2022). Virtual and augmented reality for construction safety training: A review. *Automation in Construction*, 135, 104102. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104102>
- Barghi, B. (2020). Qualitative and quantitative project risk assessment using a hybrid PMBOK model developed under uncertainty conditions. *Heliyon*, 6(1).
- Čartolovni, A., Tomičić, A., & Mosler, E. L. (2022). Ethical, legal, and social considerations of AI-based medical decision-support tools: a scoping review. *International Journal of Medical Informatics*, 161, 104738.
- Chen, P., Xie, Y., Jin, P., & Zhang, D. (2018). A wireless sensor data-based coal mine gas monitoring algorithm with least squares support vector machines optimized by swarm intelligence techniques. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(5), 1550147718777440.
- Chetty, D. R. V., Boojhawon, R., Bhagwant, S., & Levy, L. (2024). Factors affecting the occupational safety and health of small and medium enterprises in the Construction Sector of Mauritius. *Social Sciences & Humanities Open*, 10, 100964.
- Chou, J. S., Chen, C. J., & Liu, C. Y. (2025). Amodal instance segmentation optimized by metaheuristics for enhanced safety behavior detection on construction sites. *Automation in Construction*, 178, 106412.
- Damilos, S., Saliakas, S., Karasavvas, D., & Koumoulos, E. P. (2024). an overview of tools and challenges for safety evaluation and exposure assessment in Industry 4.0. *Applied Sciences*, 14(10), 4207.
- del Mar Seguí, M., Cabrero-García, J., Crespo, A., Verdú, J., & Ronda, E. (2015). A reliable and valid questionnaire was developed to measure computer vision syndrome at the workplace. *Journal of clinical epidemiology*, 68(6), 662–673.
- Di, B., Xiang, L., Daoqing, Y., & Kaimin, P. (2024). MARA-YOLO: An efficient method for multiclass personal protective equipment detection. *IEEE Access*, 12, 24866–24878.

- Ding, D., Deng, Z., & Yang, R. (2025). Yolo-tc: An optimized detection model for monitoring safety-critical small objects in tower crane operations. *Algorithms*, 18(1), 27.
- Dreval, Y., Zaika, S., Tešovič, R., & Patoprstý, M. (2025). The International Labor Organization's activities in the context of achieving sustainable development goals. *Journal of Entrepreneurship & Sustainability Issues*, 12(3).
- Eurostat. (2024, 12 Haziran). Accidents at work statistics. 30 Ağustos 2025 tarihinde <https://ec.europa.eu/eurostat> adresinden erişildi.
- Fang, Q., Ding, L., Zhong, B., Love, P. E. D., Luo, H. & Pena-Mora, F. (2018). Computer vision applications in construction safety: A systematic review. *Safety Science*, 110, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.025>
- Fang, W., Love, P. E., Luo, H., & Ding, L. (2020). Computer vision for behaviour-based safety in construction: A review and future directions. *Advanced Engineering Informatics*, 43, 100980.
- Hennigh, O., Narasimhan, S., Nabian, M. A., Subramaniam, A., Tangsali, K., Fang, Z., ... & Choudhry, S. (2021, June). NVIDIA SimNet™: An AI-accelerated multi-physics simulation framework. In *International conference on computational science* (pp. 447-461). Cham: Springer International Publishing.
- How, M. L., Cheah, S. M., Chan, Y. J., Khor, A. C., & Say, E. M. P. (2020). Artificial intelligence-enhanced decision support for informing global sustainable development: A human-centric AI-thinking approach. *Information*, 11(1), 39.
- Howard, J. (2019). Artificial intelligence: Implications for the future of work. *American journal of industrial medicine*, 62(11), 917-926.
- International Labour Organization (ILO). (2023, 28 Eylül). New ILO estimates: Work-related diseases and injuries kill 2.9 million people annually. Basın bülteni. 30 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Antosz, K., Wyciółkowski, R., & Sławińska, M. (2022). Integrated approach for safety culture factor evaluation from a sustainability perspective. *International journal of environmental research and public health*, 19(19), 11869.
- Jin, R., Zuo, J., & Hong, J. (2019). Scientometric review of articles published in ASCE's journal of construction engineering and management from 2000 to 2018. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(8), 06019001.
- Sanni-Anibire, M. O., Mahmoud, A. S., Hassanain, M. A., & Salami, B. A. (2020). A risk assessment approach for enhancing construction safety performance. *Safety science*, 121, 15-29.
- Junjia, Y., Alias, A. H., Haron, N. A., & Abu Bakar, N. (2023). A bibliometric review on safety risk assessment of construction based on CiteSpace software and WoS database. *Sustainability*, 15(15), 11803.
- Kahraman, M. M. (2021). Analysis of mining lost time incident duration influencing factors through machine learning. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38(2), 1031-1039.
- Khairuddin, M. Z. F., Hasikin, K., Abd Razak, N. A., Lai, K. W., Osman, M. Z., Aslan, M. F., ... & Wu, X. (2022). Predicting occupational injury causal factors using text-based analytics: A systematic review. *Frontiers in public health*, 10, 984099.
- Kjellén, U. (2023). Preventing fatal accidents in construction through the management of barriers. *Heliyon*, 9(11).
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
- Lee, G., Kim, Y. & Teizer, J. (2023). Vision-based safety monitoring in construction: A systematic review of deep learning methods. *Automation in Construction*, 154, 104094. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104094>
- Leong, L. K., Manickam, L., Haque, R., Jumbulingam, K., & Noordin, N. B. M. (2024). Embracing Digital Transformation for Sustainable Business in the Construction Industry. *Pakistan Journal of Life & Social Sciences*, 22(2).
- Liu, R., Zhang, W. & Li, X. (2024). Real-time PPE detection for construction workers using improved YOLOv7. *Buildings*, 14(7), 1623. <https://doi.org/10.3390/buildings14071623>

- Lo, C.-K., Hu, H. & Chan, A. P. C. (2022). Automatic detection of construction PPE using YOLOv7: A field evaluation. *Sustainability*, 14(23), 15987. <https://doi.org/10.3390/su142315987>
- Lun, R., & Zhao, W. (2015). A survey of applications and human motion recognition with microsoft kinect. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 29(05), 1555008.
- Lung, L. W., Wang, Y. R., & Chen, Y. S. (2025). Leveraging Deep Learning and Internet of Things for Dynamic Construction Site Risk Management. *Buildings*, 15(8), 1325.
- Machin, D., & Liu, Y. (2024). How tick list sustainability distracts from actual sustainable action: the UN 2030 Agenda for Sustainable Development. *Critical discourse studies*, 21(2), 164-181.
- Malhotra, A., Ayappa, I., Ayas, N., Collop, N., Kirsch, D., Mcardle, N., ... & Gottlieb, D. J. (2021). Metrics of sleep apnea severity: beyond the apnea-hypopnea index. *Sleep*, 44(7), zsab030.
- Marshall, I. J., Kuiper, J., & Wallace, B. C. (2016). RobotReviewer: evaluation of a system for automatically assessing bias in clinical trials. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 23(1), 193-201.
- Memarzadeh, M., Golparvar-Fard, M., & Niebles, J. C. (2013). Automated 2D detection of construction equipment and workers from site video streams using histograms of oriented gradients and colors. *Automation in Construction*, 32, 24-37.
- Muñoz-La Rivera, F., Mora-Serrano, J., & Oñate, E. (2021). Factors influencing safety on construction projects (FSCPs): Types and categories. *International journal of environmental research and public health*, 18(20), 10884.
- Nath, N. D., Behzadan, A. H., & Paal, S. G. (2020). Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment. *Automation in Construction*, 112, 103085.
- Omidokun, J., Egeonu, D., Jia, B., & Yang, L. (2025). Leveraging digital perceptual technologies for analysis of human biomechanical processes: A contactless approach for workload assessment. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1-14.
- Papandrea, D. (2020). In the face of a pandemic: Ensuring safety and health at work. Geneva: ILO.
- Patel, V., Chesmore, A., Legner, C. M., & Pandey, S. (2022). Trends in workplace wearable technologies and connected-worker solutions for next-generation occupational safety, health, and productivity. *Advanced Intelligent Systems*, 4(1), 2100099.
- Piroozfar, P., Farr, E. R., Hvam, L., Robinson, D., & Shafiee, S. (2019). Configuration platform for customisation of design, manufacturing and assembly processes of building façade systems: A building information modelling perspective. *Automation in construction*, 106, 102914.
- Pishgar, M., Issa, S. F., Sietsema, M., Pratap, P., & Darabi, H. (2021). REDECA: a novel framework to review artificial intelligence and its applications in occupational safety and health. *International journal of environmental research and public health*, 18(13), 6705.
- SGK (Sosyal Güvenlik Kurumu). (2023). 2022 İstatistik Yıllığı – İş kazaları ve meslek hastalıkları. Ankara: SGK Yayınları.
- Soltanmohammadlou, N., Hon, C. K., Drogemuller, R., Motamedisedeh, O., & Rahimian, F. (2025). Modelling risk factors in earthmoving equipment operations on Australian construction sites: a fuzzy DEMATEL approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
- Takala, J., Hämäläinen, P., Sauni, R., Nygård, C. H., Gagliardi, D., & Neupane, S. (2024). Global-, regional-and country-level estimates of the work-related burden of diseases and accidents in 2019. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 50(2), 73.
- Tan, Y., Xue, F. & Lu, W. (2024). Digital twin and BIM for safety management: A systematic review and future directions. *Automation in Construction*, 158, 104245. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.104245>


- Vukicevic, A. M., Petrovic, M., Milosevic, P., Peulic, A., Jovanovic, K., & Novakovic, A. (2024). A systematic review of computer vision-based personal protective equipment compliance in industry practice: advancements, challenges and future directions. *Artificial Intelligence Review*, 57(12), 319.
- Wadsworth, E., & Walters, D. (2019). *Safety and Health at the Heart of the Future of Work: Building on 100 Years of Experience*.
- Wang XY (2012). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors *Construction Economics And Building* 12(3) Page 101-102.
- Westgaard, R. H., & Winkel, J. (2011). Occupational musculoskeletal and mental health: Significance of rationalization and opportunities to create sustainable production systems – A systematic review. *Applied Ergonomics*, 42(2), 261–296
- Yu, Y., Li, H., Yang, X., Kong, L., Luo, X., & Wong, A. Y. (2019). An automatic and non-invasive physical fatigue assessment method for construction workers. *Automation in construction*, 103, 1-12.
- Zhang, F., Fleyeh, H., Wang, X., & Lu, M. (2019). Construction site accident analysis using text mining and natural language processing techniques. *Automation in Construction*, 99, 238-248.
- Zhasmukhambetova, A., Evdorides, H., & Davies, R. J. (2025). Integrating Risk Assessment and Scheduling in Highway Construction: A Systematic Review of Techniques, Challenges, and Hybrid Methodologies. *Future Transportation*, 5(3), 85.

## BÖLÜM 6

### YAPAY ZEKANIN GASTRONOMİ BİLİMİNE ETKİSİ: YENİLİKÇİ UYGULAMALAR VE SÜREÇLER


*Emre AKMANOĞLU*

*Öğr. Gör., Sinop Üniversitesi, Turizm Fakültesi, eakmanoglu@sinop.edu.tr*

 0000-0003-2224-0980

*Volkan ÇAVUŞ*

*Öğr. Gör., Sinop Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, vcavus@sinop.edu.tr,*

 0000-0003-0821-0371

Yapay zekâ teknolojileri ve bu teknolojilere dayalı uygulamalar, günümüzde dijital ekosistemin hemen her katmanında bireylere çeşitli hizmetler sunan temel bileşenler hâline gelmiştir. Akıllı ev sistemleri, otonom araçlar, mobil uygulamalar, sesli asistanlar ve sohbet robotları, yapay zekânın çok yönlü kullanım alanlarını somut olarak yansıtan örneklerdendir. Bu gelişmeler doğrultusunda yapay zekâ, giderek artan biçimde insan yaşamının tüm alanlarına nüfuz eden dönüştürücü bir teknoloji konumuna ulaşmıştır. Söz konusu dönüşümün belirgin biçimde hissedildiği alanlardan biri de eğitimidir. Algoritmik işlem kapasitesine sahip makine temelli bir yaklaşım olarak yapay zekâ; tahmin, veri analizi, öneri sistemleri ve karar destek mekanizmaları gibi işlevlerinin yanında, özellikle son yıllarda öğrenme süreçlerini çeşitli bağlamlarda destekleme potansiyeliyle eğitim bilimleri literatüründe önemli bir konum elde etmiştir. Eğitimde yeni dijital teknolojilerin benimsenmesine paralel olarak, yapay zekâ tabanlı çözümler de öğretim süreçlerinde artan bir yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu kapsamda çevrim içi öğrenme platformları, pedagojik simülasyon yazılımları ve artırılmış gerçeklik uygulamaları gibi yapay zekâ destekli araçlar, modern eğitim ortamlarının önemli bileşenleri arasında yer almaktadır (Yiğit, 2023).

Gelişen teknolojiyle birlikte dünya giderek daha bütünleşik bir yapıya dönüşmüş ve seyahat olgusuna ilişkin deneyim anlayışı farklı bir boyut kazanmıştır. Özellikle günümüzde kullanım alanları hızla genişleyen ve çeşitli işlevleriyle öne çıkan yapay zekâ temelli teknolojiler, gastronomi alanında da önemli bir yer edinmeye başlamıştır (Demirci, vd. 2020). Bir destinasyonun deneyimlenmesinde merkezi bir unsur olan mutfak kültürü, dijitalleşme sürecinin etkilerini belirgin biçimde hissetmektedir. Nitekim bir destinasyona özgü gastronomik çekicilikler, turistler için temel seyahat motivasyonları arasında yer almakta ve bu bağlamda hızla gelişen artırılmış gerçeklik uygulamaları gastronomi sektöründe etkili bir kullanım alanı bulmaktadır (Okutan, 2025).

Alternatif turizm türlerinin son yıllarda önem kazanmasıyla birlikte dönüşüm geçiren turizm sektörü, teknolojik gelişmeler ve ulaşım olanaklarındaki iyileşmelerin etkisiyle, bireylerin farklı kültürleri deneyimleme, yerel gastronomik tatları keşfetme ve özgün kültürel etkileşimlerde bulunma yönündeki motivasyonlarını güçlendirmiştir. Bu eğilim, söz konusu deneyimlere yönelik ziyaretlerin sıklığında belirgin bir artış olarak gözlemlenmektedir (Kargiglioğlu ve Ayyıldız, 2024).

Yiyecek ve içecek imkânları, ülkemizde pek çok şehre değer ve önem kazandıracak potansiyeli barındırmaktadır (Karaçar ve Göker, 2016). Günümüzde turizm sektöründe, özellikle yiyecek ve içecek alanında, yapay zekâ ve yapay zekâ tabanlı uygulamalar, operasyonel süreçlerin etkinliğini artırmak ve iş akışlarını optimize etmek amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu teknolojiler; robotik otomasyon, ileri veri analitiği, kişiselleştirilmiş yiyecek ve içecek üretimi, üç boyutlu (3D) üretim teknikleri, hücresel gıda teknolojileri ve nano ölçekli uygulamalar gibi çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Yiyecek içecek işletmelerinde bu uygulamaların etkisi, genellikle beş ana eksen üzerinde incelenmektedir: ürünlerin sınıflandırılması ve sunumu, tedarik zincirinin planlanması ve yönetimi, çalışan performansının izlenmesi ve organizasyonu, yenilikçi ürün geliştirme süreçleri ile temizlik ve ekipman yönetimi. Bu bağlamda, yapay zekâ yalnızca verimlilik ve maliyet avantajı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda işletmelerin stratejik karar alma süreçlerini de desteklemektedir (Şimşek, 2023).

Yapay zekâ araçları hemen her sektörde giderek daha fazla kabul görmekte ve kullanım alanı bulmaktadır. ChatGPT'nin ortaya çıkışıyla birlikte bu teknolojiler, birçok alanda dikkat çekici dönüşümlere yol açmış ve sürekli gelişen yapılarıyla mevcut iş süreçlerini yeniden şekillendirmeye başlamıştır (Sönmez vd., 2025a). Bu bağlamda yapay zekânın, gastronomi turizmi alanında da önemli değişimlere neden olma potansiyeline sahip olduğu ve sektörün işleyişine yönelik kapsamlı yenilikler sunabileceği değerlendirilmektedir (İbiş, 2025).

Bu kapsamda bu çalışma Gastronomi alanında yapay zekâ uygulamalarına yer verilmiş olup, üretken yapay zekâdan yararlanılmıştır.

## **KAVRAMSAL ÇERÇEVE**

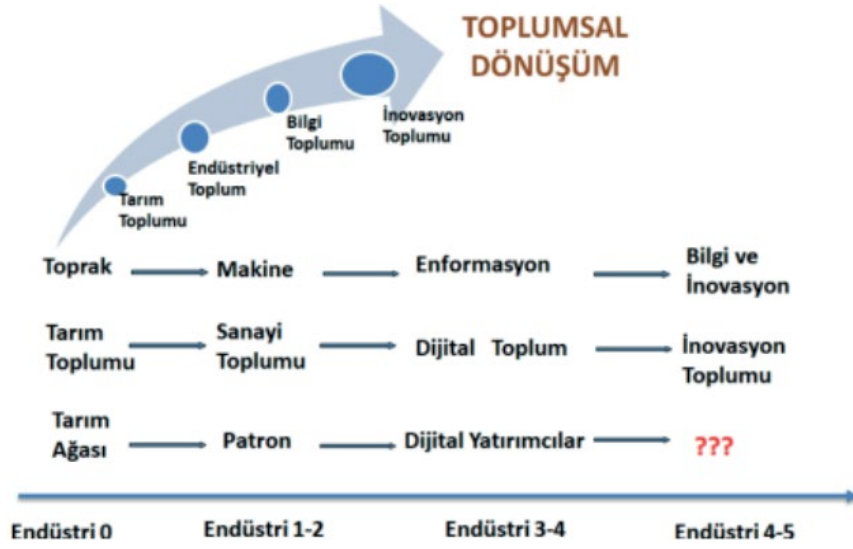
### **1. Gastronomi ve Yapay Zekâ Uygulamaları**

Memnuniyet duygusu yaratmaya yönelik, belirli yaşam biçimlerini yansıtan, değerler ve inançlar oluşturan serbest zaman, bireylerin sağlıklı bir bedene ulaşma ve yüksek yaşam kalitesine sahip olma gibi mutluluk algılarını karşılamada önemli bir araç olarak işlev görmektedir (Karaçar, 2019). Nitekim serbest zamanın artması, teknolojinin gelişmesi ile doğrudan ilişkili olup bireylerde memnuniyet ile ilişkilendirilmektedir. Sanayi Devrimi ile birlikte hız kazanan teknolojik ilerlemeler ve bilgi toplumuna doğru yönelim, üretim, dağıtım, ulaşım ve yönetsel süreçlerde derin ve kapsamlı dönüşümler sağlamaktadır (Karaçar, 2018).

Endüstri 4.0, Almanya'daki akıllı fabrikalarla başlayan ve dördüncü sanayi devrimini temsil eden bir kavram olarak, üretim süreçlerinin dijitalleşmesini ve otomasyonun yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Bu dönüşüm, fiziksel üretim çıktılarının dijital ortama aktarılmasıyla birlikte, kontrol mekanizmalarının da dijital teknolojilerle yürütülmesine olanak tanımaktadır. Özellikle turizm sektörü başta olmak üzere birçok endüstri alanında sürdürülebilirlik, verimlilik ve hizmet kalitesinin artırılmasında önemli katkılar sunmaktadır. Bununla birlikte, kişisel veri güvenliği ve mahremiyet konusunda bazı endişeler gündeme gelmiş olsa da blok zinciri teknolojisi, akıllı sözleşmeler, merkeziyetsiz veri depolama ve erişim hakları yönetimi gibi uygulamalar

sayesinde Endüstri 4.0 tabanlı sistemlerin güvenilirliği artırılmıştır. Fiziksel ve dijital unsurların entegrasyonu, endüstriyel iletişimi güçlendirerek dijital çağın gereklerine uygun bir üretim ve hizmet altyapısı oluşturmuştur (Keskin ve Sezen, 2021).

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde dijitalleşme, yapay zekâ, nesnelerin interneti ve otomasyonun bütünleşmesiyle şekillenen dördüncü sanayi devrimidir. Bu dönüşümün turizm alanındaki yansıması olan Turizm 4.0, akıllı destinasyonlar, veri odaklı karar alma ve kişiselleştirilmiş hizmet anlayışını ifade etmektedir. Benzer biçimde, Gastronomi 4.0 kavramı da yiyecek-ıçecek sektöründe dijital teknolojilerin, akıllı sistemlerin ve otomasyonun bütünleşmesiyle ortaya çıkan yenilikçi bir paradigma olarak değerlendirilmektedir. Günümüz teknoloji çağında, endüstriyel dönüşüm yalnızca üretim süreçlerini değil; turizm, konaklama ve gastronomi gibi hizmet sektörlerini de yeniden biçimlendirmektedir (Keskin ve Sezen, 2021).



**Şekil 1:** Toplumsal Dönüşümler (Şimşek, 2023)

Yapay zekânın turizm sektöründeki en yaygın uygulama alanlarından biri, müşteri hizmetleri ve etkileşim süreçleridir. Sohbet robotları ve sanal asistanlar, turistlerin sık karşılaştığı soruları yanıtlayarak ve rezervasyon işlemlerini kolaylaştırarak önemli bir destek sağlamaktadır. Nitekim yapay zekâ tabanlı bu sistemler, otel rezervasyonları, uçuş bilgileri ve turistik çekim merkezleri hakkında kullanıcılara anlık bilgi sunabilmekte; günün her saatinde erişilebilir olmaları sayesinde müşteri memnuniyetini artırırken çalışanların iş yükünü de azaltmaktadır. Bununla birlikte yapay zekâ, büyük veri analitiği aracılığıyla turist davranışlarını ve tercihlerini inceleyerek daha kişiselleştirilmiş hizmetler üretme kapasitesine sahiptir. Özellikle algoritmalar, turistlerin geçmiş seyahat deneyimlerini analiz ederek gelecekteki seyahatleri için öneriler geliştirebilmekte ve destinasyonların pazarlama stratejilerinin optimize edilmesine katkı sunmaktadır. Yapay zekâ destekli tahmin modellerinin, turistlerin seyahat alışkanlıklarını öngörerek destinasyonların yeni pazarlama kampanyaları oluşturmasına ve yenilikçi ürünler geliştirmesine imkân tanıdığı görülmektedir. Bu gelişmeler, destinasyonlarda turist beklentilerine daha uygun hizmetler sunulmasını kolaylaştırmakta ve ziyaretçi deneyiminin zenginleşmesine katkıda bulunmaktadır. Dolayısıyla yapay zekânın, destinasyon yöneticileri ve pazarlamacıları için önemli fırsatlar sunduğu ifade edilebilir (İbiş, 2025).

Diğer yandan Yapay zekâ, insan düşünce süreçlerini ve bilişsel yetilerini taklit ederek makineler aracılığıyla çeşitli görevlerin yerine getirilmesini mümkün kılan bir bilgi

işlem disiplindir. Günümüzde tıp, eğitim, işletme, muhasebe, finans, gastronomi ve telekomünikasyon gibi farklı alanlarda geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Özellikle 21. yüzyıl, teknolojik ilerlemelerin ivme kazandığı ve pek çok sektörde dikkat çekici yeniliklerin ortaya çıktığı bir dönem olarak öne çıkmaktadır. Bu gelişim sürecinde gastronomi bilimi de önemli bir dönüşüm yaşamış; yapay zekâ, kişiye özgü tariflerin oluşturulması ve besin değerlerinin ayrıntılı analiz edilmesi noktasında etkin bir araç haline gelmiştir (Gürbüz, 2025).

Gastronomi 4.0 çerçevesinde değerlendirilen uygulamalar, doğrudan veya dolaylı biçimde “büyük veri”, “nesnelerin interneti” ve “yapay zekâ” teknolojilerinin etkileşimi üzerine inşa edilmektedir. Nesnelerin interneti, fiziksel ve dijital nesnelerin internet ağı üzerinden birbirine bağlanmasını sağlayan ve asgari insan müdahalesi ile veri üretimi, depolaması ve paylaşımına imkân tanıyan akıllı sistemler bütününe ifade etmektedir. Bu veri üretimi ve birikimi, büyük veri kavramının ortaya çıkışında merkezi bir rol oynamaktadır. Büyük veri, tek bir bilgisayarın işleme kapasitesini aşan, sürekli büyüyen ve heterojen yapıya sahip veri kümelerini tanımlamak için kullanılan bir terim olup, mevcut algoritmaların yönetim ve analiz sınırlarının ötesindeki bilgileri kapsamaktadır. Bu devasa veri kümelerinin anlamlı ve kullanılabilir hale getirilmesi, insan bilişsel süreçlerinin formüle edilerek bilgisayar ve mühendislik sistemlerine uygulanmasını amaçlayan yapay zekâ disiplininin temel hedefi olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla nesnelerin interneti, büyük veri ve yapay zekâ, birbirini besleyen ve güçlendiren bir ekosistem oluşturarak, teknolojik yeniliklerin farklı endüstrilerde benimsenmesini ve yaygınlaşmasını mümkün kılmaktadır (Kızıldaş, 2024).

Aynı zamanda gıda güvenliğinin sağlanması ve yüksek kalite standartlarının sürdürülebilmesi için sektörün çeşitli yapısal ve operasyonel engelleri aşması gerekmektedir. Son yıllarda ise bu zorlukların giderilmesine yönelik olarak yapay zekâ ve makine öğrenimi temelli teknolojiler önemli ve yenilikçi çözüm potansiyelleri sunmaktadır (Chhetri 2024; Gülten ve Erol, 2024).

Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, yeni nesil dijital tüketicilerin özelliklerini doğru biçimde analiz etmek ve bu kitleye bütüncül bir dijital müşteri deneyimi sunmak, restoran işletmelerinin gelecekte rekabet avantajı elde edebilmeleri açısından kritik bir gereklilik hâline gelmiştir. Her ne kadar günümüzde restoran tercihlerini belirleyen temel unsurlar menü çeşitliliği, işletmenin konumu ve fiyat düzeyi olsa da, yakın gelecekte dijital teknolojilerin, özellikle yeni nesil tüketicilerin beklentilerini karşılamada belirleyici bir rol üstleneceği öngörülmektedir. Nitekim teknolojik uygulamaların hayata geçirilmesiyle birlikte müşterilerin restoranı ziyaret etme oranlarında yaklaşık %6, ortalama harcama tutarlarında ise %20 civarında artış gözlemlendiğini ortaya koyan araştırmalar, bu dönüşümü şimdiden somut biçimde desteklemektedir (Davutoğlu ve Yıldız, 2020).

### **1.1 Artırılmış Gerçeklik**

Artırılmış gerçeklik (Augmented Reality – AR), genellikle üç temel özellik çerçevesinde tanımlanmaktadır: (1) gerçek ve sanal öğelerin entegrasyonu, (2) gerçek zamanlı ve etkileşimli deneyim sunma kapasitesi ve (3) üç boyutlu biçimde bilgi veya görselin kaydedilmesi. Bu bağlamda AR, gerçek ve sanal ortamlar arasında etkileşimli bir ara alan veya köprü işlevi gören bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir (Styliaras, 2022).

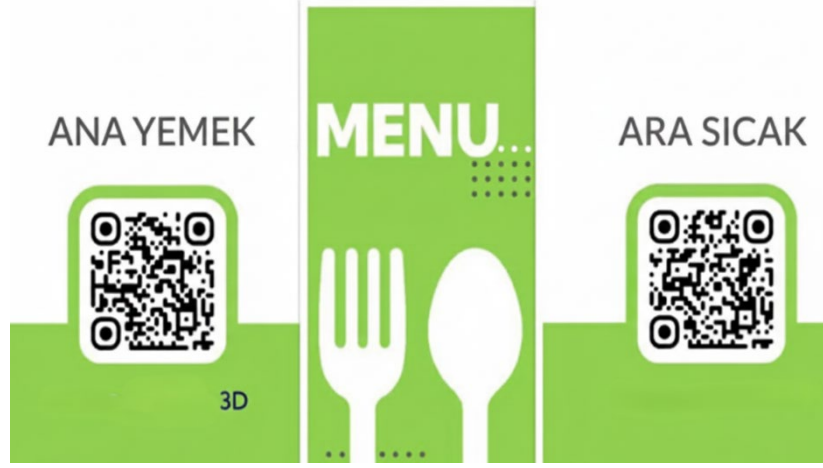
Teknoloji ve gastronominin kesişimi yeni bir olgu olmamakla birlikte, artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik alanlarındaki hızlı gelişmeler, bu teknolojilerin gıda

endüstrisi tarafından benimsenmesini hızlandırmıştır. Tarihsel olarak yemek yeme deneyimi, tat alma duyusunun ötesinde görme, koklama ve dokunma gibi birden fazla duyuyu kapsayan, her zaman sürükleyici bir süreç olmuştur. Dijital yeniliklerin ortaya çıkmasıyla birlikte, yemeklerin sunumu ve hikâye anlatımı önemli ölçüde gelişmiş, genel yemek deneyimini iyileştirmiştir. Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojileri, tüketicilerin yalnızca yiyecek tüketmekten öte deneyimler aradığı deneyim ekonomisinin yükselişiyle birlikte önem kazanmış, katılımcı, etkileşimli ve unutulmaz deneyimler yaratmayı mümkün kılmıştır. Konaklama ve restoran sektörleri bu dönüşümü dikkate alarak, modern tüketici beklentilerini karşılayan özgün deneyimler sunmak amacıyla artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojilerini entegre etmiştir. Gıda sektöründe artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojilerinin benimsenmesi, dijital teknolojilerdeki ilerlemelerle paralel olarak gelişen, kademeli ancak dönüştürücü bir süreç olarak ortaya çıkmıştır. Başlangıçta öncelikle oyun ve eğlence amaçlı kullanılan bu teknolojiler, günümüzde gastronomi alanında da kritik araçlar haline gelmiş ve tüketicilerin yiyeceklerle etkileşim biçimlerinde önemli bir dönüşümü tetiklemiştir (Gupta vd., 2025).

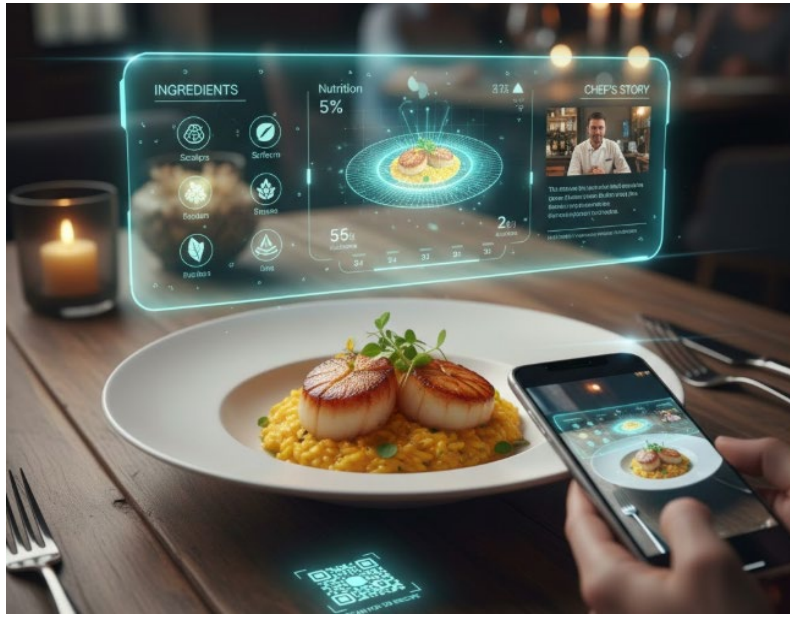
Günümüzde artırılmış gerçeklik (AR) simülasyonları, restoranlar da dahil olmak üzere pek çok sektörde uygulama bulmakta olup, konuklara yiyeceklerin hazırlanma sürecinde etkileşimli ve eğlenceli deneyimler sunmaktadır. Yiyecek ve içecek işletmeleri için hızla değişen ve gelişen pazarda rekabet avantajı sağlamak amacıyla, teknolojiyi yenilikçi bir yaklaşımla takip etmek önemli bir stratejik gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Müşterilerin sipariş verme aşamasından yiyeceklerin hazırlanması ve sunumuna kadar olan süreçte teknolojik yenilikler, artırılmış gerçeklik uygulamaları aracılığıyla deneyimlerin zenginleştirilmesi ve kişiselleştirilmesi açısından etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. İşletmeler, QR kodlar aracılığıyla menülerine AR uygulamalarını entegre ederek, yiyeceklerin içerdiği malzemeler, kalori ve besin değerleri gibi niceliksel bilgileri tüketicilere sunabilmektedir. Örneğin, Domino's Pizza tarafından geliştirilen "Domino's Pizza Hero AR" uygulaması, kullanıcıların sanal ortamda pizza hazırlamalarına, diğer oyuncularla rekabet etmelerine ve oluşturdukları pizzayı Domino's restoranlarından sipariş edebilmelerine imkân tanımaktadır. Benzer şekilde, Moskova'da faaliyet gösteren "White Rabbit" restoranında Şef Vladimir Mukhin, Rus mutfağına ait ürünleri sunarken, akıllı telefonlar aracılığıyla artırılmış gerçeklik deneyimleri ekleyerek müşterilerine eşsiz ve etkileşimli bir gastronomik deneyim sunmaktadır (Aydın ve Çakır, 2022).



**Şekil 1:** Yemek menüsünde gurunin tasviri (Amin vd., 2023)



**Şekil 2:** Arttırılmış Gerçeklikle Önerilen Model (Amin vd., 2023)



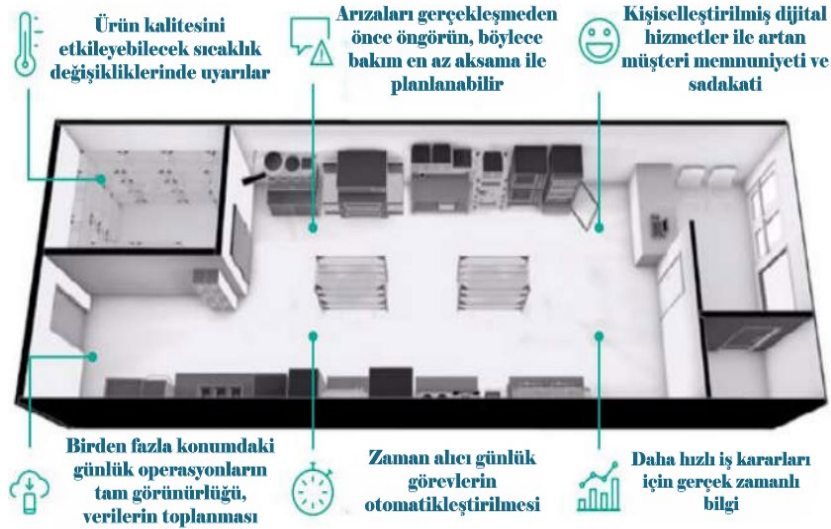
**Şekil 3:** Arttırılmış Gerçeklik ve Gastronomi ilişkisi Gemini tarafından oluşturulan görsel

## 1.2 Nesnelerin İnterneti

IoT (Internet of Things – Nesnelerin İnterneti), nesnelerin dijital ortamda birbirine bağlanmasını ve bu bağlantı üzerinden kontrol, veri iletimi ve bilgi paylaşımı gibi temel işlevlerin gerçekleştirilmesini sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır. İnternet, artık yalnızca bir iletişim altyapısı olarak değil, nesnelerle etkileşim içinde var olan bir sistem olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda IoT, nesnelerin Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID), Kablosuz Sensör Ağları, Bluetooth, Yakın Alan İletişimi (NFC), Uzun Süreli Evrim (LTE) ve diğer akıllı iletişim teknolojileri aracılığıyla internete erişimini ifade etmektedir. Dolayısıyla IoT, temel olarak “internet üzerinden birbirine bağlanabilen nesneler ve sistemler ağı” olarak tanımlanabilir. Kavram ilk kez 1990’ların başında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü Auto-ID Laboratuvarları’nda ortaya atılmış ve ilk aktif uygulama 1999 yılında “Trojan Room Coffee Pot” projesi ile hayata geçirilmiştir. Aynı yıl, dünyanın ilk internet kontrollü cihazı olarak uzaktan açılabilen bir ekmek kızartma makinesi geliştirilmiştir(Erbil, 2023).

Dijital gastronomi bağlamında da değerlendirilebilecek bu uygulamalar, mutfak ve gıda tedarik zincirinde sürdürülebilir gelişmeleri destekleyen araçlar olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, meyve ve sebzeler besleyici özellikleri ile insan sağlığına çeşitli katkılar sağlamakla birlikte, bozulmaya karşı oldukça hassas ürünlerdir. Çiftlikten sofraya taşınan bu ürünlerde kalite kaybını en aza indirmek amacıyla uzun yıllardır soğuk zincir teknolojileri uygulanmakta; ancak paketlenme, ön soğutma, taşıma ve depolama süreçlerinde hâlen önemli düzeyde kayıplar meydana gelmektedir. IoT uygulamaları, hasat sonrası dönemde ürünlerin kalite gelişimini izlemeye ve kontrol etmeye imkân tanıyan yeni teknolojik çözümler sunmaktadır. Bu sayede, tedarik zincirinde taze ürünlerin kalitesini etkileyebilecek olası sorunların erken teşhisi ve önleyici tedbirlerin alınması mümkün hâle gelmektedir (Güner ve Aydoğdu, 2022).

Nesnelerin İnterneti (IoT), bu işlevleri yerine getirmenin ötesine geçerek çok daha kapsamlı olanaklar sunmaktadır. Günümüzde restoran işletmeleri, pişirme, temizlik veya depolama süreçlerinde kullanılan ekipmanları izlemek ve yönetmek amacıyla IoT tabanlı sistemlerden yararlanabilmektedir. Özellikle fritöz, ızgara, fırın gibi pişirme ekipmanlarının performansını ölçen ve karar verme mekanizmalarını içeren akıllı mutfak teknolojileri yaygınlaşmıştır. Bu sistemler, devre kartları aracılığıyla ekipmanın belirli işlemleri gerçekleştirmesine yönelik komutlar iletebilmekte; örneğin yağın filtrelenmesi gibi otomatik süreçleri başlatmakta veya sıcaklık gibi kritik parametreleri gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir(Pandharpurkar, 2018)



**Şekil 4:** IoT özellikli mutfağın temel unsurları(Pandharpurkar, 2018)



**Şekil 5:** Gemini tarafından gerçekleştirilen (IoT) temalı görsel

### 1.3 Robot Şefler ve Menü

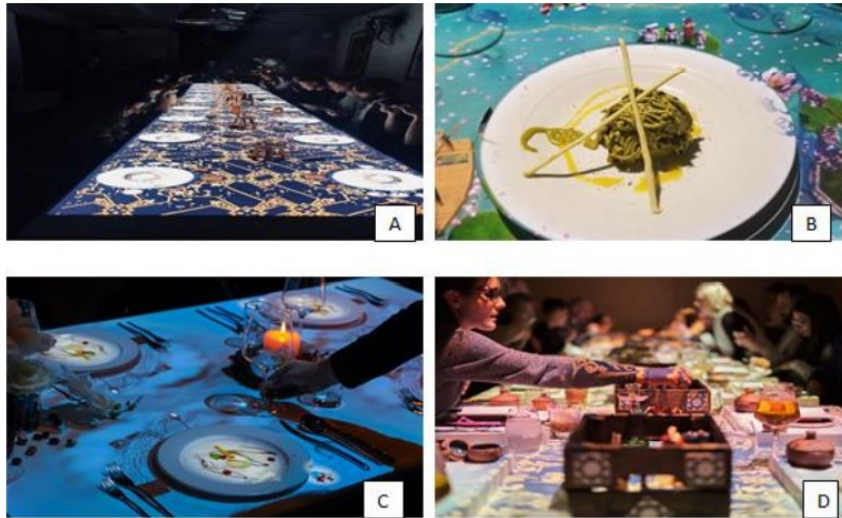
Robotlar; insanların zorlandığı, sağlık açısından risk taşıyan ya da belirli bir döngü içinde tekrarlanan işleri yerine getirmek amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Günümüzde robotik sistemler, ağır nesnelerin kaldırılması, boya ve kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesi, kimyasal maddelerin taşınması ve kesintisiz şekilde montaj faaliyetlerinin yürütülmesi gibi çeşitli görevleri etkin bir biçimde üstlenebilmektedir. Endüstriyel robotlar ise çalışma prensipleri ve yapısal özelliklerine göre Kartezyen, silindirik, polar, mafsallı ve SCARA olmak üzere beş temel grupta sınıflandırılmaktadır. Kartezyen robotlar, portal robot olarak da adlandırılmakta olup üç prizmatik ekleme dayalı sınırlı bir hareket yapısına sahiptir. Çalışma alanları, eksenlerin doğrusal biçimde kesişmesi sonucunda dikdörtgen bir form kazanmaktadır. Silindirik robotlar, Kartezyen robotlarda bulunan prizmatik eklemlerden birinin döner bir ekleme değiştirilmesiyle oluşmakta ve hareketleri silindirik koordinat sistemi çerçevesinde tanımlanmaktadır. Polar ya da diğer adıyla küresel robotlar, tabana bir kıvrılma ekleme ile iki döner ve bir doğrusal eklemin bağlanmasıyla oluşturulmakta; eksenlerin kombinasyonu kutupsal koordinat sistemine uygun, küresel biçimli bir çalışma alanı meydana getirmektedir. Mafsallı robotlar, döner mafsallar üzerine inşa edilmiş olup kolun tabana bir bağlantı ekleme ile tutturulduğu, eklemler arasındaki bağlantıların ise döner hareketle işlediği bir yapıya sahiptir. Her ekleme, bir eksen olarak tanımlanmakta ve sisteme ek bir serbestlik derecesi kazandırmaktadır. SCARA robotlar ise “Seçici Uyumluluklu Mafsallı Robot Kolu” olarak adlandırılmakta olup iki paralel döner bağlantıya sahip özel bir tasarıma sahiptir. Özellikle montaj uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilen SCARA robotlar temel olarak silindirik bir yapı karakteri göstermektedir (Uzan ve Sevimli, 2020).

Robotların insan işgücü azalttığına yönelik durumlar söz konusudur. Nitekim Turizm, büyük ölçüde emek yoğun bir hizmet sektörü olarak tanımlanmakta olup, sektördeki en kritik unsur olarak kabul edilmektedir. Yapay zekânın menü planlama süreçlerinde yenilikçi bir araç olarak kullanılması, gastronomi sektöründe hem operasyonel

verimliliği hem de müşteri memnuniyetini artırmakta; aynı zamanda sürdürülebilir üretim ve tüketim anlayışını desteklemektedir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak yiyecek-içecek üretiminde robotik uygulamaların kullanımına yönelik ilk örnek 2009 yılında Okonomiyaki hazırlayan robot şef ile ortaya çıkmış; bu gelişmeyi pizza pişiren, kahve hazırlayan, barbekü yapan ve omlet üreten, kısmen yapay zekâ ile entegre edilmiş çeşitli robot şef modelleri izlemiştir (Gürbüz, 2025).

Chatbotlar, müşteriler ile turizm ve seyahat hizmetleri sağlayıcıları arasında çevrimiçi etkileşimi mümkün kılan yapay zekâ temelli dijital araçlardır. Bu sistemler, kullanıcıların doğal dil işleme teknolojileri aracılığıyla dijital asistanlarla etkileşime girerek seyahatle ilgili bilgi taleplerini karşılamalarına ve rezervasyon süreçlerini yürütmelerine imkân tanımaktadır (Öztürk, 2020).

Aynı zamanda yiyecek ve içecek işletmelerinde menü sunumuna yönelik teknolojik dönüşümün özellikle tablet menüler ve QR kod tabanlı dijital menüler üzerinden şekillendiği görülmektedir. Bu dijital menü türleri, geleneksel basılı menülere kıyasla çok yönlü işlevsel üstünlükler sunmaktadır. Tablet menüler başta olmak üzere dijital menüler; ürün kategorilerine sistematik ve hızlı erişim imkânı sağlaması, her bir ürüne ilişkin yüksek çözünürlüklü görseller sunması, yemek içerikleri, pişirme teknikleri ve besin değerlerine ilişkin ayrıntılı açıklamalar içermesi ve söz konusu bilgilerin çok dilli çeviri seçenekleriyle desteklenebilmesi açısından önemli avantajlar yaratmaktadır. Ayrıca dijital menü sistemlerinin siparişleri doğrudan mutfak bölümüne iletmesi, sipariş süreçlerinde ortaya çıkabilecek hataların minimize edilmesine katkıda bulunmakta; ödeme prosedürlerinde kullanıcıya farklı alternatifler sunmakta ve menü güncellemelerinin düşük maliyetle ve hızlı biçimde gerçekleştirilebilmesine olanak tanımaktadır. QR kod tabanlı menüler ise, tablet menülerin sunduğu tüm işlevsel özelliklere ek olarak, özellikle Covid-19 pandemisi sonrasında temas gereksinimini azaltması ve hijyen standartlarını yükseltmesi nedeniyle hızla yaygınlaşmıştır. Mobil cihazlar aracılığıyla erişilen QR kod menüler, fiziksel materyal kullanımını ortadan kaldırarak hem sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu bir yaklaşım sunmakta hem de daha güvenli, temassız ve kullanıcı dostu bir gastronomik deneyim ortaya koymaktadır (Kızıldaş, 2024).



**Şekil 6:** Animasyonlu Masalar (Öztürk, 2020)



**Şekil 7:** Robotların Kullanımı (Öztürk, 2020)



**Şekil 8:** Robotların Mutfakta Kullanımına Yönelik Gemini Tarafından Oluşturulan Görsel

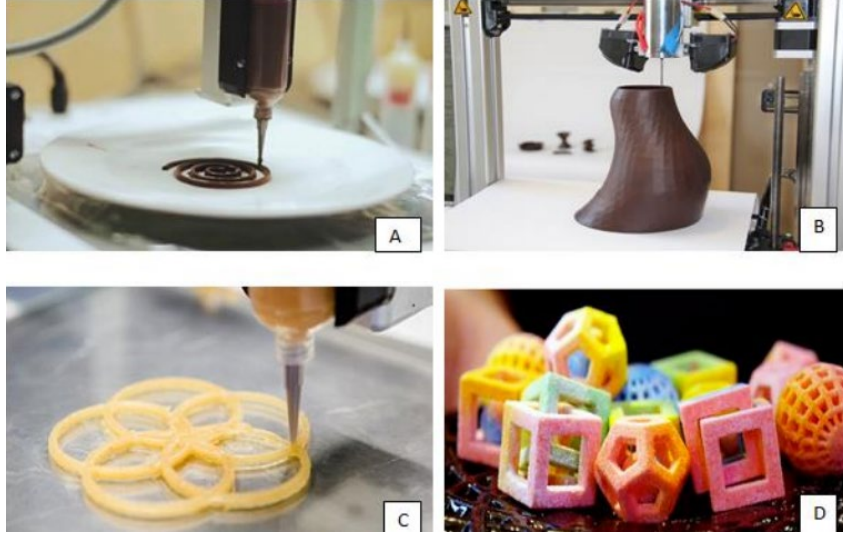


**Şekil 9:** Robotların Mutfakta Kullanımına Yönelik Gemini Tarafından Oluşturulan Görsel

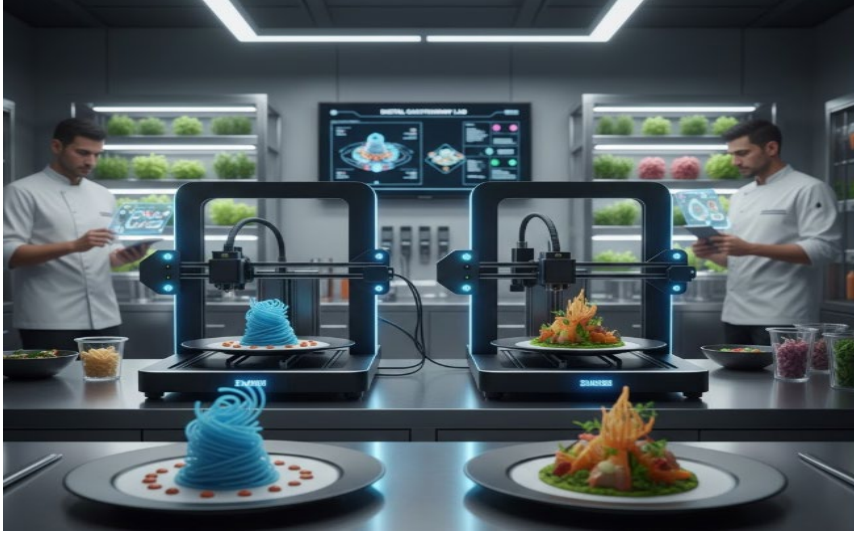
#### 1.4 3D Yazıcılar

3D yazıcı teknolojilerinin gelişimi ve yaygınlaşması, gastronomi alanında üretim süreçlerinin yeniden şekillenmesini mümkün kılmıştır. Bu teknoloji sayesinde yiyecekler, estetik ve karmaşık formlarda tasarlanıp üretilmekte, gastronomi deneyimi görsellik ve lezzeti bir araya getiren multidisipliner bir sanat formuna dönüşmektedir. Robotik sistemlerin entegrasyonu ve otomasyon teknolojilerindeki ilerlemeler, daha önce geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilemeyen yaratıcı ve görsel açıdan çarpıcı yiyeceklerin hazırlanmasını sağlamaktadır. Gelecekte, gelişmiş robotik üretim kapasitesi ile yiyeceklerin tamamının robotlar tarafından üretilmesi de mümkün olabilecektir. Ayrıca, pişirme süreçlerinde otomasyonun sağladığı hassas sıcaklık ve süre kontrolü, ürünlerin tutarlılığını artırmakta ve zaman kayıplarını minimize etmektedir. Bu bağlamda, teknoloji destekli gastronomi uygulamaları hem estetik hem de fonksiyonel açıdan yenilikçi ve sürdürülebilir üretim modelleri sunmaktadır (Öztürk, 2020).

3D yazıcı teknolojileri, yiyeceklerin daha önce mümkün olmayan karmaşık ve özgün formlarda hazırlanmasına imkân tanımaktadır. Bu durum, gastronomik ürünlere estetik bir değer ve görsel çeşitlilik kazandırmakta, tüketici deneyimini zenginleştirmektedir. Ayrıca, otomasyon sistemlerinin entegrasyonu, ürünlerin tat ve görünümlerinin tutarlılıkla yeniden üretilmesini kolaylaştırmakta ve standardizasyonu sağlamaktadır (Öztürk, 2020).



Şekil 10: 3D Yazı ile Uygulamalar (Öztürk, 2020)



**Şekil 11:** 3D Yazının Mutfakta Kullanımına Yönelik Gemini Tarafından Oluşturulan Görsel

## SONUÇ

Kent yaşamının giderek dijitalleşmesi, kullanıcıların kamusal açık alanlara ilişkin beklenti ve tercihlerini köklü biçimde dönüştürmektedir. Özellikle rekreasyonel mekânlarda bireysel deneyimlere yönelik talepler, yalnızca fiziksel faydalarla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda bilişsel, sosyal, psikolojik ve dijital etkileşim boyutlarını da kapsamaktadır (Sönmez vd., 2025b, Erol, 2022). Gastronomi turizmi, bireylerin yeni yiyecek ve içecek deneyimlerini keşfetme arzusuyla yönlendirilen seyahat motivasyonlarını tetikleyen ve seyahat davranışlarının şekillenmesinde belirleyici bir rol oynayan bir turizm biçimi olarak tanımlanmakta olup, aynı zamanda gastronomik bir hareketlilik olarak kabul edilmektedir (Kargiglioğlu ve Akbaba, 2016).

Bununla birlikte gelişen teknoloji, Yapay Zekâ ve makine öğrenimi teknolojilerinin gastronomi sektörüne entegrasyonu, yalnızca operasyonel süreçleri dönüştürmekle kalmayıp, aynı zamanda sektörün etik, ekonomik, sosyal ve kültürel boyutlarını da yeniden şekillendirmektedir. Bu teknolojiler; stok yönetimi, menü planlama, pişirme süreçleri ve müşteri hizmetleri gibi alanlarda verimliliği artırarak hata payını azaltmakta ve müşteri deneyimlerini kişiselleştirmektedir. Bununla birlikte, şeflik sanatının yaratıcılığının mekanikleşme riski, gastronomide özgünlüğün korunması açısından önemli bir tartışma konusudur (Çekiç ve Bayar, 2025).

Çalışma kapsamında mutfak ekipmanlarının, müşteri potansiyeli, istihdam alanlarının evrildiğini görmüş bulunmaktayız. Elbette bu durum teknoloji ile entegre olarak hareket etmektedir. Teknolojinin mutfak alanında bu denli değişim yaşaması arz talep ilişkisini de farklı bir boyuta taşıdığı düşünülmektedir. Nitekim gastronomi turist kimliklerinde yeni ürünleri deneyimlemenin yanı sıra keşifsel yaklaşımla farklı duygusal motivasyonları da görme ihtiyacı yaşadığı düşünülmektedir. Her ne kadar sınırlı başlıklar altında konular işlenmiş olsa da nano teknoloji, hücre bazlı gıdalar ve tarımsal anlamda da inovatif yaklaşımlar olduğu görülmektedir. Öncelikle bu inovatif durumların tartışılması eksikliklerin giderilmesi disiplinlerarası çalışmalarla mümkün olduğu düşünülmektedir. Gastronomi deneyimi insanlarda tokluk hissiyatından ziyade merak, hissetme, eğlenme ve öğrenme ihtiyaçlarına da karşılık geldiği görülmektedir. Teknolojinin gelişiminde rol oynayan merak duygusu farklı üretim faaliyetlerinden, tüketim süreçlerine kadar önemli gelişmelere fayda sağlamaktadır. Aynı zamanda bu çalışma, yiyecek ve içecek hizmetlerinde teknolojik

dönüşümlerin çok boyutlu etkilerini hem akademik literatür hem de sektörel uygulama perspektifleri bağlamında bütüncül bir şekilde değerlendirmekte ve dijitalleşmenin, uygulamaları, yönetim süreçleri ile sektörel uygulamalar üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Teknolojik gelişmeler, yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda tüketici deneyimlerinin yeniden yapılandırılmasına, yenilikçi iş modellerinin geliştirilmesine ve tedarik zinciri ile veri yönetimi yaklaşımlarının evrimleşmesine de imkân tanımaktadır. Bu bağlamda;

- Üretim alanlarını yeni nesil teknolojik aletlerle donatılması,
- Sürdürülebilirlik açısından müfredatlarda yer alması,
- Düzenli etkinlikler yapılması,
- Teknofest gibi organizasyonlarda önemli yer bulması,
- Ar-ge çalışmaları yapılması,
- İyi ve kötü yönlerinin uzman kişilerce tartışılması

Bu çalışma için önerilmektedir. Çalışma arşiv-doküman taraması ile gerçekleştirilmiş olup, sınırlılıkları mevcuttur. Bu kapsam da çalışma üretim aşamasından çok süreçlere odaklanmıştır. Gelecek çalışmalarda yapay zekanın gastronomi ürünlerinin tarihsel süreçlerini ve yemek hikayelerine de ele alması önerilmektedir.

## KAYNAKÇA

- Amin, S. N., Shivakumara, P., Jun, T. X., Chong, K. Y., Zan, D. L. L., & Rahavendra, R. (2023). An augmented reality-based approach for designing interactive food menu of restaurant using android. In artificial intelligence and applications (Vol. 1, No. 1, pp. 26-34).
- Aniket Pandharpurkar. 2018. "The internet of things (iot) in the restaurant industry", International Journal of Development Research, 8, (08), 22548-22552.
- Aydın, Ş., & Çakır, M. U. (2022). Gastronomi ve dijitalleşme. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi, 12(4), 2143-2159.
- Chhetri, K. B. (2024). Applications of artificial intelligence and machine learning in food quality control and safety assessment. Food Engineering Reviews, 16(1), 1-21.
- Çekiç, İ., & Bayar, Ç. (2025) Applications Of Artificial Intelligence And Machine Learning In Gastronomy: The Rise Of The Smart Kitchen Yapay Zekâ Ve Makine Öğreniminin Gastronomide Uygulamaları: Akıllı Mutfağın Yükselişi.
- Davutoğlu, N. A. C. İ., & Yıldız, E. (2020). Turizm 4.0'dan gastronomi 4.0'a giden yolda: Geleceğin restoranları ve yönetimi. Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi, 8(109).
- Demirci, B., Sarıkaya, G. S., & Erol, E. (2020). Türkiye'de gastronomi ve mutfak sanatları eğitiminin değerlendirilmesi. Türk Turizm Araştırmaları Dergisi, 4(4), 3311-3324.
- Erbil, K. (2023). Gastronomide dijitalleşme, IoT uygulamalarının kullanılması ve gastroteknolojinin kavramsal çerçevede incelenmesi. Journal of tourism research institute, 4(1), 39-47.
- Erol, E. (2022). Benlik kurgusu teorisi kapsamında örgütsel bağlılık ve iş performansı etkisi: Yiyecek içecek işletmelerinde bir inceleme. İşletme Araştırmaları Dergisi, 14(3), 2242-2252.
- Gupta, Das, Islam, Gogoi, and Daolagupu (2025) state that "AR and VR applications in gastronomy can transform consumer experiences by enhancing engagement and immersion" (ss. 626-639).
- Gülten, S. & Erol, E. (2024). Gastronomi Turizmi. In: Yazıt, H. & Gençer, K. (eds.), Gastronomi ve Mutfak Sanatları Üzerine Güncel Araştırmalar- II. Özgür Yayınları. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub439.c1909>
- Güner, D., & Aydoğdu, A. (2022). Gastronomi alanındaki teknolojik gelişmelere yönelik bir değerlendirme: Dijital gastronomi. Aydın Gastronomy, 6(1), 17-28.


- Gürbüz, S. (2025) Moleküler Gastronomi Tarifi Oluşturmada Yapay Zekânın Kullanımı: Güçlü ve Zayıf Yönleri. *Bulanık MYO Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(1), 21-34.
- İbiş, S. (2025). Yapay Zekâ Teknolojilerinin Gastronomi Turizminde Kullanımı: ChatGPT Örneği. *Güncel Turizm Araştırmaları Dergisi*, 9(1), 109-131.
- Karaçar, E., & Göker, G. (2016). Turizm Destinasyon Çekiciliği Unsuru Olarak Yiyecek İçecek Hizmetleri Üzerine Bir İnceleme, Çankırı Örneği. *Journal Of Recreation And Tourism Research*, 3(2), 73-76.
- Karaçar, E. (2018). Turizm lisans öğrencilerinin girişimcilik eğilimleri-Sinop Üniversitesi örneği. *Journal of Tourism & Gastronomy Studies*, 6(2), 602-621.
- Karaçar, E. (2019). Spor Fakültesinde Okuyan Öğrencilerin Rekreatif Faaliyetlere Karşı İlgi Ve Mutluluk Düzeyleri: Sinop Üniversitesi Örneği. *Spor ve Rekreasyon Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 58-70.
- Kargiglioğlu, Ş., & Akbaba, A. (2016). Yerli gastroturistlerin eğitim seviyeleri ve yaş gruplarına göre destinasyondaki gastronomi turizmi etkinliklerine katılımları: Gaziantep'i ziyaret eden gastroturistler üzerine bir araştırma. *Journal of Tourism & Gastronomy Studies*, 4(1), 87-95.
- Kargiglioğlu, Ş., & Ayyıldız, S. (2024). Mutfak Kültürünün Sürdürülebilirliği Bakımından Yöresel Yiyeceklerin Menülerde Yer Alma Düzeyi: Sinop Ölçeğinde Bir Araştırma. *The Journal of Academic Social Science*, 86(86), 346-355.
- Keskin, E., & Sezen, N. (2021). Gastronomi 4.0 üzerine kavramsal bir araştırma. *Gastroia: Journal of Gastronomy And Travel Research*, 5(2), 177-198.
- Kızıltaş, M. Ç. (2024). Endüstri 4.0'ın gastronomi sektörüne yansımaları (Reflections of Industry 4.0 on the gastronomy sector). *Journal of Gastronomy Hospitality and Travel*, 7(3), 779-790.
- Okutan, Y. A. (2025). Gastronomi Alanında Deneyimsel Pazarlama ve Artırılmış Gerçeklik Kullanımının Deneyim Değeri Açısından İncelenmesi. *Journal of Applied Tourism Research*, 6(1), 41-53.
- Öztürk, H. M. (2020). Teknolojik gelişmeler ve gastronomi alanına yansımaları: Gastronomi 4.0. *Güncel Turizm Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 222-239.
- Sönmez, N.K., Ünal, A., Karaçar, E., Çilesiz, E. (2025a) "Impact of Artificial Intelligence Models on Recreation: Comparative Analysis of ChatGPT and Gemini", *Technische Sicherheit*, 25 (6) pp. 635-646
- Sönmez, N. K., Bilgiçli, İ., Çilesiz, E., Karaçar, E., & Karaköse, D. (2025b). AI-Supported Participant Experience Management in Recreational Areas: The Case of Smart Parks. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 29(1), 312-323.
- Styliaras, G. D. (2021). Augmented reality in food promotion and analysis: Review and potentials. *Digital*, 1(4), 216-240.
- Şahin, H., & Hamarat, H. (2023). Yeni nesil gastronomi deneyimleri dijital teknolojilerin gastronomi sektöründe kullanımı ve inovasyonları. *Turizmde Dijital Gelecek: Seyahat, Konaklama, Rehberlik ve Gastronomide Teknolojik Trendler ve Yenilikçi Uygulamalar*, 184-196.
- Şimşek, M. (2023). Turizmde Yapay Zekâ. In: İ. Kalemci Tüzün & M. Öksüz (Eds.), *Turizm Alanında Çok Yönlü Araştırmalar II* (pp.141-156), Gaziantep: Özgür Yayınları.
- Uzan, Ş. B., & Sevimli, Y. (2020). Gastronomideki robotik uygulamalar ve yapay zekâ. *Tourism and Recreation*, 2(2), 46-58.
- Yiğit, S. (2023). Yapay Zekâ Gastronomi Eğitimine Katkı Sunabilir Mi? ChatGPT Örneği (Can Artificial Intelligence Contribute to Gastronomy Education? Example of ChatGPT). *Journal of Tourism & Gastronomy Studies*, 11(3), 1970-1982.

## BÖLÜM 7

# ÜNİVERSİTE KAMPÜSLERİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İÇİN NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) VE YAPAY ZEKÂ TABANLI ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

*Ahmet KARAOĞLU*

*Dr. Öğr. Üyesi, Sinop Üniversitesi, akaraoglu@sinop.edu.tr*

 0000-0002-7507-3031

### **Yeşil Kampüs Vizyonu ve Enerji Dönüşümü**

Geleneksel kampüslerden akıllı kampüslere dönüşüm, günümüz yüksek öğretimindeki en önemli sürdürülebilirlik girişimlerinden birini temsil etmektedir. Bu kapsamlı değişim, yalnızca teknolojik yükseltmeleri değil, aynı zamanda eğitim kurumlarının operasyonel mükemmelliği sürdürürken çevresel yönetim için nasıl model teşkil edebileceğine dair temel bir yeniden tasavvuru da içermektedir. Son uygulamalardan elde edilen kanıtlar, akıllı kampüs girişimlerinin farklı kurumsal bağlamlarda önemli enerji verimliliği iyileştirmeleri ve karbon ayak izi azaltımları sağladığını göstermektedir.

### **Akıllı Kampüs Teknoloji Ekosistemi**

Akıllı kampüs uygulamaları, enerji performansını optimize etmek için sinerjik olarak çalışan dört temel teknoloji alanını entegre eder:

Donanım Altyapısının Modernizasyonu, enerji dönüşümünün temelini oluşturur. LED aydınlatma iyileştirmeleri, aydınlatma sistemlerinde sürekli olarak %66-67 enerji azaltımı sağlarken, 25 SEER derecesine sahip yüksek verimli HVAC sistemleri, operasyonel dönemlerde %52 enerji tasarrufu sunar. Bu donanım yükseltmeleri, nispeten basit uygulama yollarıyla anında, ölçülebilir iyileştirmeler sağlar (Patil & Tanavade, 2024).

Akıllı Kontrol Sistemleri, enerji tüketimini dinamik olarak optimize etmek için gelişmiş algoritmaları kullanır. Örüntü Tanıma Adaptif Kontrol (PRAC) ve Model Tahminsel Kontrol (MPC) sistemleri %20-30 HVAC enerji azaltımı sağlarken, makine öğrenimi algoritmaları enerji tüketim modellerini tahmin etmede %94-96 doğruluk sergiler (Petrie vd., 2018; Scott vd., 2021). Bu sistemler, reaktif yerine proaktif enerji yönetimini mümkün kılar.

IoT İzleme ve Analitik Platformları, bilinçli karar verme için veri temelini sağlar. Kablosuz sensör ağları, optimize edilmiş zamanlama yoluyla aktif olmayan dönemlerde yaklaşık %15 talep azaltımını kolaylaştırır (Moura vd., 2021). Gerçek zamanlı izleme sistemleri, enerji israfı modellerinin belirlenmesini sağlarken, bazı uygulamalar CO<sub>2</sub> tabanlı doluluk algılaması yoluyla %40-70 potansiyel HVAC tasarrufu bildirmektedir (Garcia-Monge vd., 2023).

Akıllı Şebeke Kontrolleri ile Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu, en dönüştürücü unsuru temsil eder. Gelişmiş uygulamalar, enerji maliyetini %24 azaltırken %77,7 yenilenebilir enerji penetrasyonu elde eder (Rehman vd., 2023). Fotovoltaik sistemler, kampüs net karbon emisyonlarının %40'ından fazlasını dengeleyebilir; bir kampüs yıllık 28.868.000 kWh üretim öngörmektedir (Liu vd., 2024).

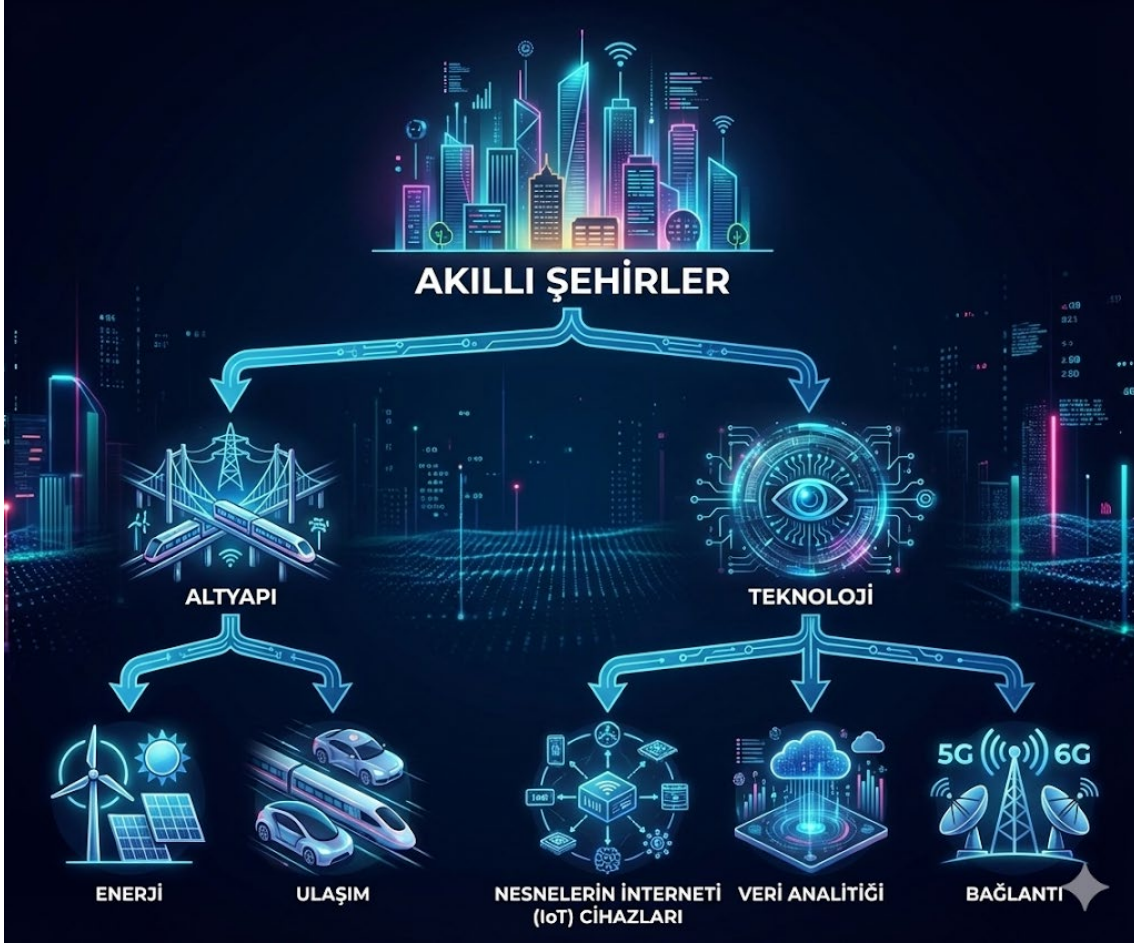
### **Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Üniversitelerin Rolü**

Üniversiteler, geleneksel bilgi alışverişinin ötesine geçerek toplumun aktif üyeleri haline gelmekte; karmaşık toplumsal sorunları ele almak adına endüstri ve sivil toplum kuruluşlarıyla yakın iş birliği içinde çalışarak Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nin ilerletilmesinde benzersiz bir rol oynamaktadır (Sengupta vd., 2020). Bu kurumlar, öğretim üyeleri, personel ve öğrencilerin kampüs sınırlarını aşan sürdürülebilirlik girişimlerinde iş birliği yaptıkları “canlı laboratuvarlar” ve “dönüşümsel sürdürülebilirliğin motorları” olarak işlev görmektedir (Purcell vd., 2018).

Hükümetler ve topluluklarla kurulan kurumsallaşmış ortaklıklar yoluyla sektörler arası SKH uygulamasını yönlendirmek için benzersiz bir konumda olan üniversiteler, ilgili paydaşlarla birlikte tasarlanan kanıta dayalı politika kararlarına zemin hazırlamaktadır (El-Jardali vd., 2018). Başarılı bir entegrasyon süreci ise sürdürülebilirliğin müfredata, stratejik planlamaya ve kurumsal kültüre dahil edilmesini ve aynı zamanda anlamlı bir toplumsal dönüşüm yaratmak için her düzeyde liderliğin teşvik edilmesini gerektirmektedir (Kilasonia, 2023; Singh & Blessinger, 2023).

### **Geleneksel Enerji Yönetiminden Akıllı Yönetime Geçiş İhtiyacı**

Geleneksel enerji yönetiminden akıllı enerji sistemlerine geçiş zorunluluğu, artan çevresel kaygılar ve dijitalleşen dünyanın ihtiyaçları doğrultusunda 21. yüzyılın en kritik teknik ve stratejik zorluklarından biri olarak ortaya çıkmıştır. Temelde merkezden uç noktalara doğru tek yönlü güç akışı ve operasyonel süreçlerde sınırlı, genellikle reaktif izleme yetenekleri ile karakterize edilen geleneksel enerji altyapısı, modern toplumun giderek karmaşıklaşan ve dinamikleşen taleplerini yönetmek için artık yetersiz kalmaktadır (Nanda vd., 2015).



**Şekil 1.** Geleceğin şehirleri: Akıllı altyapı ve ileri teknoloji ile şekillenen bağlantılı bir yaşam.

Küresel ölçekte yaşanan hızlı ekonomik gelişme ve yoğun kentleşme eğilimi; bir yandan güvenilirlik standartlarını ve maliyet etkinliğini korumaya çalışırken, diğer yandan katlanarak artan enerji taleplerine ayak uydurmakta zorlanan ve genellikle yaşanan, mevcut üretim, iletim ve dağıtım sistemleri üzerinde büyük ve sürdürülemez bir baskı yaratmıştır (Bhandar vd., 2020). Bu darboğazlara bir yanıt olarak geliştirilen akıllı enerji yönetim sistemleri; IoT tabanlı akıllı izleme, veri ve enerjinin karşılıklı aktığı çift yönlü iletişim ve yapay zekâ destekli gerçek zamanlı optimizasyon yeteneklerini uygulayarak bu tarihsel sınırlamaları ele alan köklü bir paradigma değişikliğini temsil etmektedir (Benkhalfallah vd., 2023). Bu gelişmiş dijital sistemler Şekil 1’de görüldüğü gibi, özellikle güneş ve rüzgâr gibi kesintili yapıya sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye sorunsuz entegrasyonunu mümkün kılar, tüketimin yoğun olduğu saatlerde yükü hafifleten talep yanıt mekanizmalarını kolaylaştırır ve enerji tüketim modellerine bina veya cihaz bazında benzeri görülmemiş bir görünürlük ve kontrol sağlar (Ramamritham vd., 2017). Alternatif yakıt teknolojileri alanında emisyon değerlerinin, deneysel verilere dayalı geri yayımlı yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak yüksek doğrulukla tahmin edilebildiği gösterilmiştir (Balki vd., 2018)

Daha derin bir ifadeyle bu geçiş, enerji paradigmasını temelden, üretimin tüketime uymaya çalıştığı klasik “arz talebi takip eder” modelinden, tüketimin mevcut üretime göre ayarlanabildiği esnek “talep arzı takip eder” modeline dönüştürerek daha dirençli ve sürdürülebilir enerji kullanımına olanak tanır (Schmeck, 2013). Sonuç olarak, eski tip şebekeler verimsizlik kaynaklı sık sık enerji israfı ve kritik anlarda arz eksikliği

yaşamaya devam ederken; akıllı enerji yönetimi, giderek daha bağlantılı ve elektrik bağımlısı hale gelen dünyamızda hem ekonomik ilerlemeyi desteklemek hem de çevresel sürdürülebilirliği güvence altına almak için vazgeçilmez bir gelecek rotası olarak ortaya çıkmaktadır (Huang, 2018).

## IOT VE YAPAY ZEKÂ TEKNOLOJİLERİ

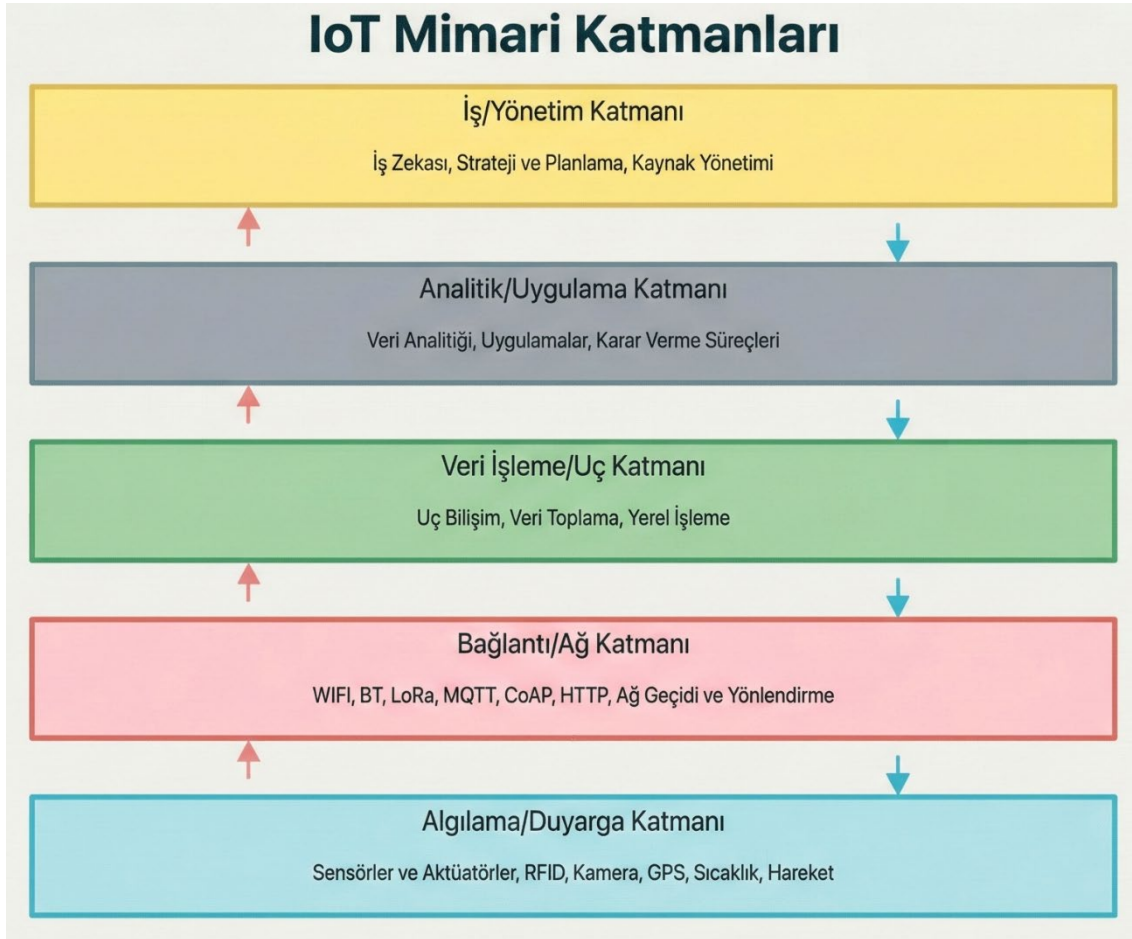
### IoT Mimarisi Genel Yapısı

Nesnelerin İnterneti mimarisi, bağlı cihazlar arasında kusursuz veri akışını sağlamak üzere tasarlanmış, çok katmanlı bir yapıdır. IoT sistemleri, üç katmanlı basit modelden yedi katmanlı kompleks modellere kadar değişen mimarilere sahip olabilir, ancak çoğu IoT uygulaması beş ila altı ana katman etrafında organize edilir.

### IoT Mimarisinin Ana Katmanları

- **Algılama/Algı Katmanı (Perception Layer)**

Şekil 2’de gösterildiği gibi algılama katmanı, IoT mimarisinin temel katmanıdır ve fiziksel dünyayla doğrudan etkileşimde bulunur. Bu katman sensörler, aktüatörler ve akıllı cihazlardan oluşur.



Şekil 2. IoT Mimari katmanları.

Sensörler çevreden veri toplarken (sıcaklık, nem, hareket gibi), aktüatörler alınan komutlara dayanarak gerçek dünyada işlem gerçekleştirir (ışıkları açma, motorları çalıştırma gibi). Algılama katmanında Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, 6LowPAN ve LoRaWAN gibi kablosuz teknolojiler kullanılır.

- **Bağlantı/Ağ Katmanı (Connectivity Layer)**

Bağlantı katmanı, algılama katmanı ile diğer katmanlar arasında veri iletimini sağlayan köprü görevi yapar. İnternet ağ geçitleri, yönlendiriciler ve iletişim protokolleri (MQTT, CoAP, HTTP) bu katmanın bileşenleridir. MQTT, güvenilir, yayımla-abone modeline dayanan bir protokol iken CoAP, sınırlı kaynakları olan cihazlar için UDP tabanlı, hafif bir protokoldür.

- **Veri İşleme/Edge Katmanı (Data Processing Layer)**

Edge (kenar) katmanı, IoT cihazları ile bulut arasında köprü görevi yaparak veri işleme ve analiz işlemlerini buluttan daha yakın yerlerde gerçekleştirir. Bu katman, far-edge (IoT cihazlara en yakın katman), mid-edge (ağ geçitleri) ve near-edge (kenar sunucuları) olmak üzere üç alt katmandan oluşur. Edge computing, gerçek zamanlı uygulamalarda kritik olan gecikmeyi azaltır ve bant genişliğini verimli kullanır.

- **Analitik/Uygulama Katmanı (Analytics and Application Layer)**

Bu katman, toplanan verileri işleyen, analiz eden ve görselleştiren zekâ merkezi olarak çalışır. Mobil uygulamalar, web arayüzleri, veri analitik araçları ve makine öğrenmesi modelleri bu katmanda bulunur.

- **İşletme/Yönetim Katmanı (Business Layer)**

En üst katman, sistemin genel yönetimini, güvenliğini ve iş kurallarını tanımlayan katmandır. Sistem güvenliği, veri gizliliği, cihaz yönetimi ve kullanıcı erişim kontrolü bu katmanda sağlanır.

### **Algılama Katmanında Kullanılan Sensor Türleri**

IoT sistemlerinde kullanılan sensörler, çalışma prensibine ve ölçtükleri parametreye göre birden fazla şekilde sınıflandırılabilir.

#### **İşletme Türüne Göre Sınıflandırma**

- **Aktif Sensörler**

Aktif sensörler, çalışmak için harici bir güç kaynağı gerektiren cihazlardır. GPS, ultrasonik sensörler ve bazı infrared sensörler aktif sensörlere örnek verilebilir. Daha güç tüketici olmalarına rağmen, uzakta olan nesnelere algılama kapasitesi yüksektir.

- **Pasif Sensörler**

Pasif sensörler, çevreden gelen elektrik darbeleri ile çalışan ve harici güç kaynağına ihtiyaç duymayan sensörlerdir. NFC etiketleri ve temel sıcaklık sensörleri pasif sensörlere örnek olarak gösterilebilir.

#### **Sinyal Türüne Göre Sınıflandırma**

- **Analog Sensörler**

Analog sensörler, ölçülen büyüklüğe bağlı olarak değişen sürekli çıkış sinyalleri üretir. Termometreler, basınç sensörleri ve ışık bağımlı dirençler analog sensörlere örnek verilebilir.

- **Dijital Sensörler**

Dijital sensörler, ölçümleri ikili verilere dönüştürerek kullanması daha kolay olan ayrık sinyaller üretirler. Ultrasonik sensörler ve Eylemsiz Ölçüm Birimleri dijital sensörlerin örnekleridir.

## Fonksiyonlarına Göre Sensor Türleri

- **Sıcaklık Sensörleri**

Sıcaklık sensörleri, bir nesnenin, yüzeyin veya ortamın ısı enerjisini tespit eder ve ölçer. Termostatlarda, akıllı ev sistemlerinde ve hava durumu istasyonlarında yaygın olarak kullanılırlar. Infrared sıcaklık sensörleri, nesnelerin yayılan infrared enerjisini yakalaştırarak sıcaklığı ölçer.

- **Nem (Humidity) Sensörleri**

Nem sensörleri, havadaki, sıvıdaki veya katı maddelerdeki nem düzeyindeki değişiklikleri algırlar. Kapasite, rezistans veya termal konduktivite yöntemleri kullanarak çalışırlar. Endüstriyel süreçlerde, HVAC sistemlerinde (ısıtma, havalandırma, klima) ve depo kontrol sistemlerinde kullanılırlar

- **Basınç Sensörleri**

Basınç sensörleri, gazlar veya sıvılar içindeki basınç değişimlerini algılayan ve ölçen cihazlardır. Piezoelektrik, kapasitif ve piezoresistif yöntemler kullanılarak çalışırlar. Endüstriyel uygulamalar, medikal cihazlar ve otomotiv sektöründe kullanımı yaygındır.

- **Hareket/İvmeölçer Sensörleri (Accelerometers)**

Hareket/İvmeölçer, konum, hız ve titreşim değişikliklerini algılayarak hareket tespit eden sensörlerdir. MEMS (Mikro Elektro-Mekanik Sistemler) tabanlı Hareket/İvmeölçerler, kapasitif yer değiştirme algılamayı kullanarak çalışır. Akıllı telefonlarda oryantasyon tespiti, endüstriyel titreşim izleme ve otonom araçlarda kullanılırlar.

- **Gyroscope Sensörleri**

Gyroscope sensörleri, dönme hareketi ve açısal hızı ölçen cihazlardır. Accelerometerlerden farklı olarak, rotasyonel harekete cevap verirler. Drone'lar, oyunlar, artırılmış gerçeklik uygulamaları ve navigasyon sistemlerinde kullanılırlar.

- **Yakınlık Sensörleri (Proximity Sensors)**

Yakınlık sensörleri, bir nesnenin varlığını veya yokluğunu fiziksel temastan bağımsız olarak algılayan sensörlerdir. Infrared, ultrasonik, kapasitif ve endüktif olmak üzere çeşitli teknolojiler kullanılırlar. Otomatik kapı sistemleri, park sensörleri ve kişi algılama sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar.

- **Hareket Sensörleri (Motion Sensors)**

Hareket sensörleri, infrared radyasyonu veya ultrasonik dalgaları kullanarak hareketi algırlar. Pasif Infrared (PIR) sensörler vücut ısını algılayarak en yaygın kullanılan hareket sensörü türüdür. Ev güvenliği, gözetim sistemleri ve akıllı aydınlatma uygulamalarında kullanılırlar.

- **Gaz Sensörleri**

Gaz sensörleri, atmosferde çeşitli gazların (karbondioksit, metan, oksijen vb.) konsantrasyonunu belirlerler. Endüstriyel ortamlarda işçi güvenliği, hastahanelerde hava kalitesi monitorleme ve çevre kirliliği ölçümünde kullanılırlar.

- **Optik/Infrared Sensörler**

Optik sensörler, ışık yoğunluğunun değişimlerini veya ışığın belirli dalga boylarını algırlar. Işık sensörleri (LDR), infrared emitter/receiver çiftleri çeşitli uygulamalarda kullanılırlar. Otomatik aydınlatma kontrolü, obje tespiti ve mesafe ölçümünde kullanılırlar.

- **Su Kalitesi Sensörleri**

Su kalitesi sensörleri, su ortamında pH, çözülmüş oksijen (DO), sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EC) ve çokluk (turbidity) gibi parametreleri ölçerler. Arıtma tesislerinde, su tedarik sistemlerinde ve çevre monitorleme uygulamalarında kullanılırlar.

- **Seviye Sensörleri (Level Sensors)**

Seviye sensörleri, kapalı bir ortamda sıvının seviyesini monitorleyen cihazlardır. Endüstriyel ortamlarda sızıntı tespiti ve rezervuar kontrolü için önemlidirler.

- **Görüntü Sensörleri (Image Sensors)**

Görüntü sensörleri (kameralar), fiziksel ortamdan görsel bilgiler toplayarak veri toplayan cihazlardır. Video gözetim, nesne tanıma, yüz tanıma ve yapay zekâ uygulamalarında kullanılırlar.

## **Sensörlerin Uygulanma Alanları**

IoT sensörleri, çok çeşitli endüstrilerde kritik rol oynamaktadır. Akıllı evlerde sıcaklık ve nem kontrolü, akıllı şehirlerde trafik ve çevre izleme, endüstri 4.0 uygulamalarında makine durumu takibi, tarımda toprak nem ve sıcaklık ölçümü, sağlık hizmetlerinde hastalık takibi ve hastane yönetiminde sensörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Su kalitesi uygulamalarında pH, DO, TDS ve sıcaklık sensörleri entegre edilerek gerçek zamanlı veri toplanmakta ve Grafana gibi görselleştirme araçları ile kullanıcılara sunulmaktadır.

## **IoT Mimarisinin Temel Özellikleri**

- **Modülerite ve Birlikte Çalışabilirlik**

İyi tasarlanmış bir IoT sistemi, modüler bileşenler ve standart arayüzler ile tasarlanır. Bu, sistemi zaman içinde bakım ve genişletmeyi kolaylaştırır. Örneğin, iletişim modülü veri işleme modülünden ayrı tutulabilir, böylece yeni bir protokol desteği eklemek diğer modülleri etkilemez.

- **Ölçeklenebilirlik**

IoT mimarileri, tek bir akıllı termostat'tan bir akıllı şehirdeki milyonlarca cihaza kadar ölçeklendirilebilmesi gerekir. Edge computing ve bulut mimarisinin kombinasyonu bu ölçeklenebilirliği sağlar.

- **Güvenlik**

Güvenlik ve yönetim bileşeni, IoT cihazlarını, ağları ve veri akışlarını firmware koruması, şifreleme, erişim kontrolü ve sürekli izleme ile korur.

- **Düşük Gecikme (Low Latency)**

Otonom araçlar, sağlık hizmetleri ve endüstriyel otomasyon gibi zamana duyarlı IoT uygulamalarında, edge computing kritik önemdedir. Edge katmanında veri işlenerek gerçek zamanlı kararlar alınabilir.

IoT mimarisi ve sensör teknolojileri, modern akıllı sistemlerin omurgasını oluşturmakta, işletmelerin veri tabanlı karar almasını ve otomasyonu

gerçekleştirmesini sağlamaktadır. Sensörlerin doğru seçilmesi ve mimarinin optimize edilmesi, başarılı IoT uygulamalarının temelini oluşturur.

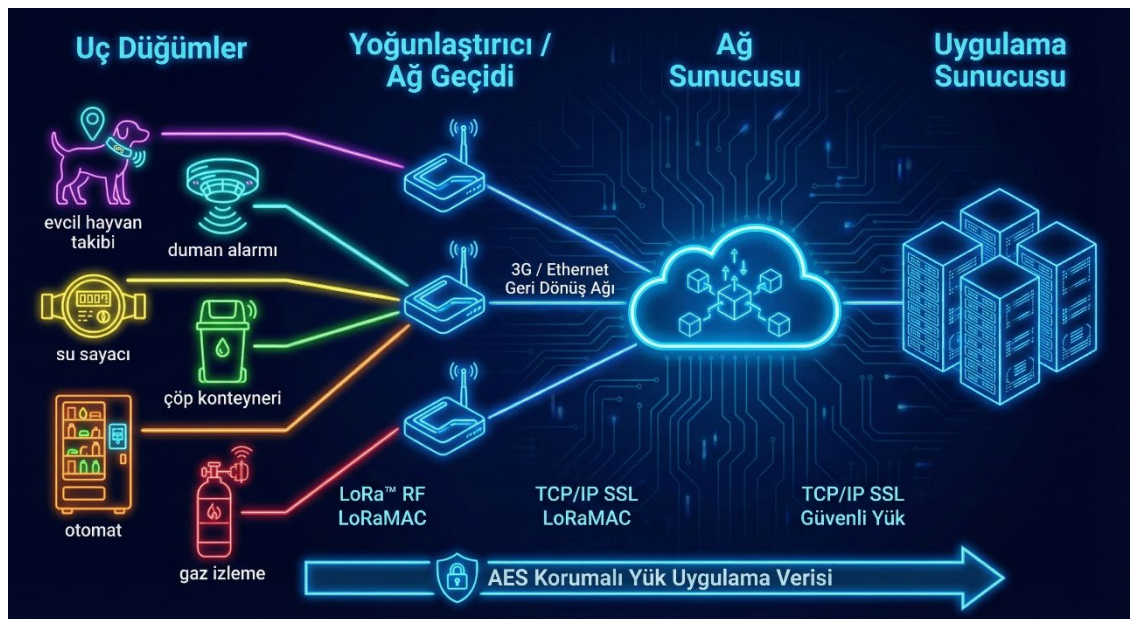
### Kampüs Ölçeğinde İletişim Protokolleri

İnternet of Things (IoT) teknolojisinin hızlı gelişimi ve çeşitli uygulamalarının yaygınlaşması, üniversite kampüslerinde ve geniş alanlı kuruluşlarda yüksek kapasiteli, enerji verimli ve güvenilir haberleşme ağları tasarlamayı zorunlu hale getirmiştir. Kampüs ölçeğindeki IoT uygulamaları, güvenlik, enerji yönetimi, bina otomasyonu, çevresel izleme, varlık takibi ve akıllı aydınlatma gibi çok çeşitli ihtiyaçları karşılamak durumundadır. Bu ihtiyaçların her biri farklı haberleşme gereksinimlerine sahip olduğundan, tek bir protokolün tüm uygulamalara yeterli olması pratik değildir. Bu bölüm, kampüs ölçeğinde yaygın olarak kullanılan dört temel haberleşme protokolünü (LoRaWAN, Zigbee, Wi-Fi ve MQTT) kapsamlı bir şekilde inceleyerek, özellikleri, güçlü yönleri, sınırlamaları ve uygun uygulama alanlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

#### • LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), uzun menzilli, düşük güç tüketimine sahip IoT uygulamaları için tasarlanmış bir geniş alan haberleşme protokolüdür. Teknoloji, LoRa (Long Range) adı verilen ve CSS (Chirp Spread Spectrum) modülasyonuna dayalı bir fiziksel katman modülasyonu kullanmaktadır. LoRaWAN, lisans gerektirmeyen frekans bantlarında (Avrupa'da 868 MHz, Kuzey Amerika'da 915 MHz ve Çin'de 470 MHz) çalışır ve yıldız topolojisi (star topology) benimser. Bu topolojide, uç cihazlar (end devices) doğrudan ağ sunucusuna bağlanan kapılar (gateways) aracılığıyla iletişim kurar.

LoRaWAN mimarisi, bir koordinatör (network server), çok sayıda kapı (gateway) ve binlerce uç cihazdan oluşur. Her kapı, yayınlanan mesajları alıp ağ sunucusuna iletir. Ağ sunucusu, birden çok kapıdan gelen aynı mesajın kopyalarını algılayıp birini saklar (dedüplikasyon işlemi). Uç cihazlar ile kapı arasında doğrudan eşleşmeye gerek yoktur; herhangi bir cihaz menzildeki tüm kapılara iletişim kurabilir. Bu yapı, ağın kurulumunu ve yönetimini basit hale getirir. Şekil 3'de LoRaWAN ağ mimarisi diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3. LoRaWAN ağ mimarisi diyagramı.

Veri hızı bakımından LoRaWAN, 0,3 kbps ile 50 kbps arasında bir aralıkta çalışır. Spektrum yayılımı (spread spectrum) tekniği sayesinde mesafeler kentsel bölgelerde birkaç kilometre, kırsal alanlarda ise 10-15 kilometre veya daha fazla olabilir. Enerji tüketimi son derece düşüktür; LoRaWAN cihazları tek bir pil ile yıllar boyunca çalışabilir.

LoRaWAN, aes-128 şifreleme yöntemi kullanarak end-to-end veri koruması sağlar. Ağ katmanı şifrelemesi (NwkSKey) ve uygulama katmanı şifrelemesi (AppSKey) olmak üzere iki seviyeli şifreleme mekanizması kullanılır. Cihazlar ağa katılmadan önce kimlik doğrulaması geçerler.

Kampüs ortamında LoRaWAN, aşağıdaki gibi uygulamalar için oldukça uygun bulunmaktadır:

- **Enerji ve Su Tüketim İzleme:** Kampüs genelindeki bina tüketim sayaçlarının uzaktan okunması ve raporlanması.
- **Çevresel İzleme:** Hava kalitesi, nem, sıcaklık ve ışık düzeylerinin izlenmesi.
- **Parkın Varlık Yönetimi:** Kampüs genelindeki otopark alanlarında araç varlığının tespiti.
- **Atık Yönetimi:** Çöp ve geri dönüşüm konteynerlerinin doluluk düzeyinin izlenmesi.

Bu uygulamalarda veri iletim sıklığı düşük olmakla birlikte, kapsama alanının geniş ve cihazların enerji verimliliğinin yüksek olması gerekir. LoRaWAN bu özellikleri ideali şekilde karşılar.

Düşük veri hızı, LoRaWAN'ın başlıca sınırlamasıdır. Video akışı, ses haberleşmesi veya gerçek zamanlı yüksek frekanslı veri transferi için uygun değildir. Ayrıca, kapı sayısı ve konumu kritiktir; yetersiz kapsama alanı yaşanması halinde ek kapıların kurulması gerekir. Bina içi uygulamalarda duvar ve yapı malzemeleri sinyal zayıflama (shadowing) yaşanmasına neden olabilir.

### **Zigbee:**

Zigbee, IEEE 802.15.4 standardına dayalı, kısa menzilli ve düşük veri hızlı bir haberleşme protokolüdür. Adı, arıların “zig-zag” dansını temsil eden dans deseniyle ilişkilidir ve cihazların birbirlerine karmaşık şekilde bağlanabildiğini sembolize eder. Zigbee, ağırlıklı olarak 2.4 GHz ISM (Industrial, Scientific, Medical) frekans bandında çalışır ancak Avrupa'da 868 MHz ve Amerika'da 915 MHz bantlarında da desteklenir.



**Şekil 4.** Akıllı kampüs uygulamaları için Zigbee IoT cihaz ağı.

Zigbee'nin temel özelliği, mesh (ağ) topolojisidir. Bu mimaride, her cihaz diğer cihazları ara nokta (relay) olarak kullanarak mesaj iletebilir. Bir cihaz doğrudan hedefe ulaşamıyorsa, menzil içindeki başka cihazlar aracılığıyla iletişim kurabilir. Bu yapı, sinyal kapsama alanını önemli ölçüde genişletir ve ağ güvenilirliğini artırır.

Zigbee ağında üç tür mantıksal cihaz tanımlanır:

- **Koordinatör:** Ağı kuran ve yöneten merkezi cihaz.
- **Router:** İleti aktaran ve mesh özelliğini sağlayan ara cihazlar.
- **Uç cihazlar (End Devices):** Sadece veri gönderip alan, ileti aktarmayan cihazlar.

Veri iletim hızı 250 kbps'e kadar çıkabilir. Menzil, açık alanda maksimum 100 metre civarında olmakla birlikte, mesh yapısı sayesinde daha geniş alanları kapsanabilir.

Enerji tüketimi LoRaWAN'a kıyasla daha yüksektir ancak yine de pil tarafından desteklenebilir seviyelerdedir; cihazlar aylar veya yıllar boyunca pil ile çalışabilir.

Zigbee, aes-128 şifreleme ve çok seviyeli güvenlik mekanizmaları kullanır. Ağ katmanı ve uygulama katmanı ayrı ayrı şifrelenebilir. Cihazların ağa katılabilmesi için yetkilendirme işlemi yapılır.

Şekil 4'de görüldüğü gibi Zigbee, bina içi ve kısa/orta mesafe uygulamalar için öne çıkmaktadır:

- **Bina Otomasyonu:** HVAC (Isıtma, Havalandırma, Klima) sistemleri, LED aydınlatma kontrolü, sıcaklık düzenlemesi.
- **Oda Düzeyi Sensörleri:** Hareket, ışık ve ihtiyaç halinde ısı enerjisi yönetimi sensörleri.
- **Güvenlik Sistemleri:** Kapı/pencere sensörleri, acil durum yanıt sistemleri.
- **Hasta Monitorizasyonu:** Hastane ve yaşlılar yurdu benzeri kampüs sağlık tesislerinde hasta takibi.

Bu uygulamalar sık mesajlaşma, iki yönlü kontrol, güvenlik gereksinimi ve bina içi kapsama ihtiyacı taşıdığından, Zigbee'nin mesh yapısı ve orta seviye veri hızı bu koşullara uygundur.

Zigbee'nin ana sınırlaması, kısa menzildir. Kampüs genelinde kapsama sağlamak için her binada ve açık alanlarda koordinatör ve router cihazlarının kurulması gerekir. Ayrıca, kısa mesafe uygulamalarında veri hızı sınırlıdır; yüksek bant genişliği gereken uygulamalar için uygun değildir. Ağ yönetim karmaşıklığı, düğüm sayısı arttıkça artabilir.

### **Wi-Fi:**

Wi-Fi (Wireless Fidelity), IEEE 802.11 standart ailesine dayalı yaygın olarak kullanılan bir kablosuz yerel alan ağ (WLAN) teknolojisidir. İsmi "Wireless Fidelity" ifadesinden almaktadır. Wi-Fi, 2.4 GHz ve 5 GHz frekans bantlarında çalışır; en yeni standart olan Wi-Fi 6 ek olarak 6 GHz bandını da desteklemektedir.

Wi-Fi, erişim noktası (Access Point, AP) veya yönlendirici aracılığıyla çalışır. Cihazlar, erişim noktasına bağlanır ve veri alışverişini yapar. Modern Wi-Fi standartları (802.11ac, 802.11ax/Wi-Fi 6), gigabit seviyesinde veri hızları sağlayabilir. Modülasyon tekniği olarak OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) kullanılır ve bu sayede yüksek veri hızları elde edilir.

Kampüs ortamında Wi-Fi altyapısı genellikle zaten mevcuttur. Öğrenciler ve personel kendi cihazları (smartphones, laptops) ile bağlanırlar. Bu yapı kullanıcı cihazları için son derece uygundur.

Wi-Fi, WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3) güvenlik protokolü ile güçlü şifreleme sağlar. Enterprise seviyeleri için 802.1X kimlik doğrulaması da desteklenir. Kampüs ortamında genellikle kurumsal güvenlik çözümleri (RADIUS tabanlı) kullanılır.

- **Kullanıcı Cihazları:** Öğrenci ve personel bilgisayarları, tabletleri, akıllı telefonları.
- **Video İzleme:** Kampüs güvenliği için bağlı kameralar ve video akışı.
- **Gerçek Zamanlı Uygulamalar:** Canlı sosyal medya yayınları, video konferansları, interaktif eğitim uygulamaları.

- **Yüksek Veri Hızlı Sensörler:** Bazı ileri ölçüm cihazları, spektroskopi gibi uygulamalar.

Wi-Fi'nın enerji tüketimi son derece yüksektir. Pil tarafından desteklenen IoT cihazları için pratik değildir; saatler içinde pil tükenir. Menzil, açık alanda yaklaşık 100 metre; bina içinde ise duvarlar ve yapı malzemeleri nedeniyle daha kısadır. Yoğun kullanıcı ortamlarında (kampüs kafeteryaları, büyük toplandı alanları) ağ tıkanıklığı yaşanabilir. Her binada ve açık alanlarda birçok erişim noktasının kurulması gerekir ve bu, altyapı maliyetini artırır.

## MQTT:

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), taşıyıcıdan bağımsız, hafif bir publish/subscribe (yayını-abone ol) mimarisine dayalı uygulama katmanı protokolüdür. Protokol, orijinal olarak ISM (IBM) tarafından geliştirilen, ancak OASIS tarafından standardize edilen bir spesifikasyondur. MQTT, genellikle TCP/IP üzerine kurulu olsa da diğer taşıyıcı protokolleri (LoRaWAN backhaul, Zigbee gateway vb.) ile de çalışabilir.

MQTT'nin temel mimarisi, merkezi bir aracı (broker) etrafında döner. Yayımcılar (publishers), belirli konulara (topics) mesaj yayınlarlar. Abone olanlar (subscribers) ilgilendiği konuları takip ederler ve yayınlanan mesajları alırlar. Yayımcı ve abone doğrudan iletişim kurmaz; tüm iletişim aracı üzerinden gerçekleşir. Bu mimaride, yayımcı ve abone arasında mekansal, zamansal ve senkronizasyon açısından bir ayıklanma (decoupling) oluşur.

Konular, eğik çizgi (/) ile ayrılmış hiyerarşik yapılar oluştururlar. Örneğin, kampus/bina\_a/kat\_3/sicaklik konusu, kampüsün bina A'nın 3. katındaki sıcaklık sensöründen gelen verileri taşır. Abone, kampus/bina\_a/+sicaklik gibi joker karakterler kullanarak birden çok konuya aynı anda abone olabilir.

MQTT, QoS (Quality of Service) seviyeleri sunmaktadır:

- **QoS 0:** En fazla bir kez (Fire-and-forget). Mesaj kaybolabilir.
- **QoS 1:** En az bir kez. Mesaj tekrar gönderilebilir.
- **QoS 2:** Tam olarak bir kez. En güvenilir ama en yavaş seçenektir.

Kampüs ortamında, sensör verilerinin kritikliğine bağlı olarak uygun QoS seviyeleri seçilir. Örneğin, sıcaklık sensörü verisi QoS 0 ile iletilerek ağ trafiği azaltılabilir; fakat acil alarm sistemi QoS 2 ile gönderilir.

MQTT 3.1.1 ve sonrası sürümleri, SSL/TLS şifreleme, kullanıcı adı/şifre tabanlı kimlik doğrulaması ve erişim kontrol listesi (ACL) mekanizmalarını destekler. Kampüs ortamında, MQTT aracısı genellikle güvenilir ağ içinde bulunur ve ek güvenlik katmanları eklenebilir.

Kampüs IoT altyapısında MQTT, tüm fiziksel katman protokollerinin (LoRaWAN, Zigbee, Wi-Fi) üzerinde bir ortak mesajlaşma katmanı görevi görür. Örneğin:

- LoRaWAN ağ sunucusu, MQTT aracısına bağlanır ve lorawan/device\_123/telemetry konusuna mesaj yayımlar.
- Zigbee gateway, zigbee/room\_sensor/temperature konusuna sıcaklık verilerini yayımlar.

- Wi-Fi bağlantılı bir kamera, wifi/security/camera\_01/alert konusuna alarm bildirisi gönderir.
- Merkezi MQTT aracısı, tüm bu verileri birleştirir ve subscribed uygulamalara (dashboard, alarm sistemi, veri analiz motoru) dağıtır. Bu yapı, kampüs IoT mimarisinin ölçeklenebilir, esnek ve yönetilebilir olmasını sağlar.

MQTT, fiziksel ağ katmanı sağlamaz; taşıyıcı protokol gerektirir. Doğrudan haberleşme yeteneği yoktur; merkezi aracı mutlaka gereklidir. Aracının arızalanması tüm haberleşmeyi etkileyebilir. Bu nedenle, kritik uygulamalarda aracı yedekleme (failover) mekanizması tasarlanmalıdır.

Kampüs ölçeğinde IoT uygulamalarının başarısı, farklı haberleşme protokollerinin güçlü yönlerini bilen ve uygun şekilde bir araya getiren mimarlar tarafından sağlanır. LoRaWAN, geniş alanları az altyapı ile kapsamak için; Zigbee, bina içi ve kısa mesafe mesh ağları için; Wi-Fi, yüksek veri hızı ve kullanıcı cihazları için ve MQTT, tüm protokoller arasında merkezî mesajlaşma katmanı olarak hizmet eder.

Gelecek yıllarında, 5G ve beyond 5G (B5G) teknolojileri kampüs IoT uygulamalarına entegre olacak; bu sayede gerçek zamanlı, ultra düşük gecikme ve yüksek güvenilirliğe ihtiyaç duyan uygulamalar (örneğin, otonom robotu kontrol, artırılmış gerçeklik tabanlı öğrenme) desteklenecektir. Ayrıca, kenar bilişimi (edge computing) ve bulut bilişimi (cloud computing) arasında daha iyi bir denge kurularak, gizlilik ve veri güvenliği önemli hale gelecektir.

Başarılı bir kampüs IoT dağıtımı, teknolojik seçimlerin yanı sıra, işletme modeli, eğitim, sürdürülebilirlik ve paydaş katılımını da dikkate alan bütünsel bir yaklaşım gerektirir.

### **Büyük Veri ve Enerji Tüketim Verilerinin Karakteristiği**

Büyük veri analitiği bağlamında ele alınan enerji tüketimi verileri, geleneksel veri setlerinden ayrılarak önemli hesaplama ve analitik zorluklar ortaya çıkaran, kendine özgü ve karmaşık bir yapı sergilemektedir. Bu veriler, literatürde sıklıkla atıfta bulunulan büyük verinin üç temel boyutu ile karakterize edilir: yönetilmesi gereken büyük hacim (volume), verinin üretim ve akış hızı (velocity) ve yapısal çeşitlilik (variety) (Hu & Vasilakos, 2016). Bu boyutlara ek olarak, enerji verilerinin doğasından kaynaklanan belirsizlikler, “veracity” (doğruluk/güvenilirlik) kavramını da analitik süreçlerin merkezine yerleştirmektedir.

Akıllı şebeke altyapılarına geçiş ve akıllı sayaçların yaygın kullanımı hem hacim hem de hız açısından devasa veri akışları üretmekte; bu durum, verinin anlık olarak işlenmesini (stream processing) ve analiz edilmesini hesaplama açısından zorlu bir mühendislik problemine dönüştürmektedir (Jarrah Nezhad vd., 2014). Hacim boyutu özellikle belirgindir; milyonlarca uç noktayı barındıran akıllı şebekeler, 5 ila 15 dakika gibi oldukça ince zaman aralıklarıyla toplanan, yüksek çözünürlüklü uzun zaman serileri şeklinde büyük miktarda elektrik tüketim verisi üretmektedir (Mohammad, 2018). Bu durum, sensör ağları ve Gelişmiş Ölçüm Altyapısından (AMI) elde edilen veri hacminde doğrusal değil, katlanarak artan bir büyümeye neden olmuştur (Perez-Chacon vd., 2018).

Verinin boyutsal zorlukları sadece hacimle sınırlı değildir. Farklı kaynaklardan elde edilen meteorolojik veriler, tatil takvimleri ve sosyoekonomik ölçütlerin enerji tüketim serileriyle entegrasyonu, veri setinin heterojenliğini ve karmaşıklığını artırmaktadır. Bu durum, “boyut laneti” (curse of dimensionality) riskini doğurarak veri yönetimini ve modellemeyi oldukça karmaşık hale getirmektedir (Mohammad, 2018).

Ek olarak enerji sistemleri, deterministik olmaktan uzak, insan davranışlarının stokastik yapısından ve çevresel faktörlerden etkilenen karmaşık doğrusal olmayan (non-linear) sistemlerdir. Geleneksel istatistiksel yaklaşımlar, veri işleme ve özellik seçimi sırasında bu non-lineer ilişkileri yakalamakta yetersiz kalarak bilgi kayıplarına yol açabilir (Wang vd., 2013). Veri setlerinde sıkça karşılaşılan eksik veriler (missing values), aykırı değerler (outliers) ve sensör hataları ise sistemdeki belirsizliği artırmaktadır.

Tüm bu karakteristik özellikler; yük tahmini, enerji planlaması ve dağıtım optimizasyonu gibi kritik süreçlerde anlamlı içgörüler elde edebilmek için standart veritabanı yönetim sistemlerinin ötesine geçen, yapay zekâ destekli gelişmiş büyük veri analitiği yaklaşımlarını ve yüksek performanslı özel hesaplama çerçevelerini zorunlu kılmaktadır.

## **YAPAY ZEKA DESTEKLİ ENERJİ YÖNETİM STRATEJİLERİ**

Enerji sektöründe yaşanan dijital dönüşüm ve akıllı şebeke (smart grid) altyapılarının yaygınlaşması, enerji yönetiminde geleneksel reaktif yaklaşımlardan veri odaklı proaktif stratejilere geçişi zorunlu kılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimindeki stokastik yapı ve tüketici davranışlarının dinamikliği, modern enerji sistemlerinde arz-talep dengesinin sağlanmasını giderek zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda Yapay Zekâ, karmaşık, gürültülü ve yüksek hacimli enerji verilerinin işlenerek; sistem verimliliğini, güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini optimize eden temel bir kaldıraç görevi görmektedir.

İstatistiksel yöntemlerin yetersiz kaldığı doğrusal olmayan problemleri çözme yeteneğine sahip olan makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları; yük tahmini, talep tarafı yönetimi, kestirimci bakım ve gerçek zamanlı şebeke optimizasyonu gibi kritik alanlarda karar destek mekanizmalarını güçlendirmektedir. Bu bölüm, enerji yönetiminde verimliliği maksimize etmek ve operasyonel maliyetleri düşürmek amacıyla kullanılan güncel yapay zekâ destekli stratejileri ve bu stratejilerin uygulama alanlarını incelemektedir.

### **Enerji Tüketim Tahminlemesi:**

Enerji tüketimi tahminlerinde LSTM (Long Short-Term Memory), GRU (Gated Recurrent Unit) ve Prophet modellerinin karşılaştırmalı analizi, bu mimarilerin zamansal kalıpları yakalamadaki etkinliklerini belirleyen yapısal avantajlarını ve sınırlılıklarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Özellikle derin öğrenme tabanlı modeller, enerji tüketim verilerindeki stokastik yapıyı ve doğrusal olmayan zamansal bağımlılıkları modelleme konusunda üstün bir yetenek sergilemektedir.

Bu bağlamda LSTM ağları, sahip oldukları “unutma kapıları” (forget gates) sayesinde, uzun vadeli bağımlılıkları ve karmaşık tarihsel örüntüleri yakalamada mükemmel sonuçlar üretmekte; ancak bu başarı, titiz bir veri ön işleme süreci ve kapsamlı hiperparametre ayarlaması maliyetiyle gelmektedir (Saini & Sharma, 2024). Öte yandan, LSTM mimarisinin daha sadeleştirilmiş bir türevidir olan GRU modelleri, daha az parametre ile benzer öğrenme kapasitesine ulaşabilmektedir. Yapılan karşılaştırmalı analizler, GRU'nun LSTM'nin 0,37 ila 2,28 arasındaki RMSE (Kök Ortalama Kare Hatası) aralığına kıyasla, 0,03 ila 2,00 aralığında daha istikrarlı ve düşük hata oranlı bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu durum, GRU'yu hesaplama verimliliği ve eğitim hızı açısından özellikle kısıtlı donanım kaynaklarında cazip bir alternatif haline getirmektedir (Furizal vd., 2024).

Buna karşılık, Facebook tarafından geliştirilen Prophet algoritması, “ayrıştırılabilir zaman serisi modeli” (decomposable time series model) tabanlı istatistiksel yaklaşımıyla farklı bir kulvarda öne çıkmaktadır. Prophet, özellikle enerji tüketimindeki belirgin periyodik bileşenlerin, mevsimselliğin ve düzensiz tatil etkilerinin baskın olduğu senaryolarda; kara kutu (black-box) modellerin aksine, yüksek yorumlanabilirlik ve hızlı prototip oluşturma imkânı sunmaktadır (Saini & Sharma, 2024).

Modellerin ham tahmin doğrulukları incelendiğinde ise; LSTM'nin 0,010 MSE (Ortalama Kare Hata) ve 0,90 R<sup>2</sup> skoru ile olağanüstü bir hassasiyete ulaştığını; GRU'nun ise 0,015 MSE ve 0,88 R<sup>2</sup> ile onu çok yakından takip ettiğini belgelemektedir. Bu bulgular, derin öğrenme modellerinin ham veri üzerindeki öğrenme kapasitesinin gücünü teyit etmektedir (Khan vd., 2024).

Ancak literatürdeki en çarpıcı bulgu, tekil modellerin zayıf yönlerini elimine eden hibrit yaklaşımların başarısıdır. Özellikle LSTM-Prophet entegrasyonu; Prophet'in mevsimsel ve trend bileşenlerini modellemedeki başarısını, LSTM'nin ise arta kalan (residual) verideki karmaşık, doğrusal olmayan bağımlılıkları çözme kapasitesiyle birleştirmektedir. Bu hibrit yapı, 65,34 RMSE, 0,73 MAPE ve 0,98 gibi son derece yüksek bir R<sup>2</sup> değerine ulaşarak, tekil modellerin ötesinde bir performans potansiyeli sunmaktadır (Albahli, 2025).

Sonuç olarak, bu modeller arasında seçim yapmak; veri setinin karakteristiğine (mevsimsellik vs. karmaşıklık), mevcut hesaplama kaynaklarına ve projenin özel gereksinimlerine bağlı bir optimizasyon problemidir. Derin öğrenme mimarileri (LSTM/GRU), karmaşık enerji modellerinde dönüştürücü bir doğruluk vaat ederken; Prophet, daha anlaşılır ve hızlı çözümler için güçlü bir aday olarak yerini korumaktadır (Saini & Sharma, 2024).

### **Anomali Tespiti: Enerji Kaçakları ve Arızalı Ekipmanların Belirlenmesi**

Makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri, akıllı şebeke sistemlerinin güvenilirliğini tehdit eden teknik olmayan kayıplar (enerji hırsızlığı) ile donanım kaynaklı teknik anomalileri ayırt etmede geleneksel yöntemlere kıyasla önemli bir etkinlik göstermiştir. Literatürdeki son çalışmaların %41'inde sinir ağlarının baskın yöntem olarak tercih edildiğini; özellikle zaman serisi verilerindeki mekansal örüntüleri yakalama yeteneğine sahip evrişimli sinir ağlarının (CNN) ve otomatik kodlayıcıların (Autoencoders), yaklaşık %92-97'lik medyan duyarlılık oranları ile öne çıktığı bildirilmiştir (Pazderin vd., 2023). Tekil modellerin yanı sıra, farklı mimarilerin güçlü yönlerini birleştiren gelişmiş hibrit yapılar üstün performans sergilemektedir. Örneğin, enerji tüketim verilerini salt zaman serisi olarak değil, bir görüntü işleme problemi gibi ele alarak haftalık ve günlük yük modellerini 2D veri örneklerine dönüştürmüş; bu çok boyutlu derin öğrenme yaklaşımıyla %97,5 gibi yüksek bir sınıflandırma doğruluğuna ulaşmıştır (Jeyaraj vd., 2020). Benzer şekilde hırsızlık dışı faktörlerin (örneğin mevsimsel değişimler veya tatil günleri) neden olduğu elektrik tüketim sapmalarını, kötü niyetli girişimlerden ayırabilen bir Otomatik Kodlayıcı-Çift Yönlü Geçitli Tekrarlayan Birim (AE-BiGRU) hibrit yaklaşımı geliştirmiş; bu yöntemle %90,1 doğruluk ve %10,2 gibi kabul edilebilir bir yanlış pozitif oran elde etmiştir (Pamir vd., 2022).

Ancak, anomali tespitinde kullanılan mimarinin seçimi, tespit edilmek istenen hatanın türüne göre değişkenlik göstermektedir. Denetimli öğrenme temelli yapay sinir ağları, anomali türü sınıflandırmasında %7,62 frekans hatası ile belirli arıza tiplerini etiketlemede başarılı olurken; denetimsiz öğrenme prensibiyle çalışan otomatik

kodlayıcılar, veriyi yeniden yapılandırma (reconstruction) mantığıyla çalıştıkları için %0 algılama hatası elde etmiş, ancak tespit edilen anomalinin “türünü” sınıflandıramamıştır (Žarkovic & Dobric, 2024). Bu durum, hibrit yaklaşımların gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Uygulamada karşılaşılan en büyük engel ise veri setlerinin doğasından kaynaklanmaktadır. Dengesiz veri kümeleri (imbalanced datasets), modelin çoğunluk sınıfı olan “normal tüketim” lehine önyargılı öğrenmesine neden olarak önemli zorluklar yaratmaktadır. Gerçek dünya verilerinin, meşru tüketime kıyasla ihmal edilebilir düzeyde az enerji hırsızlığı örneği içerdiği; bu dengesizliği gidermek ve modelin azınlık sınıfını (hırsızlık/arıza) öğrenebilmesi için SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique), ROS ve CBOS gibi veri dengeleme ve sentetik veri üretim tekniklerinin zorunlu olduğu belirtilmiştir (Pazderin vd., 2023).

Modellerin başarısının doğrulanması; duyarlılık (gerçek pozitif oranı), özgüllük, doğruluk, F1 puanı ve ROC eğrisinin altındaki alan (AUC) gibi çok boyutlu performans ölçütlerine dayanmaktadır. İncelenen yayınların %33'ünün birincil değerlendirme ölçütü olarak duyarlılığı (hırsızlığı yakalama başarısı) kullandığını raporlamıştır (Pazderin vd., 2023). Ancak, kamu hizmetleri operasyonlarında yanlış sınıflandırmanın yarattığı maliyetler göz önüne alındığında, duyarlılık tek başına yeterli değildir. Hatalı bir şekilde “hırsızlık” olarak etiketlenen dürüst bir abonenin (yanlış pozitif) yaratacağı gereksiz saha denetim maliyetleri ve itibar kaybı kritik olmaya devam etmektedir; bu nedenle modellerin özgüllük (specificity) değerlerinin de optimize edilmesi gerekmektedir.

## SONUÇ

Bu çalışmada incelenen üniversite kampüslerinde sürdürülebilirlik odaklı dijital dönüşüm süreci; yalnızca teknolojik bir altyapı yenilenmesi değil, aynı zamanda yükseköğretim kurumlarının operasyonel mükemmelliği ve çevresel sorumluluğu birleştiren “canlı laboratuvarlara” dönüşmesini ifade etmektedir. Elde edilen bulgular, kampüslerin geleneksel enerji yönetiminden Nesnelere İnterneti (IoT) ve Yapay Zekâ (YZ) tabanlı akıllı sistemlere geçişinin, enerji verimliliği, karbon ayak izinin azaltılması ve maliyet optimizasyonu açısından kritik bir zorunluluk olduğunu ortaya koymaktadır.

IoT mimarisi üzerine yapılan analizler, başarılı bir akıllı kampüs uygulamasının tek bir protokole veya katmana indirgenemeyeceğini göstermiştir. Algılama katmanından iş/yonetim katmanına uzanan çok katmanlı yapı, farklı karakteristiklere sahip iletişim protokollerinin (LoRaWAN, Zigbee, Wi-Fi ve MQTT) hibrit bir şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Özellikle geniş alan kapsama gerektiren sayaç okuma işlemleri için LoRaWAN, bina içi otomasyon için Zigbee ve yüksek hızlı veri aktarımı için Wi-Fi teknolojilerinin MQTT çatısı altında entegre edilmesi, ölçeklenebilir ve esnek bir altyapı için en uygun çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Enerji yönetiminin veri odaklı boyutunda ise “Büyük Veri”nin hacim, hız ve çeşitlilik gibi zorluklarının aşılmasında geleneksel istatistiksel yöntemlerin yetersiz kaldığı görülmüştür. Enerji sistemlerinin doğrusal olmayan ve stokastik yapısı, LSTM ve GRU gibi derin öğrenme mimarilerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Çalışmada vurgulanan literatür bulguları, özellikle LSTM ve Prophet gibi farklı güçlü yönleri sahip modellerin birleştirildiği hibrit yaklaşımların, enerji talep tahminlemede tekil modellere kıyasla çok daha yüksek doğruluk (yüksek R<sup>2</sup> ve düşük RMSE değerleri) sağladığını kanıtlamaktadır.

Benzer şekilde, enerji güvenliği ve gelir koruma bağlamında anomali tespiti, operasyonel verimliliğin temel taşlarından biridir. Makine öğrenimi tekniklerinin, teknik olmayan kayıplar (enerji hırsızlığı) ile donanım kaynaklı teknik arızaları ayırt etmedeki başarısı, kampüs şebekelerinin güvenilirliğini artırmaktadır. Ancak, dengesiz veri setleri ve yanlış pozitif oranlarının yarattığı ekonomik riskler, bu alanda sentetik veri üretimi (SMOTE vb.) ve hibrit modelleme çalışmalarının derinleştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Nihayetinde, “arzın talebi takip ettiği” pasif modelden, “talebin arza göre optimize edildiği” proaktif akıllı şebeke modeline geçiş, üniversitelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında kilit rol oynamaktadır. Gelecek projeksiyonlarında, 5G teknolojilerinin entegrasyonu ve kenar bilişim (edge computing) yeteneklerinin artmasıyla birlikte, kampüslerin kendi enerjisini üreten, yöneten ve optimize eden otonom ekosistemlere dönüşmesi beklenmektedir. Bu dönüşüm, üniversiteleri sadece bilgi üreten kurumlar olmaktan çıkarıp, toplumsal sürdürülebilirlik için öncü uygulama merkezleri haline getirecektir.

## KAYNAKÇA

- Albahli, S. (2025). LSTM vs. Prophet: Achieving Superior Accuracy in Dynamic Electricity Demand Forecasting. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en18020278>
- Balki, M. K., Çavuş, V., Duran, İ. U., Tuna, R., & Sayin, C. (2018). Experimental Study and Prediction of Performance and Emission in an SI Engine Using Alternative Fuel with Artificial Neural Network. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7(1), 58-64. <https://doi.org/10.18245/ijaet.438048>
- Benkhalfallah, M. S., Kouah, S., & Ammi, M. (2023). Smart Energy Management Systems. *İçinde Lecture Notes in Networks and Systems* (ss. 1-8). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44146-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44146-2_1)
- Bhandar, S., Upadhyay, S., Shah, A. B., & Singh, D. D. (2020). A Review paper on Smart Use of Energy and its Management by Different Methods. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-642>
- El-Jardali, F., Ataya, N., & Fadlallah, R. (2018). Changing roles of universities in the era of SDGs: Rising up to the global challenge through institutionalising partnerships with governments and communities. *Health Research Policy and Systems*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12961-018-0318-9>
- Furizal, F., Fawait, A. B., Maghfiroh, H., Ma'arif, A., Firdaus, A. A., & Suwarno, I. (2024). Long Short-Term Memory vs Gated Recurrent Unit: A Literature Review on the Performance of Deep Learning Methods in Temperature Time Series Forecasting. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 4(3), 1506-1526. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v4i3.1546>
- García-Monge, M., Zalba, B., Casas, R., Cano, E., Guillén-Lambea, S., López-Mesa, B., & Martínez, I. (2023). Is IoT monitoring key to improve building energy efficiency? Case study of a smart campus in Spain. *Energy and Buildings*, 285, 112882. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112882>
- Hu, J., & Vasilakos, A. V. (2016). Energy Big Data Analytics and Security: Challenges and Opportunities. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5), 2423-2436. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2563461>
- Huang, J. (2018). Building Intelligence in Digital Transformation. *Journal of Integrated Design and Process Science*, 21(4), 1-4. <https://doi.org/10.3233/jid-2018-0006>
- Jarrah Nezhad, A., Wijaya, T. K., Vasirani, M., & Aberer, K. (2014). SmartD. *Proceedings of the 5th international conference on Future energy systems*, 213-214. <https://doi.org/10.1145/2602044.2602046>
- Jeyaraj, P. R., Nadar, E. R. S., Kathiresan, A. C., & Asokan, S. P. (2020). Smart grid security enhancement by detection and classification of

- \textless scp\textgreater nontechical\textless /scp\textgreater losses employing deep learning algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(9). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12521>
- Khan, S., Mazhar, T., Khan, M. A., Shahzad, T., Ahmad, W., Bibi, A., Saeed, M. M., & Hamam, H. (2024). Comparative analysis of deep neural network architectures for renewable energy forecasting: Enhancing accuracy with meteorological and time-based features. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00783-5>
- Kilasonia, Z. (2023). Higher education and the Sustainable Development Goals. *DAVID AGHMASHENEBELI UNIVERSITY OF GEORGIA SCIENTIFIC JOURNAL „SPECTRI“*. <https://doi.org/10.52340/spectri.2023.15>
- Liu, R., Wang, X., Zhu, L., & Li, F. (2024). Prospective Analysis of University Carbon Reduction Based on Photovoltaic Utilization—Taking Jinnan Campus of Nankai University as an Example. *E3S Web of Conferences*, 490, 01008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449001008>
- Mohammad, R. (2018). AMI Smart Meter Big Data Analytics for Time Series of Electricity Consumption. 2018 17th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy In Computing And Communications/ 12th IEEE International Conference On Big Data Science And Engineering (TrustCom/BigDataSE). <https://doi.org/10.1109/TrustCom/BigDataSE.2018.00267>
- Moura, P. S., Moreno, J. I., Lopez, G., & Alvarez-Campana, M. (2021). IoT Platform for Energy Sustainability in University Campuses. *Italian National Conference on Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s21020357>
- Nanda, P., Panigrahi, C., & Dasgupta, A. (2015). Energy Management System in Smart Grid: An Overview.
- Perez-Chacon, R. en, Luna-Romera, J. e, Troncoso, A., Martinez-Alvarez, F., & Riquelme, J. e. (2018). Big Data Analytics for Discovering Electricity Consumption Patterns in Smart Cities. *Energies*, 11(3), 683. <https://doi.org/10.3390/en11030683>
- Pamir, Javid, N., Qasim, U., Yahaya, A. S., Alkhamash, E. H., & Hadjouni, M. (2022). Non-Technical Losses Detection Using Autoencoder and Bidirectional Gated Recurrent Unit to Secure Smart Grids. *IEEE Access*, 10, 56863-56875. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3171229>
- Patil, G. N., & Tanavade, S. S. (2024). Eco-Friendly Energy Efficient Classrooms and Sustainable Campus Strategies: A Case Study on Energy Management and Carbon Footprint Reduction. *International Journal of Energy Economics and Policy*. <https://doi.org/10.32479/ijeep.15712>
- Pazderin, A., Kamalov, F., Gubin, P., Safaraliev, M., Samoylenko, V., Mukhlynin, N., Odinaev, I., & Zicmane, I. (2023). Data-Driven Machine Learning Methods for Nontechnical Losses of Electrical Energy Detection: A State-of-the-Art Review. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16217460>
- Petrie, C., Gupta, S., Rao, V., & Nutter, B. (2018). Energy Efficient Control Methods of HVAC Systems for Smart Campus. 2018 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), 133-136. <https://doi.org/10.1109/greentech.2018.00032>
- Purcell, W. M., Henriksen, H. A., & Spengler, J. D. (2018). Universities as the Engine of Transformational Sustainability in Delivering Against the Sustainable Development Goals: Livitabng Labs for Sustainability. <https://doi.org/10.20944/preprints201810.0665.v1>
- Ramamritham, K., Karmakar, G., & Shenoy, P. J. (2017). Smart Energy Management: A Computational Approach. *Journ\`ees Bases de Donn\`ees Avanc\`ees*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72413-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72413-3_1)
- Rehman, S., Mohammed, A. B., Alhems, L., & Alsulaiman, F. (2023). Comparative study of regular and smart grids with PV for Electrification of an academic campus with EV charging. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(31), 77593-77604. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27859-5>
- Saini, K. P., & Sharma, A. (2024). A Comparison Between Long Short-Term Memory And Prophet For Time Series Analysis And Forecasting Technique. *Educational Administration Theory and Practices*. <https://doi.org/10.53555/kuey.v30i4.2816>


- Schmeck, H. (2013). Smart Energy Systems. *it - Information Technology*, 55(2), 43-44.  
<https://doi.org/10.1524/itit.2013.9002>
- Scott, C., Ahsan, M., & Albarbar, A. (2021). Machine Learning Based Vehicle to Grid Strategy for Improving the Energy Performance of Public Buildings. *Sustainability*.  
<https://doi.org/10.3390/SU13074003>
- Sengupta, E., Blessinger, P., & Yamin, T. S. (2020). Introduction to University Partnerships for Sustainable Development. <https://doi.org/10.1108/s2055-364120200000020004>
- Singh, A., & Blessinger, P. (2023). Examining the Role and Challenges of Sustainable Development Goals for the Universities in the United Arab Emirates. *Sustainability*.  
<https://doi.org/10.3390/su152015123>
- Wang, N.-L., Chen, D., & Yang, Y. P. (2013). Big Data Analytics-Based Energy-Consumption Feature Selection of Large Thermal Power Units. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.1862>
- Žarković, M., & Dobrić, G. (2024). Artificial Intelligence for Energy Theft Detection in Distribution Networks. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en17071580>

## BÖLÜM 8

### DİSİPLİNLERARASI EĞİTİMDE STANDARTLAŞMADAN KİŞİSELLEŞTİRMEYE: YAPAY ZEKA TABANLI UYARLANABİLİR ÖĞRENME PLATFORMLARI

*Ahmet KARAOĞLU*

*Dr. Öğr. Üyesi, Sinop Üniversitesi, akaraoglu@sinop.edu.tr*

 0000-0002-7507-3031

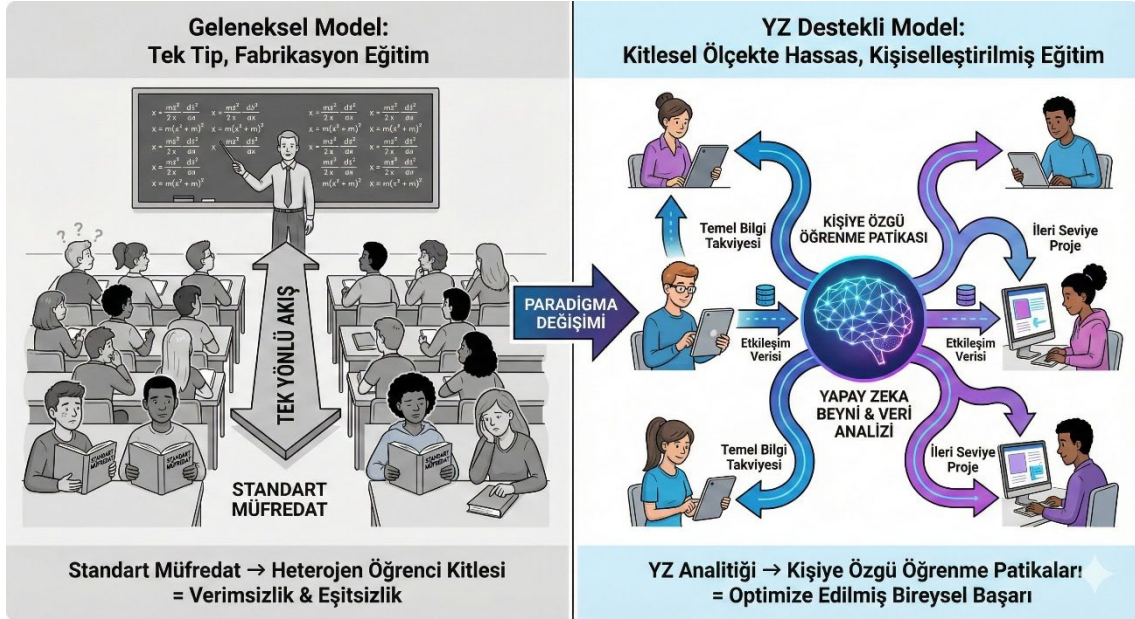
Eğitim tarihsel olarak, müfredatı, öğrenim süresini ve sınavları standartlaştıran, öğrencileri kalite kontrolü olarak standartlaştırılmış testlerin uygulandığı bir montaj hattı sisteminden geçen tek tip ürünler olarak gören bir fabrika modeli etrafında gelişmiştir (Senge, 2014; Serafini, 2002). Ancak, bu Sanayi Devri paradigması, demokrasinin ezberci öğrenme yerine eleştirel düşünme ve esnek bilgi yapısı oluşturabilen vatandaşlara ihtiyaç duyduğu günümüzün bilgi çağında temelden geçerliliğini yitirmiştir (Leland & Kasten, 2002). Modern ekonomi, bağımsız düşünebilen, etkili bir şekilde iş birliği yapabilen ve karmaşık sorunları çözebilen bireyler talep etmektedir; bu beceriler, katı, herkese uyan tek tip fabrika modeliyle geliştirilemez (Senge, 2014). Todd Rose'un "Ortalamanın Sonu" araştırması, ortalama bir öğrenen diye bir şeyin olmadığını göstererek bu sistemin altında yatan yanlılığı daha da ortaya koymaktadır; bunun yerine, bireyler bağlama göre değişen "düzensiz" yetenek profilleri sergilerler, bu da standartlaştırılmış yaklaşımları sadece etkisiz değil, aynı zamanda aktif olarak zararlı hale getirir (Benton, 2016; Quinn, 2016). Francis M. Duffy ve diğerlerinin iddia ettiği gibi, bu fabrika paradigmasından öğrenci merkezli Bilgi Çağı yaklaşımına geçiş, dini dönüşümle karşılaştırılabilecek temel bir değişimdir ve her öğrencinin kendine özgü ihtiyaçlarına, ilgi alanlarına ve yeteneklerine göre kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimlerini hak ettiğini kabul etmeyi gerektirir.

Günümüzün bilimsel ve teknolojik zorlukları, tek bir disiplinle etkili bir şekilde ele alınamayacak kadar karmaşık hale gelmiştir ve bu da STEM, Veri Bilimi ve Biyoinformatik gibi alanlarda disiplinler arası yetkinlik gerektirmektedir. İklim değişikliği ve çevresel zorlukları doğal bilimler, mühendislik ve sosyal bilimlerden yetkinlik gerektiren örnekler olarak gösterilmiş, "belirli sorunların tek bir çalışma alanı tarafından etkili bir şekilde ele alınamayacak kadar karmaşık olduğu" açıkça belirtilmektedir (Mazzocchi, 2019). Bu değişim, özellikle yeni gelişen alanlarda belirgindir: biyoinformatiğin "moleküler biyoloji, genetik, programlama ve matematik dahil olmak üzere çeşitli alanlarda derin uzmanlık" gerektirdiğini belirtilirken, STEM araştırmalarının "giderek daha karmaşık ve doğrusal olmayan" hale geldiğini ve geleneksel sınırları aşan "alışılmadık beceri setleri" gerektirdiği belirtilmektedir (Aksenova vd., 2025; Wurzman, 2010). Bu eğilim pekiştirilerek, yirmi birinci yüzyılın problem çözme becerilerinin "genellikle tek bir disiplini aştığını" ve bu nedenle modern STEM eğitimi ve uygulamasında gerçek problemleri ele almak için disiplinler arası çerçevelerin gerekli olduğu savunulmaktadır (Priemer vd., 2019).

Disiplinler arası eğitimin doğası gereği karşılaştığı en temel zorluk, öğrenci profillerindeki yüksek düzeyde heterojenliktir. Farklı akademik disiplinlerden gelen öğrenciler, karmaşık ve çok katmanlı derslere başlarken beraberlerinde birbirinden çok farklı ön bilgi ve yetkinlik setleri getirmektedirler. Biyoinformatik gibi alanlar bu durumun en somut örneğidir; eğitmenler için çok çeşitli geçmişlere sahip öğrencilere ders vermek ve alanlar arasındaki bilgi boşluklarını köprülemek son derece zorlayıcı bir süreç haline gelmektedir (Abeln vd., 2013). Bu asimetri, özellikle sağlık bilişimi gibi hibrit programlarda daha keskin bir şekilde hissedilir. Örneğin, tıp fakültesi kökenli öğrenciler klinik süreçlere hakimken hesaplamalı düşünme ve yazılım becerilerinden yoksun olabilir; buna karşılık mühendislik kökenli öğrenciler algoritmik düşüncede yetkinken temel biyolojik kavramları ve anatomik terminolojiyi kavramakta güçlük çekebilirler. Bu tür gruplardaki çeşitlilik, özellikle disiplinler arası yüksek lisans programlarında eğitim tasarımını hem ilginç hem de karmaşık bir hale getirmektedir (Campos vd., 2024).

Üniversiteler, öğrenci grupları arasındaki bu dil, terminoloji ve öğrenme yeteneği çeşitliliği nedeniyle, müfredatlarını farklı öğrencilerin akademik ihtiyaçlarını eş zamanlı karşılayacak şekilde ayarlama konusunda ciddi bir sistemsel baskı altındadır (Chipamaunga & Prozesky, 2019). Sorun sadece teorik bilgi eksikliği ile sınırlı değildir; öğrencilerin formasyonunda, özellikle istatistiksel temeller ve analitik düşünme becerileri gibi metodolojik alanlarda da önemli zayıflıklar tespit edilmiştir (Ponce vd., 2019). Mevcut veriler ve gözlemler ışığında, endüstriyel modelin ürünü olan standart ve "tek tip" (one-size-fits-all) müfredatların, disiplinler arasındaki bu değişken bilgi açıklarını etkili bir şekilde yönetemediği açıktır. Bu durum, bazı öğrencilerin aşına olmadıkları içerik altında ezildiği, diğerlerinin ise kendi uzmanlık alanlarında yeterince zorlanmadığı verimsiz bir eğitim ortamı yaratmaktadır.

Disiplinler arası eğitimin karşılaştığı bu yapısal açmazın ve öğrenci çeşitliliğinin getirdiği yükün yönetilmesinde, Yapay Zeka (YZ) destekli Uyarlanabilir Öğrenme Sistemleri (Adaptive Learning Systems- ALS) devrim niteliğinde bir paradigma değişimi sunmaktadır. Bu kitap bölümünün temel tezi; YZ teknolojilerinin, eğitim tarihindeki en etkili öğrenme biçimi olduğu kanıtlanmış olan ancak yüksek maliyeti ve insan kaynağı kısıtları nedeniyle sadece ayrıcalıklı bir azınlığa sunulabilen "birebir özel ders öğretmeni" (one-on-one tutoring) hassasiyetini, ilk kez kitlesel ölçekte ve sürdürülebilir bir şekilde sunma potansiyeline sahip olduğudur.



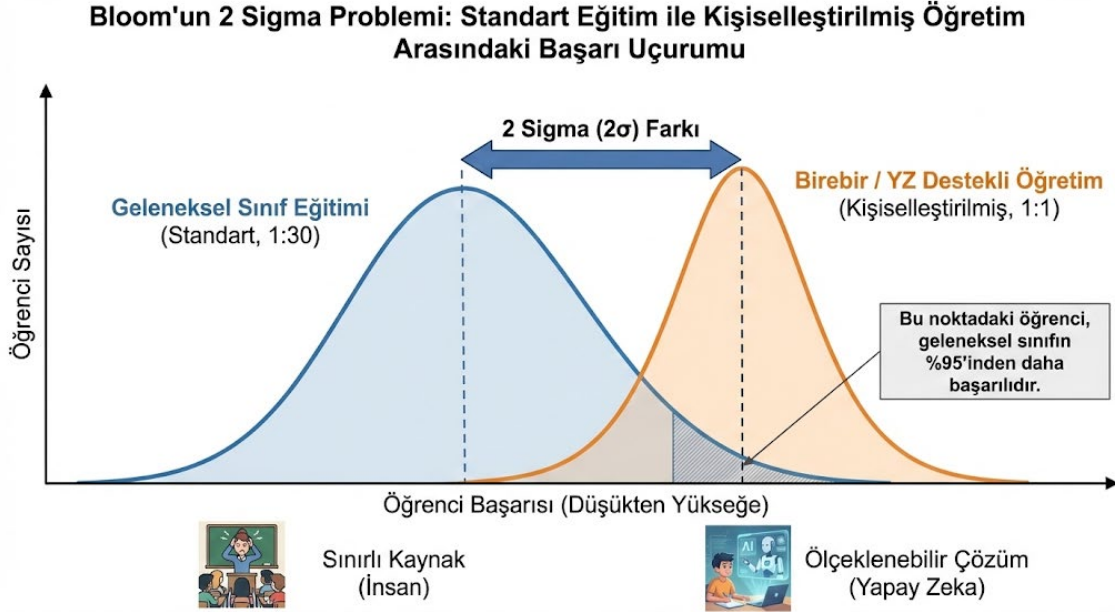
**Şekil 5.** Eğitimde Paradigma Değişimi: Geleneksel "Tek Tip" (One-Size-Fits-All) Yaklaşımdan, Yapay Zekâ Destekli Hassas ve Kişiselleştirilmiş Öğrenme Modeline Geçişin Karşılaştırmalı Gösterimi

Şekil 1’de gösterildiği gibi, geleneksel sınıflarda bir öğretmenin onlarca farklı disiplin geçmişine sahip öğrencinin anlık bilişsel durumunu aynı anda takip etmesi imkansızdır. Buna karşılık, YZ tabanlı algoritmalar, öğrencinin sistem üzerindeki her etkileşimini (cevap süresi, hata türü, tereddüt anları) bir veri noktası olarak işleyerek, öğrencinin "dijital bilişsel haritasını" çıkarabilir. Bu sayede sistem, standart bir müfredatı dayatmak yerine, tıpkı yetkin bir özel hoca gibi, öğrencinin disiplinler arası bilgi boşluklarını milimetrik bir hassasiyetle tespit edip, öğrenme patikasını (learning path) o öğrenciye özgü olarak gerçek zamanlı yeniden kurgulayabilir. Bu, eğitimin endüstriyel üretiminden, "kişiyi özel hassas tıp" (precision medicine) benzeri "hassas eğitim" modeline geçişin anahtarıdır.

## EĞİTİMDE STANDARTLAŞMADAN KİŞİSELLEŞTİRMEYE GEÇİŞ

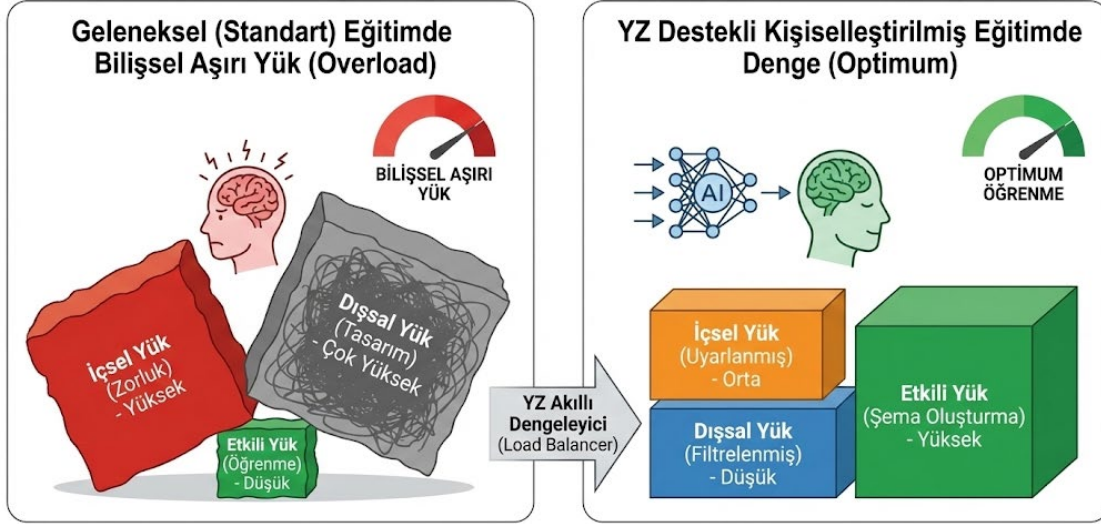
Modern eğitim sistemlerinin son iki yüzyılına damgasını vuran hakim paradigma, Sanayi Devrimi'nin kitlesel üretim mantığıyla birebir örtüşen ve verimliliği önceleyen "standartlaştırma" modelidir. Bu model, eğitimi belirli bir zaman diliminde, önceden tanımlanmış sabit bir içeriğin, homojen olduğu varsayılan büyük gruplara tek yönlü aktarımı olarak kurgulamıştır. Ancak, bilgiye erişimin demokratikleştiği ve karmaşık becerilerin önem kazandığı günümüzde, öğrenenlerin bilişsel profillerindeki, hazırbulunuşluklarındaki ve öğrenme hızlarındaki derin farklılıkları yok sayan bu "tek tip" (one-size-fits-all) yaklaşım, pedagojik sınırlarına ulaşmıştır. Eğitimde standartlaşmadan kişiselleştirmeye geçiş; sadece teknolojik bir araç değişimi değil, merkeze "müfredatı" değil "öğreneni" alan köklü bir zihniyet devrimini ifade eder. Bu bölüm, söz konusu dönüşümün gerekliliğini iki temel teorik çerçeve üzerinden temellendirecektir: İlk olarak, kitlesel sınıf eğitimi ile birebir öğretim arasındaki dramatik başarı farkını ortaya koyan Benjamin Bloom’un "2 Sigma Problemi" incelenecek; ardından, özellikle karmaşık disiplinler arası konularda öğrenme verimliliğini belirleyen "Bilişsel Yük Kuramı" ve standart içeriğin yarattığı aşırı yüklenme riski analiz edilecektir.

Eğitim bilimleri literatüründe, standart sınıf eğitimi ile idealleştirilmiş kişisel öğretim arasındaki derin uçurumu en çarpıcı şekilde ortaya koyan çalışma, Benjamin Bloom'un 1984 yılında yayımladığı ve "2 Sigma Problemi" olarak bilinen çığır açıcı araştırmasıdır. Bloom bu çalışmasında, birebir özel ders alan öğrencilerin, geleneksel kalabalık sınıf ortamındaki akranlarına kıyasla performanslarında iki standart sapma (2-sigma) kadar dramatik bir artış gösterdiğini saptamıştır (Rosenberg-Kima, 2022; Vorst & Jelcic, 2019). Şekil 2'de gösterildiği gibi, bu istatistiksel farkın pratikteki yansıması muazzamdır; zira bu durum, birebir eğitim desteği alan ortalama bir öğrencinin, geleneksel yöntemlerle öğretilen öğrenci grubunun %95'inden daha yüksek bir başarı düzeyine ulaştığı anlamına gelmektedir (Leyzberg vd., 2014).



**Şekil 6.** Benjamin Bloom'un "2 Sigma Problemi" ve Kişiselleştirilmiş Öğretimin Etkisi

Bloom'un bu bulgusu, kişiselleştirilmiş öğretimin öğrenci başarısı üzerindeki olağanüstü potansiyelini tartışmaya yer bırakmayacak şekilde kanıtla da, bu model on yıllardır eğitimcilerin önünde aşılmaz bir ekonomik ve lojistik engel olarak durmuştur. Her öğrenciye yetkin bir "insan öğretmen" atamayı gerektiren bu ideal senaryonun, sınırlı öğretmen kaynağı ve sürdürülemez maliyetler nedeniyle endüstriyel çağın kitlesel eğitim sistemlerinde uygulanması şimdiye kadar imkânsız görülmüştür (Vorst & Jelcic, 2019). Ancak günümüzde, yapay zekâ teknolojilerinin olgunlaşması, bu kronikleşmiş sorunu çözmek için dönüştürücü bir fırsat penceresi aralamaktadır. YZ, her öğrenciye ölçeklenebilir, uyarlanabilir ve kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimleri sunarak, on yıllardır "ideal ama ulaşılamaz" kabul edilen bu 2-sigmalık başarı farkını kapatma potansiyeline sahiptir (Hall, 2021). Bu bağlamda YZ destekli akıllı öğretim sistemleri, bireyselleştirilmiş öğretimin faydalarını kitlesel ölçekte sunarak, eğitim çıktılarını küresel çapta iyileştirme konusunda uzun zamandır çözümünü nihayet sunabilir.



YZ, gereksiz dışsal yükü azaltır ve içsel yükü öğrenci seviyesine göre optimize ederek anlamlı öğrenme için etkili yüke (*germane load*) alan açar.

### Şekil 7. Bilişsel Yük Kuramı Bağlamında Geleneksel ve Yapay Zekâ Destekli Öğrenme Ortamlarının Karşılaştırmalı Analizi

Disiplinlerarası eğitimin doğasında var olan karmaşıklık, öğrenme sürecinin verimliliğini belirleyen kritik bir psikolojik faktörü, yani "Bilişsel Yük Kuramı" (Cognitive Load Theory) merkeze taşımaktadır. Farklı disiplinlere ait yeni kavramların aynı anda işlenmesini gerektiren hibrit derslerde, insan zihninin sınırlı olan çalışan bellek (working memory) kapasitesi büyük bir baskı altına girer. Bu tür durumlarda, öğrencinin anlık hazırbulunuşluk düzeyine uyarlanmamış, herkese aynı şekilde sunulan standart içerik, zihinsel işlem kapasitesinin hızla aşılmasına yol açar. Nitekim yapılan araştırmalar, kişiselleştirilmemiş standart içeriğin, öğrencilerin bilişsel kapasitelerini bunaltarak (overwhelm) öğrenmeyi bloke etme riski taşıdığını somut olarak ortaya koymaktadır (Lange, 2021). Şekil 3'te gösterildiği gibi özellikle bir disiplinde yetkin, diğerinde zayıf olan bir öğrenci için standart müfredat, ya gereksiz tekrarlarla "dışsal yükü" (extraneous load) artırır ya da çok zorlayıcı içerikle baş edilemez bir "içsel yük" (intrinsic load) yaratır.

Bu tıkanıklığı aşmada YZ destekli kişiselleştirme, bilişsel yükün boyutları arasında dinamik bir denge kurucu (load balancer) olarak kritik bir işlev görür. YZ algoritmaları, içeriğin karmaşıklığını ve sunum biçimini bireysel öğrenen profillerine göre anlık olarak ayarlayarak, öğrencinin zihinsel kaynaklarını yeni şemalar oluşturmaya ve derinlemesine anlamaya odaklayan "etkili yükü" (germane load) optimize etmeyi hedefler. Örneğin, YZ ile zenginleştirilmiş adaptif ders materyalleri kullanan öğrenciler üzerinde yapılan çalışmalarda, öğrenme için kritik olan etkili bilişsel yükün, konunun zorluğundan veya sunum şeklinden kaynaklanan diğer yük türlerine göre anlamlı derecede daha yüksek olduğu ve bunun da daha faydalı bir öğrenme örüntüsüne işaret ettiği saptanmıştır (Koc-Januchta vd., 2022). Daha güncel bulgular da bu etkiyi doğrulamaktadır; kişiselleştirilmiş YZ araçları, öğrenciyi "bilişsel optimum" noktasında tutarak zihinsel gerginliği (mental strain) önemli ölçüde azaltmakta ve regresyon analizlerinin gösterdiği üzere, bu durum akademik motivasyon üzerinde güçlü pozitif etkiler yaratmaktadır (Kabir vd., 2025). Kısacası YZ, disiplinlerarası öğrenmede bilişsel aşırı yüklenmeye karşı bir "akıllı filtre" görevi görerek, zihinsel eforun verimli ve anlamlı öğrenme süreçlerine kanalize edilmesini sağlamaktadır.

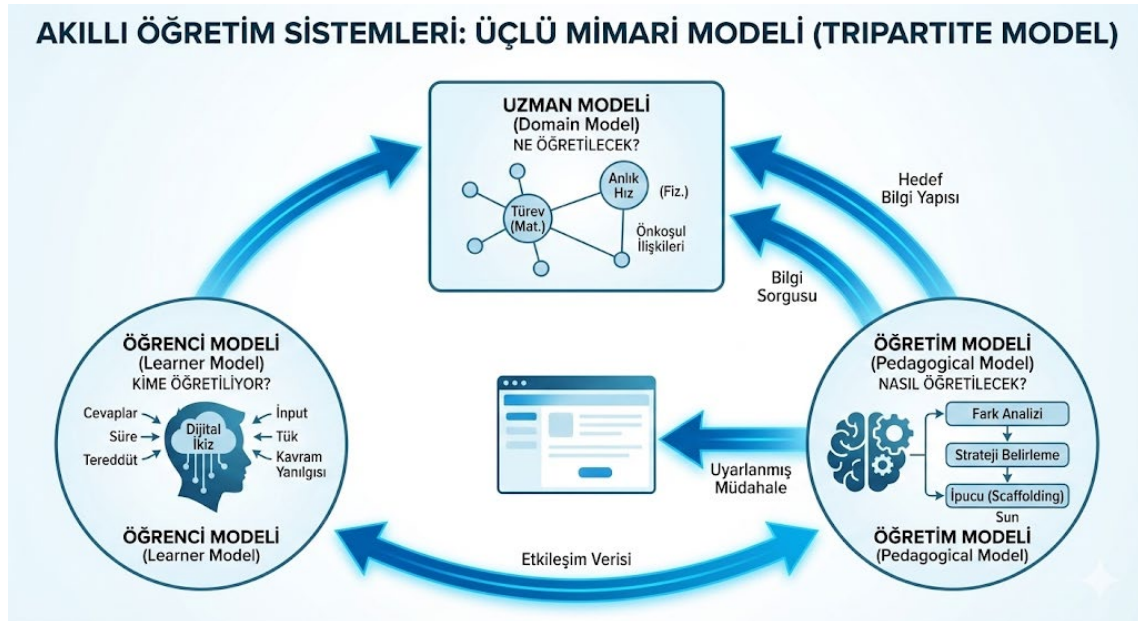
## YZ TABANLI UYARLANABİLİR SİSTEMLERİN MİMARİSİ

Önceki bölümlerde, disiplinlerarası eğitimde "tek tip" yaklaşımın yarattığı pedagojik ve bilişsel sorunları ve bu sorunların çözümünde kişiselleştirmenin zorunluluğunu tartıştık. Bu bölüm, söz konusu kişiselleştirme vaadinin teknolojik olarak nasıl hayata geçirildiğine odaklanarak, çalışmanın teknik kalbini oluşturmaktadır.

Yapay zekâ tabanlı uyarlanabilir öğrenme platformları, son kullanıcıya basit ve akıcı bir arayüz sunsa da, "kaputun altında" karmaşık veri modellerinin, olasılıksal çıkarım algoritmalarının ve dinamik karar mekanizmalarının sürekli etkileşim halinde olduğu sofistike mühendislik sistemleridir. Bu sistemlerin temel amacı, yetkin bir insan öğretmenin öğrenciyi gözlemleme, anlama ve ona uygun müdahaleyi yapma sürecini (bkz. Bloom'un 2 Sigma Problemi) dijital ortamda ve kitlesel ölçekte taklit etmektir. Bu bölümde, soyut pedagojik hedeflerin somut bir yazılım mimarisine nasıl dönüştüğü, sistemin temel bileşenleri ve bu bileşenleri çalıştıran YZ algoritmaları üzerinden detaylandırılacaktır.

### • Üçlü Model Yapısı: Sistemin Temel Bileşenleri

Uyarlanabilir öğrenme sistemleri (Adaptive Learning Systems) ve Akıllı Öğretim Sistemleri (Intelligent Tutoring Systems - ITS), farklı teknolojiler kullansalar da temelde literatürde "Üçlü Model" (Tripartite Model) olarak bilinen klasik bir mimari üzerine inşa edilirler. Şekil 4'de gösterilen bu mimari; sistemin "neyi öğreteceğini", "kime öğreteceğini" ve "nasıl öğreteceğini" belirleyen birbiriyle bağlantılı üç ana modülden oluşur: Uzman Modeli, Öğrenci Modeli ve Öğretim Modeli (Wenger, 1987; Woolf, 2009). Sistemin "akıllı" davranışı, bu üç model arasındaki sürekli veri alışverişi ve dinamik etkileşimden doğar.



**Şekil 8.** Yapay Zeka Tabanlı Uyarlanabilir Sistemlerin Temelini Oluşturan Üçlü Mimari (Tripartite Model)

**Uzman Modeli (Domain Model- "Ne Öğretilecek?"):** Uzman modeli, sistemin bilgi tabanını (knowledge base) temsil eder. Bu modül, sadece öğretilecek konuyla ilgili gerçeklerin, tanımların veya kuralların dijital bir deposu değildir; aynı zamanda bu bilginin yapısını ve içsel ilişkilerini de içerir. Disiplinlerarası bir bağlamda uzman modeli, farklı alanlara ait kavramları (örneğin, matematikteki "türev" ile fizikteki "anlık hız" kavramlarını) ve bu kavramlar arasındaki hiyerarşik veya önkoşul

(prerequisite) ilişkilerini tanımlayan karmaşık "ontolojiler" veya "bilgi grafikleri" (knowledge graphs) şeklinde tasarlanır. Bu model, sistemin "konu uzmanı" olarak işlev görür ve bir öğrencinin bir konuda ustalaşması için hangi alt becerilere sahip olması gerektiğinin haritasını sunar.

**Öğrenci Modeli (Learner Model- "Kime Öğretiliyor?"):** Sistemin en dinamik bileşenidir ve öğrencinin o anki bilişsel durumunun dijital bir yansımasını (dijital ikizini) temsil eder. Öğrenci modeli statik bir profil değildir; öğrencinin sistem üzerindeki her etkileşimiyle (verdiği cevaplar, cevaplama süresi, yardım isteme sıklığı, tereddüt anları vb.) anlık olarak güncellenir. Bu model, öğrencinin uzman modelindeki hangi kavramları bildiğini (knowledge state), hangilerinde kavram yanılgısına (misconception) sahip olduğunu, öğrenme tercihlerini ve hatta bazen motivasyonel durumunu olasılıksal olarak tahmin etmeye çalışır. Uyarılmanın kalitesi, öğrenci modelinin hassasiyetine doğrudan bağlıdır.

**Öğretim Modeli (Pedagogical Model- "Nasıl Öğretilecek?"):** Öğretim modeli, sistemin "karar mekanizması" veya "öğretmen beyni"dir. Bu modül, Uzman Modeli (ulaşılması gereken hedef bilgi) ile Öğrenci Modeli (öğrencinin mevcut durumu) arasındaki farkı sürekli olarak analiz eder ve bu farkı kapatmak için en uygun pedagojik stratejiyi belirler. "Şimdi ne yapmalıyım?" sorusunun cevabı burada üretilir. Örneğin; öğrenci bir soruda zorlandığında ona doğrudan cevabı vermek yerine bir alt kavramla ilgili ipucu (scaffolding) sunmak, konuyu değiştirmek veya daha kolay bir örneğe geçmek gibi kararlar, öğretim modelindeki kural setleri veya makine öğrenmesi algoritmaları tarafından verilir.

- **Kullanılan YZ Algoritmaları:**

Bir önceki başlıkta açıklanan Üçlü Model, uyarlanabilir sistemin "anatomisini" oluştururken; bu modellerin içini dolduran, veriyi işleyen ve kararları üreten "fiziyojisi" veya "motoru" ise Yapay Zekâ algoritmalarıdır. Geleneksel yazılımların aksine, bu sistemler "if-then-else" gibi sabit kurallarla değil, veriyle beslendikçe öğrenen ve tahmin yeteneğini geliştiren olasılıksal ve istatistiksel modellerle çalışır. Disiplinler arası eğitimde kişiselleştirmeyi mümkün kılan üç temel algoritmik yaklaşım öne çıkmaktadır: Bilgi İzleme, Öneri Sistemleri ve Doğal Dil İşleme.

### **Bilgi İzleme (Knowledge Tracing - KT): Öğrenmeyi Modellemek**

Bilgi İzleme, bir öğrencinin zaman içindeki bilgi durumunun (knowledge state) değişimini, sadece performans verilerine (doğru/yanlış cevaplar) bakarak modelleme problemidir. Sistemin "Öğrenci Modeli"ni canlı tutan temel mekanizma budur. Bu alanda tarihsel olarak iki ana yaklaşım bulunur:

**Bayesian Knowledge Tracing (BKT):** 1990'lardan beri kullanılan bu klasik yöntem, her bir bilgi parçası (örneğin, "Pisagor Teoremi") için öğrencinin o bilgiyi bilip bilmediğini olasılıksal olarak modeller (Saklı Markov Modelleri - HMM). BKT, öğrencinin bir soruyu doğru cevaplamasını sadece "bilmesine" bağlamaz; "bilmeden tahmin etme" (guess) veya "bildiği halde hata yapma" (slip) ihtimallerini de hesaplamaya katar. Yorumlanması kolaydır ancak disiplinlerarası karmaşık ilişkileri modellemekte yetersiz kalabilir.

**Deep Knowledge Tracing (DKT):** Son yıllarda derin öğrenme (deep learning) devrimiyle ortaya çıkan DKT, öğrenme sürecini bir "zaman serisi" problemi olarak ele alır. Öğrenme, geçmişteki tüm etkileşimlerin birikimli bir sonucudur. Bu nedenle DKT, Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ve özellikle Uzun Kısa Dönemli Hafıza (LSTM) gibi, geçmiş veriyi "hatırlayabilen" yapılar kullanır. Bir LSTM ağı, öğrencinin 50 adım

önceki bir hatasını bile hafızasında tutup, bugünkü bir matematik problemini çözerken o geçmiş hatanın etkisini hesaba katabilir. Disiplinlerarası bağlamda DKT, farklı alanlar arasındaki gizli ve karmaşık bağlantıları (örneğin, bir öğrencinin fizik başarısının, haftalar önceki cebir performansı ile olan doğrusal olmayan ilişkisini) insan müdahalesi olmadan keşfedebilmesi açısından BKT'ye göre çok daha üstündür.

### **İçerik Öneri Sistemleri (Recommender Systems): Eğitimde "Netflix Etkisi"**

Öğretim Modeli'nin "sıradaki en iyi içerik nedir?" sorusuna cevap verirken kullandığı algoritmalar, popüler yayın platformlarının (Netflix, Spotify vb.) kullandığı teknolojilerle büyük benzerlik gösterir.

**İşbirlikçi Filtreleme (Collaborative Filtering):** "Bu filmi izleyenler şunu da beğendi" mantığının eğitime uyarlanmış halidir. Sistem, hedef öğrenciye benzer öğrenme davranışları (benzer konularda hata yapma, benzer hızda ilerleme vb.) gösteren diğer öğrencilerin verilerini analiz eder. Eğer "A Grubu" öğrenciler, "Vektörler" konusundan sonra "Matrisler" videosunu izlediğinde başarıları artmışsa, sistem benzer profildeki yeni bir öğrenciye de bu rotayı önerir.

**İçerik Tabanlı Filtreleme (Content-Based Filtering):** Bu yöntem, içeriğin kendisine ve meta verilerine odaklanır. Disiplinlerarası eğitimde kritik öneme sahiptir. Örneğin; sistem bir "Biyoinformatik" sorusunu, içerdiği "DNA dizileme (Biyoloji)" ve "Dizi algoritmaları (Bilgisayar)" etiketlerine göre analiz eder. Öğrenci bu soruda başarısız olursa, sistem sadece biyoloji değil, algoritma temelli içerikleri de tarayarak öğrencinin eksik olduğu spesifik disiplin bileşenini hedefleyen bir materyal önerir.

### **Doğal Dil İşleme (NLP) ve Büyük Dil Modelleri (LLM)**

Geleneksel sistemler genellikle çoktan seçmeli veya kısa cevaplı sorularla sınırlıydı. Ancak disiplinlerarası yetkinlikler (örneğin, bir mühendislik etiği vakasını yorumlamak veya bir kod bloğunun ne yaptığını açıklamak) genellikle açık uçlu yanıtlar gerektirir. Burada devreye, insan dilini anlama ve üretme yeteneğine sahip Büyük Dil Modelleri (Large Language Models- LLM'ler; örn: GPT, BERT tabanlı modeller) girer. YZ destekli modern platformlar, NLP sayesinde öğrencinin yazdığı bir kompozisyonu, bir projenin dokümantasyonunu veya bir koda yazdığı yorum satırlarını anlamsal olarak analiz edebilir. Sistem sadece cevabın doğruluğunu değil, öğrencinin argümantasyon kalitesini, kavramları doğru bağlamda kullanıp kullanmadığını değerlendirebilir ve standart bir "Yanlış" uyarısı yerine, "Kavramı doğru anlamışsın ancak ikinci örnekteki uygulaman hatalı, şu açıdan tekrar düşünmelisin" gibi, tıpkı bir insan öğretmenin vereceği türden, bağlamsal ve geliştirici geri bildirimler üretebilir.

### **DİSİPLİNLERARASI EĞİTİMDE UYARLAMA**

Yapay zekâ teknolojilerinin eğitimdeki teorik potansiyeli ile sınıf içi pratikler arasındaki uçurum, ancak doğru kurgulanmış "uyarlama stratejileri" ile aşılabılır. Disiplinler arası eğitim söz konusu olduğunda, bu stratejilerin sadece öğrencinin hızına değil, aynı zamanda disiplinler arasındaki bilişsel geçişlere de odaklanması gerekir. Birbiriyle konuşmayan akademik siloları (örneğin istatistik dersi ile programlama dersini) birleştirmek, sistemin bu disiplinler arasındaki anlamsal bağları tanıması ve öğrenciyi bu bağlar üzerinde dinamik bir şekilde yönlendirmesiyle mümkündür. Bu bölümde, YZ tabanlı platformların disiplinler arası entegrasyonu sağlamak için kullandığı üç temel strateji; Semantik Bilgi Grafikleri, Üretken YZ tabanlı Dinamik İçerik ve Derinlemesine Geri Bildirim Döngüleri üzerinden tartışılacaktır.

- **Semantik Bilgi Grafikleri (Knowledge Graphs) ile Disiplinleri Bağlamak**

Geleneksel Öğretim Yönetim Sistemleri (LMS), ders içeriklerini doğrusal ve birbirinden yalıtılmış modüller halinde saklar. Ancak disiplinler arası öğrenme, doğası gereği doğrusal değildir; ağ yapısındadır. Bu karmaşıklığı yönetmek için uyarlanabilir sistemler, Semantik Bilgi Grafikleri (Knowledge Graphs) kullanır. Bilgi grafikleri, eğitim müfredatındaki her bir kazanımı bir "düğüm" (node), bu kazanımlar arasındaki ilişkileri ise "kenar" (edge) olarak modeller.

Disiplinler arası bir bağlamda bu grafikler, tek bir dersin sınırlarını aşar. Örneğin, bir Veri Bilimi müfredatında, "Python Programlama" ve "İstatistik" disiplinleri aynı grafiğin parçalarıdır. Python dersindeki `pandas.mean()` fonksiyonu (düğüm A), İstatistik dersindeki "Aritmetik Ortalama" kavramına (düğüm B) "gerektirir" (requires) kenarı ile anlamsal olarak bağlıdır.

**Senaryo:** İskele Kurma (Scaffolding) Yöntemiyle Müdahale Sistemin gücü, öğrenci bir problemde takıldığında ortaya çıkar. Örneğin, öğrencinin Python kullanarak bir veri setinin standart sapmasını hesaplaması istensin. Öğrenci kodu yazmakta zorlanıyorsa, YZ algoritması öğrencinin hata örüntüsünü analiz eder. Eğer hata sözdiziminden (syntax) değil de kavramsal bir eksiklikten kaynaklanıyorsa; sistem grafik üzerindeki ilişkiyi takip ederek sorunun kök nedeninin Python değil, İstatistiksel bir kavram olan "Varyans" bilgisi olduğunu tespit eder.

Bu noktada sistem, "Tam Zamanında İyileştirme" (Just-in-Time Remediation) stratejisini devreye sokar. Python ders akışını geçici olarak durdurur ve öğrenciye İstatistik modülünden kısa, hatırlatıcı bir mikro-içerik sunar. Bu pedagojik müdahale, Vygotsky'nin "Yakınsal Gelişim Alanı" (ZPD) teorisine dayanan dijital bir "İskele Kurma" (Scaffolding) örneğidir (Vygotsky & Cole, 1978). Öğrenci, eksik olan teorik tuğlayı yerine koyduğunda, sistem onu tekrar asıl bağlamı olan kodlama ekranına döndürür. Böylece disiplinler arası geçiş, öğrenci için pürüzsüz ve tamamlayıcı bir deneyime dönüşür.

- **Dinamik İçerik Üretimi (GenAI) ve Bağlamsal Metaforlar**

Klasik uyarlanabilir sistemler, önceden hazırlanmış statik içerik havuzlarından seçim yapar (Select-and-Present). Ancak Üretken Yapay Zekâ (Generative AI) teknolojilerinin (GPT-4, Claude vb.) sisteme entegrasyonu, içeriğin öğrenci profiline göre anlık olarak "üretilmesini" (Generate-and-Present) mümkün kılmıştır. Bu yetenek, disiplinlerarası eğitimin en büyük zorluğu olan "bağlam kopukluğu" sorununa devrimsel bir çözüm sunar.

Farklı disiplinlerden gelen öğrencilerin zihinsel modelleri ve aşına oldukları terminolojiler farklıdır. Üretken YZ, aynı soyut kavramı, öğrencinin akademik geçmişine en uygun metafor ve örneklerle yeniden yazabilir. Bu, eğitimin "kişiye özel tercümesi"dir.

**Örnek Senaryo:** "Türev" Kavramının Bağlamsallaştırılması Sistemin, Matematiksel Modelleme dersinde "Türev" konusunu anlattığını varsayalım.

**Mühendislik Kökenli Öğrenci İçin:** Sistem, öğrenci profilindeki "Mühendislik" etiketini algılar ve üretken model şu içeriği oluşturur: "Türev, bir sistemin değişim hızıdır. Bir arabanın konum-zaman grafiğini düşündüğümüzde, türev size o andaki hızı (velocity), ikinci türev ise ivmeyi (acceleration) verir. Eğim arttıkça hız artar."

**İktisat/İşletme Kökenli Öğrenci İçin:** Sistem aynı matematiksel formülü korur ancak anlatı katmanını (narrative layer) tamamen değiştirir: "Türev, marjinal değişimi ifade eder. Bir üretim fonksiyonunda türev, Marjinal Maliyet (Marginal Cost) demektir; yani üretilen son birimin toplam maliyete etkisidir. Kâr maksimizasyonu için türevin sıfır olduğu noktayı ararız."

Bu strateji sayesinde, öğrenci yabancı olduğu bir kavramı (Türev), kendi uzmanlık alanının (Domain Expertise) tanıdık sularında öğrenir.

- **Kişiselleştirilmiş Geri Bildirim Döngüleri: Hata Analizinde Derinlik**

Standart testlerin en büyük zaafı, geri bildirim sığılıdır: "Yanlış Cevap, Doğrusu C şıkkı." disiplinler arası eğitimde ise bir hatanın nedeni çok katmanlı olabilir. Öğrenci soruyu anlamadığı için mi, yöntemi bilmediği için mi, yoksa sadece dikkatsizlikten mi yapamadı? YZ tabanlı sistemler, Doğal Dil İşleme (NLP) ve süreç madenciliği tekniklerini kullanarak hatanın "anatomisini" çıkarır.

Bu stratejide geri bildirim, not vermekten öte, öğretici bir diyalog aracıdır.

**Hata Sınıflandırması:** Sistem, öğrencinin cevabını analiz ederken hatayı kategorize eder: Kavramsal Yanılgı (Misconception), İşlem Hatası (Slip) veya Disiplinlerarası Transfer Hatası.

**Düzeltilici Yönlendirme:** Örneğin, bir Biyoinformatik projesinde öğrenci yanlış bir sonuç bulduysa, sistem şu şekilde derinlemesine bir geri bildirim üretebilir: "Kodunda kullandığın döngü mantığı (Python) doğru çalışıyor, tebrikler. Ancak analiz ettiğin gen dizisinin 'tamamlayıcı DNA' (Biyoloji) karşılığını almayı unuttun. Lütfen biyolojik kuralı kontrol edip kodu tekrar çalıştır."

Bu tür bir geri bildirim, öğrenciye sadece neyin yanlış olduğunu değil, hangi disiplindeki eksikliğin hataya neden olduğunu gösterir. Bu, öğrencinin üstbilişsel (metacognitive) farkındalığını artırır ve disiplinler arası sentez yapma becerisini geliştirir.

## **ZORLUKLAR, ETİK VE GELECEK PERSPEKTİFİ**

Disiplinler arası eğitimde YZ tabanlı uyarlanabilir sistemlerin sunduğu vaatler heyecan verici olsa da bu teknolojilerin kitlesel entegrasyonu beraberinde ciddi etik ikilemleri, yasal zorlukları ve pedagojik dönüşüm sancılarını getirmektedir. Eğitim teknolojileri literatüründe sıklıkla vurgulandığı üzere, her teknolojik çözüm yeni bir sorun setini de beraberinde getirir. Bu bölümde, YZ'nin eğitimde "her derde deva" (panacea) bir çözüm olarak görülmemesi gerektiği; aksine veri mahremiyeti, algoritmik adalet ve insan faktörü ekseninde dikkatle yönetilmesi gereken çift tarafı keskin bir kılıç olduğu tartışılacaktır.

- **Veri Mahremiyeti ve Güvenlik: Dijital Panoptikon Riski**

Uyarlanabilir öğrenme sistemlerinin yakıtı veridir. Sistemin bir öğrenciye "kişiselleştirilmiş" bir deneyim sunabilmesi için, o öğrenci hakkında mümkün olan en hassas veriyi (hangi saniyede videoyu durdurduğu, fare hareketleri, okuma hızı, hatta duygusal durum analizi için kamera verileri) toplaması gerekir. Bu durum, eğitim ortamını bir "veri madeni"ne dönüştürme riskini taşır.

**KVKK ve GDPR Uyumu:** Öğrenci verilerinin toplanması, saklanması ve işlenmesi, Avrupa Birliği'nde GDPR (Genel Veri Koruma Tüzüğü), Türkiye'de ise KVKK (Kişisel Verilerin Korunması Kanunu) kapsamında sıkı regülasyonlara tabidir. Ancak YZ algoritmaları, doğası gereği "kara kutu" (black box) gibi çalıştığından, verinin tam

olarak nasıl işlendiği ve bir karara varılırken hangi parametrelerin kullanıldığı konusunda "şeffaflık" ilkesiyle çatışabilir.

**Mülkiyet Sorunu:** Kritik bir etik soru şudur: "Öğrencinin dijital ikizi kime aittir?" Bu veriler öğrencinin kendisine mi, üniversiteye mi, yoksa platformu sağlayan ticari teknoloji şirketine mi aittir? Ticari şirketlerin bu verileri, öğrencinin gelecekteki istihdam edilebilirliğini puanlamak veya hedefli reklamcılık için kullanma riski (gözetim kapitalizmi), eğitimin ticari meta haline gelmesi endişesini doğurur. Akademik özgürlük ve mahremiyet, "sürekli izlenme" (digital panopticon) hissiyle zedelenmemelidir.

- **Algoritmik Önyargı (Bias) ve Dijital Eşitsizlik**

Yapay zekâ sistemleri tarafsız değildir; üzerinde eğitildikleri verilerin istatistiksel bir yansımasıdır. Eğer eğitim verileri tarihsel önyargıları içeriyorsa, YZ bu önyargıları öğrenir, pekiştirir ve hatta büyütürken yeniden üretir.

**Veri Seti Yanlılığı:** Disiplinlerarası eğitimde kullanılan modeller, genellikle belirli demografik grupların (çoğunlukla Batılı, eğitilmiş, sosyo-ekonomik düzeyi yüksek) verileriyle eğitilmektedir. Bu durum, farklı kültürel arka plana, dil yapısına veya öğrenme alışkanlıklarına sahip öğrencilerin sistem tarafından "başarısız" veya "anormal" olarak etiketlenmesine yol açabilir. Örneğin, bir YZ sistemi, standart dışı bir dil kullanan öğrencinin cevabını, içeriği doğru olsa bile dilbilgisi nedeniyle "yanlış" kabul edebilir.

**Matthew Etkisi:** Algoritmik önyargı, eğitimde "zenginlerin daha zenginleştiği" (Matthew Etkisi) bir döngü yaratabilir. Halihazırda avantajlı olan öğrencilere daha ileri düzey içerikler öneren sistem, dezavantajlı grupları sürekli temel seviyede tutarak aradaki makası kapatmak yerine açabilir. Bu nedenle, algoritmaların sadece "doğruluk" (accuracy) için değil, "adalet" (fairness) için de optimize edilmesi ve sürekli denetlenmesi gerekmektedir.

- **Öğretmenin Rolünün Dönüşümü: İkame Değil, Güçlendirme**

YZ'nin yükselişiyle birlikte eğitim camiasındaki en büyük korkulardan biri "öğretmensiz eğitim" distopyasıdır. Ancak bilimsel konsensüs, YZ'nin öğretmenin yerini almayacağı, aksine öğretmenin rolünü kökten değiştireceği yönündedir. Bu dönüşüm, "Bilgi Aktarıcısı" (Sage on the Stage) rolünden, "Öğrenme Tasarımcısı" ve "Mentor" (Guide on the Side) rolüne geçişi zorunlu kılar.

**Veri Yorumlayıcısı Olarak Öğretmen:** YZ, öğretmenin üzerinden not verme, devam takibi ve temel konu anlatımı gibi rutin ve zaman alıcı yükleri alır. Bu noktada öğretmenden beklenen, YZ'nin ürettiği karmaşık analitik raporları (dashboard) okuyabilmesi ve "Bu öğrenci neden burada takıldı?" sorusuna pedagojik bir yorum getirebilmesidir. Öğretmen artık bir veri okuyucusu olmalıdır.

**Mentorluk ve Sosyo-Duygusal Destek:** YZ bilişsel (cognitive) alanda mükemmel bir öğretici olabilir, ancak duygusal (affective) ve sosyal alanda insan öğretmenin yerini tutamaz. disiplinler arası eğitimde öğrencilerin yaşadığı motivasyon kaybı, gelecek kaygısı veya etik ikilemler karşısında onlara rehberlik etmek, empati kurmak ve ilham vermek tamamen insan öğretmenin sorumluluğundadır. Geleceğin eğitimi, "Yapay Zekâ + İnsan Öğretmen" iş birliğinin (Human-in-the-loop), tek başına YZ'den veya tek başına insandan daha üstün olduğu hibrit bir model üzerine kurulacaktır.

## SONUÇ

Eğitim tarihi, bilgiye erişimin demokratikleşmesi ile öğretimin kalitesi arasındaki sürekli gerilimin tarihidir. Bu çalışmada detaylandırıldığı üzere, Sanayi Devrimi'nin mirası olan standartlaştırılmış eğitim modeli, geniş kitlelere temel okuryazarlık kazandırmakta başarılı olmuşsa da, günümüzün karmaşık, disiplinler arası ve sürekli değişen yetkinlik ihtiyaçlarını karşılamakta yapısal olarak iflas etmiştir. Bölüm boyunca teorik çerçevesi çizilen Benjamin Bloom'un "2 Sigma Problemi" ve "Bilişsel Yük Kuramı", bize net bir gerçeği göstermektedir: Öğrenme, standart bir süreç değil, son derece bireysel ve dinamik bir bilişsel inşadır. Heterojen öğrenci gruplarına homojen bir müfredat dayatmak, sadece verimsizlik değil, aynı zamanda sistemsel bir eşitsizlik yaratmaktadır.

Bu bağlamda incelenen YZ tabanlı uyarlanabilir öğrenme platformları, sadece teknolojik birer araç seti (toolset) olarak değil, pedagojik birer paradigma değiştirici (game changer) olarak değerlendirilmelidir. Semantik bilgi grafikleri sayesinde disiplinler arasındaki görünmez duvarların yıkılması, üretken YZ (GenAI) ile içeriğin öğrencinin zihinsel modeline göre anlık olarak yeniden yazılması ve derinlemesine veri analitiği ile hatanın bir "öğrenme fırsatına" dönüştürülmesi; eğitimin "aktarım" odaklı yapısından "dönüşüm" odaklı yapısına geçişini simgelemektedir. Teknik bölümde ele alınan "Üçlü Model" (Uzman-Öğrenci-Öğretim) mimarisi, insan öğretmenin sezgisel ustalığını algoritmik bir kesinlikle modelleyerek, "her öğrenciye bir özel öğretmen" idealini ilk kez ütopya olmaktan çıkarmıştır.

Elbette, son bölümde tartışılan veri mahremiyeti, algoritmik önyargı ve öğretmen rolünün dönüşümü gibi riskler, bu sürecin teknolojik determinist bir körlükle yönetilmemesi gerektiğini hatırlatmaktadır. Teknoloji, pedagojinin önüne geçmemeli; aksine, öğretmeni rutin işlerden kurtararak ona asıl rolü olan "mentörlük" ve "ilham vericilik" alanını geri kazandırmalıdır.

Nihai olarak; disiplinler arası yetkinliklerin (örneğin bir tıp doktorunun veri bilimi, bir hukukçunun algoritma etiği bilmesi gibi) 21. yüzyılın temel okuryazarlığı haline geldiği bir dünyada, kişiselleştirilmiş eğitim artık seçkin bir azınlığa sunulan bir "lüks" veya "ayrıcılık" olmaktan çıkmıştır. Kitlesele eğitimde fırsat eşitliğini sağlamak, bilişsel aşırı yüklenmeyi önlemek ve insan potansiyelini maksimize etmek için YZ destekli uyarılama, artık epistemolojik ve toplumsal bir "zorunluluktur". Geleceğin eğitimi, standartları koruyanların değil, farklılıkları kucaklayarak kişiselleştirenlerin omuzlarında yükselecektir.

## KAYNAKÇA

- Abeln, S., Molenaar, D., Feenstra, K. A., Hoefsloot, H. C. J., Teusink, B., & Heringa, J. (2013). Bioinformatics and Systems Biology: Bridging the gap between heterogeneous student backgrounds. *Briefings in Bioinformatics*, 14(5), 589-598. <https://doi.org/10.1093/bib/bbt023>
- Aksenova, A. Yu., Zhuk, A. S., Stepchenkova, E. I., Semenikhin, V. A., & Langovoy, M. . (2025). A new era of bioinformatics. *Ecological genetics*, 23(2), 211-219. <https://doi.org/10.17816/ecogen637074>
- Benton, M. C. (2016). The End of Average: How to Succeed in a World That Values Sameness. *Quality Management Journal*, 23(2), 71-71. <https://doi.org/10.1080/10686967.2016.11918472>
- Campos, N., Corlu, C. G., Nogal, M., Juan, A. A., & Rivera, C. C. aliz. (2024). Simulation-based mathematical learning for higher education students from heterogeneous backgrounds. *J. Simulation*. <https://doi.org/10.1080/17477778.2024.2314716>

- Chipamaunga, S., & Prozesky, D. (2019). Addressing student diversity and integrative learning in an undergraduate medical curriculum. OALib. <https://doi.org/10.31730/osf.io/cbuvw>
- Hall, O. (2021). Achieving Bloom's Two-Sigma Goal Using Intelligent Tutoring Systems. Research Anthology on Business and Technical Education in the Information Era. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2245-5.ch009>
- Kabir, M., Zafar, A., Naz, Z., & Maqsood, F. (2025). The Role of Personalized AI-Based Learning Tools in Reducing Cognitive Overload and Enhancing Academic Motivation. Review of Applied Management and Social Sciences, 8(3), 1261-1275. <https://doi.org/10.47067/ramss.v8i3.544>
- Koć-Januchta, M. M., Schönborn, K. J., Roehrig, C., Chaudhri, V. K., Tibell, L. A., & Heller, H. C. (2022). "Connecting concepts helps put main ideas together": Cognitive load and usability in learning biology with an AI-enriched textbook. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 19(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s41239-021-00317-3>
- Lange, C. (2021). The relationship between e-learning personalisation and cognitive load. Open Learning: The Journal of Open, Distance and e-Learning, 38(3), 228-242. <https://doi.org/10.1080/02680513.2021.2019577>
- Leland, C. H., & Kasten, W. C. (2002). Literacy Education for the 21st Century: It's Time to Close the Factory. <https://doi.org/10.1080/105735602753386315>
- Leyzberg, D., Spaulding, S., & Scassellati, B. (2014). Personalizing robot tutors to individuals' learning differences. Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, 423-430. <https://doi.org/10.1145/2559636.2559671>
- Mazzocchi, F. (2019). Scientific research across and beyond disciplines. EMBO reports, 20(6). <https://doi.org/10.15252/embr.201947682>
- Ponce, M., Spence, E., van Zon, R., & Gruner, D. (2019). Bridging the Educational Gap between Emerging and Established Scientific Computing Disciplines. The Journal of Computational Science Education, 10(1), 4-11. <https://doi.org/10.22369/issn.2153-4136/10/1/1>
- Priemer, B., Eilerts, K., Filler, A., Pinkwart, N., R\ " osken-Winter, B., Tiemann, R. udiger, & Zu Belzen, A. U. (2019). A framework to foster problem-solving in STEM and computing education. Research in Science & Technological Education, 38(1), 105-130. <https://doi.org/10.1080/02635143.2019.1600490>
- Quinn, C. (2016). Debunking The Myth of the Average Learner: A review of The End of Average. eLearn, 2016(4). <https://doi.org/10.1145/2915136.2930809>
- Rosenberg-Kima, R. B. (2022). Computer Science Teacher Preparation to Address Bloom's 2 Sigma Problem in the Post-COVID19 Age. Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 2, 1027-1027. <https://doi.org/10.1145/3478432.3499241>
- Senge, P. M. (2014). Creating the Schools of the Future: Education for a Sustainable Society. İçinde Creating a Sustainable and Desirable Future (ss. 321-329). WORLD SCIENTIFIC. [https://doi.org/10.1142/9789814546898\\_0043](https://doi.org/10.1142/9789814546898_0043)
- Serafini, F. W. (2002). Dismantling the factory model of assessment. Reading & Writing Quarterly, 18(1), 67-85. <https://doi.org/10.1080/105735602753386342>
- Vorst, T. V. D., & Jelicic, N. (2019). Artificial Intelligence in Education: Can AI bring the full potential of personalized learning to education?"
- Vygotsky, L. S., & Cole, M. (1978). Mind in Society: Development of Higher Psychological Processes. Harvard University Press. [https://books.google.com.tr/books?id=RxjjUefze\\_oC](https://books.google.com.tr/books?id=RxjjUefze_oC)
- Wenger, E. (1987). Artificial Intelligence and Tutoring Systems. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-07697-9>
- Woolf, B. P. (2009). Building Intelligent Interactive Tutors. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373594-2.X0001-9>
- Wurzman, R. (2010). Inter-disciplinarity and constructs for STEM education: At the edge of the rabbit hole.

## BÖLÜM 9

### REKREASYON YÖNETİMİNDE YAPAY ZEKA KULLANIMI: AÇIK ALAN DENEYİMLERİNİN DÖNÜŞÜMÜ

*Ozan YILMAZ*

*Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi,  
Spor Bilimleri Fakültesi, Rekreasyon Bölümü  
ozan.yilmaz@yeniyuzyil.edu.tr  
0000-0001-5889-7365*

*Özlem GÖNÜL*

*Doktora Öğrencisi, Kocaeli Üniversitesi,  
Sosyal Bilimler Enstitüsü, Halkla İlişkiler ve Tanıtım ABD Doktora Pr.  
Müdür, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Sürekli Eğitim Merkezi  
ozlem.gonul@yeniyuzyil.edu.tr  
0009-0005-9613-3098*

Yapay zeka, açık alan rekreasyonunun planlanması, izlenmesi ve yönetilmesine ilişkin yaklaşımları köklü biçimde dönüştürerek rekreasyon yönetiminde giderek artan bir önem kazanmıştır. Özellikle öngörücü analitik, makine öğrenimi ve sensör tabanlı sistemlerin gelişimi, açık alanların kullanım biçimlerine ilişkin daha hassas, bütüncül ve gerçek zamanlı verilerin üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, rekreasyon yöneticilerinin yalnızca mevcut koşullara tepki veren değil, aynı zamanda geleceğe yönelik riskleri ve fırsatları öngörebilen daha proaktif yönetim stratejileri geliştirmesini mümkün kılmaktadır.

Açık alan rekreasyonunun izlenmesine yönelik geleneksel yöntemler patika kameraları, arazi gözlemleri ve hava fotoğrafları gibi geniş ölçekli ve çoğunlukla betimleyici veriler sunmaktadır. Buna karşılık Strava ve Wikiloc gibi uygulama tabanlı platformlar, ziyaretçi hareketliliğini mekansal ve zamansal açıdan daha ayrıntılı biçimde ortaya koyabilmektedir. Yapay zeka, bu farklı veri kaynaklarını bütünleştirerek büyük veri setlerini etkin biçimde analiz etmekte; kullanım örüntülerini belirlemekte ve gelecekteki rekreasyonel eğilimlere ilişkin öngörüler üretmek için izleme ve değerlendirme süreçlerinin etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Vilalta Capdevila ve ark., 2024).

Yapay zekanın açık alan rekreasyonuna katkısı yalnızca izleme ve analizle sınırlı kalmamaktadır. Bireysel tercihlerin, motivasyonların ve katılım davranışlarının analiz edilmesi yoluyla ziyaretçilere kişiselleştirilmiş etkinlik ve rota önerileri sunulabilmekte; bu sayede deneyim kalitesi, memnuniyet düzeyi ve katılım sürekliliği artırılmaktadır. Akıllı turizm uygulamaları kapsamında IBM Watson gibi yapay zeka sistemlerinin kullanımı, hizmet sunumunun otomasyonunu ve kişiye özel seyahat planlarının oluşturulmasını kolaylaştırarak farklı kullanıcı gereksinimlerinin maliyet etkin biçimde karşılanabileceğini göstermektedir (Ferràs ve ark., 2022). Bu bağlamda

yapay zeka, açık alan deneyimlerini standartlaştıran bir araç olmaktan ziyade, bireysel farklılıkları dikkate alan esnek bir deneyim tasarım mekanizması olarak öne çıkmaktadır.

Açık alan rekreasyon yönetimi bağlamında yapay zekanın bir diğer önemli katkı alanı ekolojik korumadır. Bitki hastalıkları, habitat bozulmaları ve çevresel stres göstergeleri gibi tehditlerin erken tespiti, yapay zeka destekli görüntü işleme ve sensör verileri sayesinde daha etkin biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum, rekreasyonel faaliyetler ile ekosistem bütünlüğü arasında denge kurulmasına katkı sağlamakta ve koruma odaklı yönetim yaklaşımlarını güçlendirmektedir (Almasoudi, 2024).

Yapay zekanın açık alan rekreasyonuna entegrasyonu, ziyaretçi deneyimlerinin erişilebilirliğini, güvenliğini ve kalitesini artırmanın ötesinde, karmaşık sosyo-ekolojik etkileşimleri dikkate alan sürdürülebilir kaynak tahsisini ve uyarlanabilir yönetim stratejilerini de desteklemektedir (Morse, 2020; Ferguson ve ark., 2022). Bununla birlikte veri gizliliği, algoritmik önyargılar ve teknolojik sistemlere aşırı bağımlılık gibi etik ve yönetsel sorunlar, yapay zekanın rekreasyon yönetiminde kullanımına ilişkin eleştirel bir değerlendirmeyi zorunlu kılmaktadır. Bu sorunların dikkate alınması, yapay zekanın sunduğu potansiyelin sorumlu ve dengeli biçimde hayata geçirilmesi açısından önemlidir.

Açık alan rekreasyonu; bireysel gelişim, iyi olma hali ve doğal ile kültürel çevrelerin keşfi açısından önemli bir işleve sahiptir. Psikolojik yenilenme, stresin azaltılması ve sosyal bağların güçlendirilmesi gibi kazanımlar sunan bu alanlar, aynı zamanda yoğun kullanım baskısı ve ekolojik hassasiyetler nedeniyle yönetsel zorluklar barındırmaktadır (Jenkins ve Pigram, 2006). Geleneksel rekreasyon yönetimi yaklaşımları, artan kullanım ile kaynakların korunması arasında denge kurma konusunda çoğu zaman sınırlı kalmıştır. Yapay zeka teknolojileri ise gelişmiş veri işleme ve örüntü tanıma yetenekleriyle bu uzun süredir devam eden sorunlara yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Yapay zekanın rekreasyon yönetimini dönüştürdüğü temel alanlardan biri risk öngörüsü ve güvenliğin artırılmasıdır. Değişken hava koşulları, karmaşık doğal ortamlar ve katılımcıların farklı deneyim düzeyleri, sezgiye dayalı geleneksel risk yönetimi yaklaşımlarının etkinliğini sınırlamaktadır. Yapay zekanın büyük veri setlerini analiz ederek potansiyel tehlikelere ilişkin erken uyarı sinyallerini tespit edebilme kapasitesi, açık alan sporları ve rekreasyonel faaliyetlerde güvenlik sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirmektedir (Li ve ark., 2024). Özellikle uzak ve erişimi zor alanlarda yapay zeka destekli dinamik izleme sistemleri, zamanında müdahale olanağı sunarak risk yönetimini güçlendirmektedir.

Yönetsel açıdan yapay zekanın, karar alma süreçlerinin daha şeffaf, adil ve veriye dayalı biçimde yürütülmesini desteklemektedir. Blokzincir gibi tamamlayıcı teknolojilerle birlikte kullanıldığında, güvenilir kayıt sistemleri ve paydaşlar arasında kapsayıcı kaynak paylaşımı sağlayarak ortak yönetim yaklaşımlarını güçlendirmektedir. Ayrıca yapay zekanın tabanlı analizler, ziyaretçi kullanım eğilimlerinin tahmin edilmesine, kaynakların daha etkin dağıtılmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına olanak tanımaktadır (Jacob ve ark., 2024).

Yapay zekanın katkıları ekolojik koruma boyutunda da belirginleşmektedir. İnsan-yaban hayatı etkileşimlerini ve habitat bozulmalarını azaltmaya yönelik yapay zekanın destekli mekansal analizler, erişim kısıtlamaları ve patika düzenlemeleri gibi yönetim kararlarının bilimsel temellere dayandırılmasını sağlamaktadır (Carter ve ark., 2017). Benzer şekilde makine öğrenimi tabanlı peyzaj tercih analizleri, kullanıcı beklentileri ile ekolojik gereklilikler arasında uyum sağlayan rekreasyon altyapısının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Lehto ve ark., 2024).

Buna ek olarak yapay zekanın, aşırı kullanım, plansız kamp alanlarının artışı ve ekolojik bozulma gibi sorunlara ilişkin erken uyarı işaretlerini tespit ederek proaktif müdahalelere imkan tanımaktadır. Bu veri temelli yaklaşımlar, doğal kaynakların korunmasını sağlarken gelecekteki kullanıcıların açık alanlara erişimini de güvence altına alan sürdürülebilir rekreasyon deneyimlerinin geliştirilmesini desteklemektedir (McCole ve ark., 2024).

Son olarak Yapay zekanın, rutin süreçlerin otomasyonu, öngörücü içgörülerin üretilmesi ve stratejik planlamanın desteklenmesi yoluyla rekreasyon yönetiminden sorumlu kurumların operasyonel verimliliğini ve yenilik kapasitesini artırmaktadır (Prorok, 2024). Henüz gelişim aşamasında olan bu teknolojiler, açık alan rekreasyon sistemlerinde iş birliği, paydaş katılımı ve sürekli iyileştirme açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Sonuç olarak yapay zekanın rekreasyon yönetimindeki dönüştürücü potansiyeli; karmaşık verileri bütünleştirme, kaynak kullanımını optimize etme, güvenliği artırma, ekolojik korumayı destekleme ve açık alan deneyimlerini kişiselleştirme kapasitesinde yatmaktadır. Yapay zeka ile rekreasyon yönetiminin kesişimi, insanın iyi olma hali ile ekosistem bütünlüğünü birlikte gözetken daha sürdürülebilir, adil ve nitelikli açık alan ortamlarının oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu bölümde, Yapay zekanın açık alan rekreasyon yönetimini nasıl şekillendirdiği ve insan-doğa etkileşimlerini nasıl dönüştürdüğü ele alınmaktadır.

### **Açık Alan Rekreasyonu ve Yapay Zeka Kavramları ve Önemi**

Rekreasyon, bireylere serbest zamanlarını değerlendirme sürecinde eğlence, dinlenme ve sosyal etkileşim yoluyla kendilerini yeniden yapılandırma olanağı sunan etkinlikler bütünü olarak tanımlanmaktadır (Kan Sönmez ve ark., 2025). Bu tanımlamadan hareketle, açık alan rekreasyonu; bireylerin doğal ya da açık çevrelerde, haz alma, fiziksel ve ruhsal sağlığı destekleme ve çevreyle etkileşim kurma amacıyla gerçekleştirdikleri serbest zaman etkinliklerini kapsamaktadır. İnsan ile çevre arasındaki etkileşimin temel alanlarından biri olan açık alan rekreasyonu, bireysel refahın artırılmasının yanı sıra toplumsal sağlık ve yaşam kalitesinin korunmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Nitekim COVID-19 pandemisi sürecinde açık alan etkinliklerinin stres düzeyini azalttığı ve günlük yaşamın sürekliliğine katkı sağladığı ortaya konulmuştur (Parkinson ve ark., 2025). Güncel yaklaşımlar, açık alan rekreasyonunu insan davranışları ile ekolojik süreçlerin zaman içinde karşılıklı olarak şekillendiği karmaşık sosyal-ekolojik sistemler çerçevesinde ele almaktadır. Bu çerçevede, rekreasyonel kullanımlar ile çevresel etkilerin birlikte yönetilmesine olanak tanıyarak sosyal bilimler ile ekoloji temelli kuramsal yaklaşımları bütünleştirmektedir (Morse, 2020).

Bireylerin açık alan rekreasyonuna katılım biçimleri, büyük ölçüde alanların mekansal özellikleri ve bu alanlara erişim kolaylığına bağlı olarak şekillenmektedir. Kentleşme süreci ve arazi kullanımındaki yoğunlaşma, nitelikli rekreasyon alanlarının azalmasına yol açmakta; bu durum bireylerin açık alan etkinliklerine katılım biçimlerini ve tercihlerini doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda katılımcı coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile makine öğrenmesi tekniklerinin birlikte kullanılması, kullanıcı tercihleri ile fiili kullanım davranışlarının eş zamanlı olarak analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. Yapılan çalışmalar, su temelli alanlar, rekreasyonel donatılar ve belirli orman tiplerinin tercih edildiğini; buna karşılık kentsel gürültüden ve genç orman alanlarından kaçınıldığını göstermektedir (Lehto ve ark., 2024). Ayrıca nüfus dağılımı, ulaşım erişilebilirliği ve alan konumunun birlikte modellenmesi, kentsel yeşil alan stratejilerinin daha etkin biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Jiao ve ark., 2015). Bununla birlikte, iklim değişikliği doğal kaynak yöneticileri açısından yeni risk ve belirsizlikler yaratmakta; değişen iklimsel koşullar altında açık alan rekreasyonunun sürdürülebilirliğini sağlamak için uyum stratejilerinin somut yönetsel uygulamalara dönüştürülmesini zorunlu kılmaktadır (O'Toole ve ark., 2019).

Davranışsal boyutta ise çevreye duyarlı ve sorumlu uygulamaları benimseyen rekreasyonel uzmanlaşma düzeyine sahip bireylerin, çevresel farkındalık ve koruma davranışlarının toplum geneline yayılmasına katkı sağlayabildiği ifade edilmektedir. Bu durum, açık alan rekreasyonunun yalnızca bireysel fayda üretmekle sınırlı kalmayıp çevresel sorumluluğu destekleyen bir araç olduğunu ortaya koymaktadır (Mateer ve ark., 2023). Kamu arazilerinde yürütülen rekreasyon yönetimi çalışmalarında sistem yaklaşımı, çok sayıda kurum ve paydaşın sürece dahil olduğu karmaşık yönetim yapılarını görünür kılmakta; ziyaretçi baskısı ve çevresel etkilerin yönetilmesi açısından bölgesel ölçekte iş birliğine dayalı planlamanın gerekliliğini vurgulamaktadır (Wheeler ve ark., 2025). Bu bağlamda, açık alan rekreasyonu yönetiminin mekansal, sosyal, ekolojik ve davranışsal boyutları birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşım gerektirdiğini göstermektedir.

Yapay zeka, öğrenme, akıl yürütme, problem çözme, yaratıcılık ve karar verme gibi insan zekasına özgü bilişsel süreçleri taklit edebilen veri temelli teknolojiler bütünü olarak tanımlanmaktadır (Jiang ve ark., 2022; Karşlı, 2024; Sevinç, 2025). Günümüzde yapay zeka; makine öğrenmesi, derin öğrenme, yapay sinir ağları ve büyük dil modelleri gibi bileşenler aracılığıyla özellikle üretken yapay zeka uygulamalarının temelini oluşturmaktadır (Kalota, 2024). Yapay zeka sistemleri, büyük ölçüde istatistiksel ilkelere dayanmakta ve güvenilir, tekrarlanabilir ve yorumlanabilir çıktılar elde edilebilmesi için insan-makine iş birliğini merkeze alan yaklaşımlar benimsenmektedir (Yu ve Kumbier, 2018).

Geleneksel yazılım ve donanım temelli yapay zeka yaklaşımlarının ötesinde, son yıllarda yeni paradigma arayışları dikkat çekmektedir. Kimyasal yapay zeka, insan zekasının moleküler ve biyokimyasal süreçler yoluyla taklit edilmesini amaçlamakta ve biyolojik ilkelere dayanarak alternatif zeka biçimlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Gentili ve Stano, 2023). Bununla birlikte, otonom yapay zeka ajanlarının ağ yapıları içerisinde birlikte çalışmasını öngören "Yapay Zeka Ajanları İnterneti" gibi yaklaşımlar; kenar bilişim, merkezizsiz mimariler ve blokzincir teknolojileri ile bütünleşerek gerçek zamanlı ve uyarlanabilir problem çözme süreçlerini desteklemektedir (Dazzi, 2025).

Yapay zekanın spor bilimleri, sağlık bilimleri, sosyal bilimler, eğitim bilimleri, deniz ve okyanus bilimleri, endüstriyel üretim, enerji sistemleri, tarım ve çevre bilimleri ile kent ve ulaşım planlaması gibi pek çok bilim dalında etkin biçimde kullanıldığı görülmektedir (Su Ling ve ark., 2025; Wang & Chu, 2024; Raveena & Rathod, 2024; Hamdaoui ve ark., 2024; Srikanth ve ark., 2024; Patil ve ark., 2024; Sarajevo ve ark., 2025; Chang ve ark., 2022; Jiang ve ark., 2017; Kavitha ve ark., 2023; Dong ve ark., 2022; Manoharan ve ark., 2024; Revathy ve ark., 2022; Dupare ve Sangole, 2024; Nandeeswara Rao ve ark., 2025; Kaur, 2025; Kan, 2025; Haupt ve ark., Mete, 2023; Özdemir, 2024; Çeber ve Bilbil, 2024; Omिताomu ve ark., 2025; Kaneti ve ark., 2025; Çavuş ve Sarıkaya, 2021; Özyılmaz-Misican ve Çavuş, 2023; Cheung, 2025; Susyanah ve Fajar, 2024). Örneğin, olimpiik spor branşlarında yapay zeka; egzersizlerin gerçek zamanlı izlenmesi, yorgunluğun öngörülmesi, hareket analizi ve sakatlık riskinin belirlenmesi süreçlerinde kullanılarak performansın en uygun düzeye çıkarılmasını mümkün kılmıştır (Shahid ve ark., 2025). Kardiyovasküler hastalıkların tanılanmasında makine öğrenmesi modellerinin kullanılması ya da okyanus gözlem sistemlerinde fiziksel verilerle yapay zeka temelli tahmin modellerinin bütünleştirilmesi bu duruma örnek teşkil etmektedir (Wieneke ve Voigt, 2023; Song ve ark., 2023). Özellikle tıbbi görüntüleme alanında konvolüsyonel sinir ağıları (CNN) kullanımı, mamografi gibi taramalarda insan uzmanlarla rekabet eden sonuçlar vermekte (Avanzo ve ark., 2024), yaşlı bakımında ise makine öğrenmesi algoritmaları hastalık erken teşhisi ve bireyselleştirilmiş sağlık takibinde kullanılmaktadır (Masoudi ve Sarbazi, 2024). Ayrıca yapay zeka destekli karar süreçlerinin güvenilirliğini artırmak amacıyla açıklanabilir yapay zeka yaklaşımları geliştirilmekte; bu yaklaşımlar özellikle endüstriyel uygulamalarda şeffaflık ve insan denetimini güçlendirmektedir (Moosavi ve ark., 2024). Yapay zeka teknolojileri eğitim alanında da teknoloji destekli öğrenme platformlarıyla entegre edilerek köklü bir dönüşüm sağlamıştır. Bu entegrasyon, eğitimsel zorlukların aşılmasında yenilikçi çözümler sunarken; özellikle yükseköğretimde öğrencilerin akademik performansını ve derse katılımını maksimize etmek adına yapay zeka destekli sanal öğrenme ortamlarının geliştirilmesine öncülük etmiştir. Böylece, öğrenme süreçlerinde etkileşim, motivasyon ve derin öğrenme kapasitesi artırılarak daha etkin bir eğitim deneyimi oluşturulmaktadır (Kustini ve ark., 2025; Rajabi, 2025). İnsan odaklı yapay zeka anlayışı ise etik uyum, yorumlanabilirlik ve toplumsal faydayı önceleyen sistemlerin önemini vurgulamaktadır (Maral, 2024; Li, 2025; Asil, 2025).

Rekreasyon bilimi ile yapay zeka arasındaki etkileşim, rekreasyon ve açık alan yönetimi alanlarında önemli araştırma ve uygulama fırsatları sunmaktadır. Yapay zeka, özellikle makine öğrenmesi ve veri analitiği teknikleri, rekreasyonel ziyaret yoğunluğunun tahmin edilmesi ve kullanıcı deneyimlerinin iyileştirilmesi açısından fayda sağlamaktadır. Örneğin, sosyal medya verilerinin istatistiksel ve makine öğrenmesi temelli modellerle birlikte kullanılması, kamusal alanlardaki ziyaretçi yoğunluğu ve hareket patternlerinin daha doğru ve dinamik biçimde analiz edilmesini mümkün kılmaktadır (Wood ve ark., 2020). Bu sayede, yönetim stratejileri veri odaklı hale gelerek, açık alanların etkin kapasite yönetimi ve kullanıcı memnuniyetinin artırılması hedeflenmektedir (Parlak yıldız ve Kül Avan, 2024). Ayrıca, yapay zeka destekli peyzaj tercih modellemeleri ve erişilebilirlik analizleri, rekreasyon alanlarının planlanmasında kullanıcı gereksinimlerinin ve mekansal adaletin dikkate alınmasına katkı sağlamaktadır (Lehto ve ark., 2024). Bu teknolojiler peyzaj sürdürülebilirliği

kapsamında, kullanıcıların tercihlerine göre kişiselleştirilmiş deneyimler sunmayı ve çevresel erişilebilirliği optimize etmeyi mümkün kılarak, rekreasyon alanlarının hem sosyal hem ekolojik açıdan dengeli gelişmesine zemin hazırlamaktadır (Perkumiené ve ark., 2025). Bu bağlamda yapay zeka, değişen çevresel ve toplumsal koşullara uyum sağlama kapasitesi sayesinde, açık alan rekreasyonunun daha esnek ve sürdürülebilir yönetilmesini destekleyen stratejik bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu teknolojilerin bir diğer önemli avantajı da, karmaşık sosyal-ekolojik sistemler içinde rekreasyonun dinamiklerini anlamada ve yönetmede sistem düşüncesi esaslı yeni yaklaşımlar geliştirmeye olanak vermesidir. Yapay zeka; ziyaretçi hareketleri, ekolojik etkiler ve sosyal etkileşimlerin eş zamanlı analizlerini kolaylaştırarak, çok disiplinli ve veri temelli karar verme süreçlerini beslemektedir (Morse, 2020). Böylece, rekreasyon alanlarında hem kullanıcı memnuniyeti hem de çevresel sürdürülebilirlik dengelenebilmektedir.

Sonuç olarak, rekreasyon bilimi ile yapay zeka entegrasyonu, kamusal alanlarda daha verimli ziyaretçi yönetimi, kullanıcı merkezli planlama ve sürdürülebilir çevresel uygulamalar geliştirmek için önemli fırsatlar sunmaktadır.

### **Açık Alan Rekreasyonunda Yapay Zekanın Rolü**

Yapay zeka, açık alan rekreasyonu yönetimi alanında dönüştürücü bir unsur olarak ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda yapay zeka temelli uygulamalar, yalnızca mevcut verilerin analiz edilmesiyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda geleceğe yönelik kestirimler üretebilen ve yönetsel karar alma süreçlerini destekleyen bütüncül sistemler olarak işlev görmektedir. Büyük ölçekli verileri işleme, öngörü üretme ve karar destek mekanizmaları geliştirme kapasitesi, çağdaş rekreasyon yönetimi anlayışlarının yeniden şekillenmesine katkı sağlamaktadır. Bu teknolojik yetkinlikler, özellikle güvenliğin artırılması, operasyonel etkinliğin geliştirilmesi ve ziyaretçi deneyiminin iyileştirilmesi açısından önemli olanaklar sunmaktadır (Jenkins & Pigram, 2006; Omar ve ark., 2025). Yapay zekanın sunduğu bu bütüncül yaklaşım, açık alan rekreasyonunun yalnızca kullanım odaklı değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve planlı biçimde yönetilmesine imkan tanımaktadır.

Mevcut akademik çalışmalar, yapay zeka teknolojilerinin açık alan rekreasyonu bağlamında giderek daha yoğun biçimde benimsendiğini ve bu teknolojilerin yönetim, planlama ve deneyim tasarımı süreçlerine bütüncül biçimde entegre edildiğini ortaya koymaktadır (Ivanova & Wald, 2023; Parlakyıldız & Kül Avan, 2024; Li ve ark., 2024; Bollenbach ve ark., 2024; Sönmez ve ark., 2025; Zawawi & Qi, 2025; Ryu ve ark., 2025). Özellikle yapay zeka ile Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) birlikte kullanıldığı çalışmalar, açık alan rekreasyonel turizm kapsamında bu teknolojilerin etkili olduğu çeşitli tematik alanları görünür kılmaktadır. Bu alanlar arasında güvenlik önlemlerinin güçlendirilmesi, ekosistemlerin izlenmesi, bireyselleştirilmiş rekreasyon deneyimlerinin tasarlanması, giyilebilir teknolojiler aracılığıyla sağlık takibi ve rekreasyonel olanakların çeşitlendirilmesi yer almaktadır. Yapay zekanın büyük hacimli verileri hızlı ve etkin biçimde analiz edebilme kapasitesi, doğa koruma süreçlerinde önleyici yaklaşımların benimsenmesini ve daha planlı, güvenli serbest zaman etkinliklerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Parlakyıldız ve Kül Avan, 2024).

Bu doğrultuda, açık alan sporlarında risk öngörüsü ve risk yönetimi yapay zekanın öne çıkan uygulama alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Dağcılık, kaya tırmanışı ve kayak gibi ekstrem sporlar; değişken hava koşulları, zorlu topoğrafik yapı ve çevresel belirsizlikler nedeniyle yüksek düzeyde risk içermektedir. Bu tür etkinliklerde, büyük ölçüde insan deneyimi ve sezgisine dayanan geleneksel risk yönetimi yaklaşımları çoğu zaman yetersiz kalabilmektedir. Yapay zeka teknolojileri ise gelişmiş veri işleme ve gerçek zamanlı analiz yetenekleri sayesinde risklerin önceden belirlenmesine, izlenmesine ve yönetilmesine olanak tanıyarak katılımcı güvenliğini artıran yenilikçi çözümler sunmaktadır (Li ve ark., 2024).

Yapay zekanın bir diğer önemli uygulama alanı alan uygunluğu ve mekansal planlamadır. Türkiye’de açık alan rekreasyon mekanlarının belirlenmesi ve geleceğe yönelik tahmin edilmesine odaklanan çalışmalarda, yapay zeka ve makine öğrenmesi temelli yaklaşımların yaygın biçimde kullanıldığı görülmektedir. Eğirdir ilçesinde gerçekleştirilen bir araştırmada, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile bütünleştirilmiş çok ölçütlü değerlendirme modelleri aracılığıyla açık alan rekreasyonu için uygun bölgeler belirlenmiştir. Arazi kullanımındaki zamansal dönüşümlerin alan uygunluğu üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiş; yapay zeka temelli analizlerin rekreasyon alanlarının planlanması ve yönetilmesinde etkili bir araç olduğu ortaya konmuştur (Dağıstanlı ve ark., 2018). Benzer şekilde, Türkiye’de kentsel orman rekreasyon alanlarının tahminine yönelik gerçekleştirilen bir başka çalışmada, yapay sinir ağları gibi ileri makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmış ve yüksek doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. Elde edilen bulguların, rekreasyonel alan planlaması ve kaynak yönetimi süreçleri açısından yol gösterici nitelik taşıdığı ifade edilmiştir (Özbalcı ve ark., 2024).

Açık alan rekreasyon alanlarında yapay zeka destekli akıllı gözetim ve izleme sistemleri, kamusal güvenliğin etkin biçimde sağlanmasına olanak tanımaktadır. Derin öğrenme temelli video analiz sistemleri, olağan dışı hareketleri ve potansiyel risk unsurlarını anlık olarak tespit edebilmekte; bu durum doğal ve rekreasyonel alanlarda güvenlik düzeyinin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Chandrasekara ve ark., 2023).

Bununla birlikte, yapay zeka teknolojileri açık alan rekreasyonuna ilişkin davranış örüntülerinin çözümlenmesinde de etkili biçimde kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi temelli modeller; rekreasyonel ziyaret yoğunluğu, mekansal dağılım ve erişilebilirlik gibi değişkenlerin eş zamanlı ve bütüncül olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. İsveç’te yürütülen bir çalışmada, yapay zeka destekli analizler kentsel gelişme sürecinin rekreasyon alanlarına erişim üzerinde yarattığı kısıtları ortaya koymuş ve mekansal erişilebilirliğin planlama süreçlerindeki belirleyici rolünü vurgulamıştır (Lehto ve ark., 2022). Bu tür analizler, politika yapımcılar ve planlamacılar için kamusal yararı önceleyen arazi kullanım kararlarının geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

Motivasyon ve çevresel davranış bağlamında ise yapay zeka temelli veri analitiği, açık alan rekreasyonunun bireylerin çevresel sorumluluk tutumları üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. COVID-19 pandemisi döneminde gerçekleştirilen bir araştırma, doğa temelli açık alan rekreasyonuna yönelik motivasyonun çevresel sorumluluk tutumları üzerinde aracılık edici bir rol üstlendiğini ortaya koymuştur. Yapay zeka destekli analizler, bireysel davranış

örüntülerinin ayrıntılı biçimde çözümlenmesini mümkün kılarak sürdürülebilir rekreasyonu teşvik etmeye yönelik sosyal pazarlama stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamıştır (Chi, 2022).

## **Sonuç ve Değerlendirme**

Bu bölümde literatür değerlendirmelerinden ele alınan bulgular ve sonuçlardan yola çıkarak, yapay zekanın açık alan rekreasyonunda yalnızca teknolojik bir yenilik olarak değil, rekreasyon yönetiminin planlama, uygulama ve değerlendirme aşamalarını bütüncül biçimde dönüştüren stratejik bir araç olarak konumlandığını ortaya koymaktadır. Yapay zeka; büyük ölçekli ve çok kaynaklı verileri işleyebilme kapasitesi sayesinde risk öngörüsü, mekansal uygunluk analizi, ziyaretçi davranışlarının çözümlenmesi ve çevresel etkilerin izlenmesi gibi alanlarda yönetsel karar alma süreçlerini güçlendirmektedir. Bu durum, açık alan rekreasyonunun güvenlik, erişilebilirlik ve deneyim kalitesi boyutlarının eş zamanlı olarak iyileştirilmesine olanak tanırken, aynı zamanda sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımların geliştirilmesini de desteklemektedir. Özellikle kamusal güvenliğin sağlanması, doğal kaynakların korunması ve rekreasyonel taleplerin dengeli biçimde yönetilmesi bağlamında yapay zeka temelli sistemler, sezgisel ve tepkisel yönetim anlayışlarının yerini veri temelli, öngörü odaklı ve kanıta dayalı yönetsel modellere bırakmasını mümkün kılmaktadır. Bu yönüyle yapay zeka, açık alan rekreasyonunu yalnızca kullanıcı odaklı bir etkinlik alanı olmaktan çıkararak, kamusal yarar, çevresel sorumluluk ve uzun vadeli planlama ilkeleri doğrultusunda ele alınması gereken dinamik bir yönetim alanı haline getirmektedir.

Bununla birlikte, yapay zeka uygulamalarının açık alan rekreasyonuna entegrasyonu, etik, mahremiyet ve veri güvenliği gibi konuların da bütüncül biçimde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Özellikle ziyaretçi hareketlerinin izlenmesi, davranışsal verilerin toplanması ve otomatik karar destek sistemlerinin kullanımı, şeffaflık, veri koruma ve kamusal denetim ilkeleri çerçevesinde değerlendirilmelidir. Bu nedenle politika yapıcılar ve uygulayıcılar için yapay zeka temelli rekreasyon yönetimi modellerinin yalnızca teknik yeterlilikler üzerinden değil, aynı zamanda etik yönetim ve sosyal kabul boyutlarıyla birlikte ele alınması önem taşımaktadır.

Gelecek araştırmaların, yapay zeka uygulamalarının açık alan rekreasyonu yönetiminde yarattığı dönüşümü disiplinlerarası yaklaşımlar çerçevesinde ele alması; bu dönüşümün ziyaretçi deneyimi, erişim eşitliği, çevresel taşıma kapasitesi ve iklim değişikliğine uyum süreçleri üzerindeki somut etkilerini incelemesi önem taşımaktadır. Özellikle yapay zeka temelli karar destek sistemlerinin farklı kullanıcı grupları üzerindeki etkilerinin, mekansal ve sosyal eşitsizlikleri azaltma ya da derinleştirme potansiyeli açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, yapay zekanın doğal alanlardaki ziyaretçi yoğunluğunu dengeleme, çevresel baskıları izleme ve iklim kaynaklı risklere karşı erken uyarı mekanizmaları geliştirme kapasitesi, ampirik çalışmalarla test edilmelidir. Bu çerçevede yapay zeka, uygun yönetim modelleri ve etik ilkelerle desteklendiğinde, açık alan rekreasyonunun daha sürdürülebilir, kapsayıcı ve değişen çevresel koşullara karşı daha dirençli bir yapıya kavuşturulmasında etkili bir araç olarak değerlendirilebilir.

**KAYNAKÇA**

- Almasoudi, N. M. (2024). Advancing Crop Health: The Role of Artificial Intelligence in Disease Management. *International Journal of Phytopathology*, 13(3), 267–279. <https://doi.org/10.33687/10.33687/phytopath.013.03.5526>
- Asıl, S. (2025). Yapay Zeka Etiği: Temel İlkeler, Sorunlar ve Disiplinlerarası Yaklaşımlar. *İnönü Üniversitesi İletişim Fakültesi Elektronik Dergisi (İNİF E-Dergi)*, 10(1), 152-175. <https://doi.org/10.47107/inifedergi.1605400>
- Bollenbach, J., Neubig, S., Hein, A., Keller, R., & Krcmar, H. (2024). Enabling active visitor management: local, short-term occupancy prediction at a touristic point of interest. *Information Technology & Tourism*, 26(3), 521-552.
- Carter, E., Eads, B., Attum, O., Hoffman, A., & Kingsbury, B. (2017). Reducing the Potential for Human–Snake Encounters in a Recreational Park. *Human–Wildlife Interactions*, 8(2). <https://doi.org/10.26077/ggt7-vr34>
- Chandrasekara, P. G. I. M., Chathurangi, K. A. A., Chathuranga, L. L. G., Rathnayaka, R. M. K. T., & Seneviratna, D. M. K. N. (2023). Intelligent Video Surveillance Mechanisms for Abnormal Activity Recognition in Real-Time: A Systematic Literature Review. *KDU Journal of Multidisciplinary Studies*, 5(1), 26–40. <https://doi.org/10.4038/kjms.v5i1.60>
- Chang, A., Moreno, T., Feaster, W., & Ehwerhemuepha, L. (2022). Towards Artificial and Human Intelligence in Hybrid Healthcare (pp. 7–16). *Springer*. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-04836-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-04836-4_2)
- Cheung, A. C. K. (2025). The Potential of Educational Agents for Generating New Possibilities of Education. *Science Insights Education Frontiers*, 28(2), 4633–4635. <https://doi.org/10.15354/sief.25.co477>
- Coelho Mollo, D. (2025). AI-as-exploration. *THEORIA. An International Journal for Theory, History and Foundations of Science*. <https://doi.org/10.1387/theoria.25837>
- Çavuş, V., Sarıkaya, M (2021). Yapay Sinir Ağları ve Güneş Enerji Sistemlerinde Uygulamaları. Volkan ÇAVUŞ (Ed.), *Yapay Zeka Uygulamalarında Güncel Konular ve Araştırmalar* içinde (ss. 7-22). Konya, Çizgi Kitabevi Yayınları.
- Çeber, B., & Bilbil, E. K. (2024). Yapay zeka uygulamalarının halkla ilişkilerde ideal kullanımına yönelik bir analiz. *Etkileşim*, (13), 110-141.
- Dağıstanlı, C., Turan, İ. D., & Dengiz, O. (2018). Evaluation of the suitability of sites for outdoor recreation using a multi-criteria assessment model. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(17). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3856-0>
- Dazzi, P. (2025). The Internet of AI Agents (IAIA): A New Frontier in Networked and Distributed Intelligence. *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 13(1). <https://doi.org/10.1007/s44227-025-00057-0>
- Dong, C., Zhou, S., Bethel, B. J., Han, G., Xu, G., & Xie, W. (2022). Recent Developments in Artificial Intelligence in Oceanography. *Ocean-Land-Atmosphere Research*, 2022. <https://doi.org/10.34133/2022/9870950>
- Dupare, Mr., & Sangole, Mr. (2024). AI-Powered Revolution: Transforming Industrial Production through Automation. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 76–78. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-17415>
- Ferguson, M. D., Barcelona, R. J., Knox, H., Caraynoff, A. R., Grosz, D., Ferguson, L. A., Evensen, D., & Pytlik, S. (2022). Whether They Return: Modeling Outdoor Recreation Behaviors, Decision Making, and Intention-to-Return in Congressionally Designated Wilderness. *Forests*, 13(7), 1018. <https://doi.org/10.3390/f13071018>
- Ferràs, X., Arimany-Serrat, N., Hitchen, E. L., & Tarrats-Pons, E. (2022). Smart Tourism Empowered by Artificial Intelligence. *Journal of Cases on Information Technology*, 22(1), 1–13. <https://doi.org/10.4018/jcit.2020010101>
- Gentili, P. L., & Stano, P. (2023). Tracing a new path in the field of AI and robotics: mimicking human intelligence through chemistry. Part I: molecular and supramolecular chemistry. *Frontiers in Robotics and AI*, 10(3). <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1238492>

- Hamdaoui, T., Ghouili, H., Ghennam, N., & Bouchouareb, R. (2024). Exploring the Integration and Implications of Artificial Intelligence Chatbots in the Realm of Sports Science Research, Training, and Rehabilitation. *Tunisian Journal of Sports Science and Medicine*, 2(3), 6–16. <https://doi.org/10.61838/kman.tjssm.2.3.2>
- Haupt, S. E., Marzban, C., Lakshmanan, V., Moninger, W., Gagne, D. J., Tissot, P., Williams, J. K., MCGovern, A., Hsieh, W. W., & Krasnopolsky, V. (2022). The History and Practice of AI in the Environmental Sciences. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(5), E1351–E1370. <https://doi.org/10.1175/bams-d-20-0234.1>
- Ivanova, I., & Wald, M. (2023). Recommender systems for outdoor adventure tourism sports: hiking, running and climbing. *Human-Centric Intelligent Systems*, 3(3), 344–365. <https://doi.org/10.1007/s44230-023-00033-3>
- Jacob, D. E., Jacob, I. D., Udofia, K. M., Daniel, K. S., Okweche, S. I., Dan, E. A., Evansly, P. U. (2024). Leveraging Blockchain and AI for Transparent and Equitable Protected Area and Recreation Co-Management. *Community and Ecology*, 2(2). <https://doi.org/10.59429/ce.v2i2.9939>
- Jenkins, J. M., & Pigram, J. J. (2006). Outdoor Recreation (pp. 363–385). palgrave macmillan uk. [https://doi.org/10.1057/9780230625181\\_22](https://doi.org/10.1057/9780230625181_22)
- Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S., ... & Wang, Y. (2017). Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. *Stroke and vascular neurology*, 2(4). <https://doi.org/10.1136/svn-2017-000101>
- Jiang, Y., Li, X., Luo, H., Yin, S., & Kaynak, O. (2022). Quo vadis artificial intelligence?. *Discover Artificial Intelligence*, 2(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s44163-022-00022-8>
- Jiao, X., Jin, Y., Gunawan, O., & James, P. (2015). Modelling Spatial Distribution of Outdoor Recreation Trips of Urban Residents. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 3(3), 36–49. [https://doi.org/10.14246/irspsd.3.3\\_36](https://doi.org/10.14246/irspsd.3.3_36)
- Kalota, F. (2024). A Primer on Generative Artificial Intelligence. *Education Sciences*, 14(2), 172. <https://doi.org/10.3390/educsci14020172>
- Kan Sönmez, N., Ünal, A., Karaçar, E., & Çilesiz, E. (2025). Impact of artificial intelligence models on recreation: Comparative analysis of ChatGPT and Gemini. *Technische Sicherheit*, 25(6), 635–646. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15734985>
- Kan, Y. (2025). AI for Environmental Sustainability: Advances, Challenges, and Future Directions. *International Journal of Artificial Intelligence for Science (IJAI4S)*, 1(1). <https://doi.org/10.63619/ijais.v1i1.006>
- Kaneti, V. R., Nagarajan, S., Yamini, B., Giriya, P., Adaikkammal, A., Siva Subramanian, R., & Anto Gracious, L. A. (2025). Smart Transportation Systems and Sustainable Urban Mobility (pp. 261–288). igi global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-1375-7.ch009>
- Karslı, T. A. (2024). Yapay Zeka ve Bilinç: Anlamsal ve Duygusal/Heyecansal Boyutları Üzerinden Bir Değerlendirme. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 13(4), 192–213. <https://doi.org/10.15869/itobiad.1517371>
- Kaur, A. (2025). Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) for Sustainable Agriculture. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 12(5), 470–476. <https://doi.org/10.51244/ijrsi.2025.12050040>
- Kavitha, M. S., Mariappan, M., Paul, A., Venmathi Maran, B. A., Jackson, A., & Manikandarajan, V. (2023). Artificial Intelligence Methods in Marine Biotechnology (pp. 339–354). springer nature singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-0624-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-99-0624-6_16)
- Kustini, S., Ningsih, R., Amelia, R., Amelia, R., & Mutammimah, H. (2025). Artificial Intelligence Driven Learning for Sustainable Education: An Empirical Investigation of Learners' Perceived AI Presences in Vocational Higher Education *International Seminar of Science and Technology*, 4, 25–36. <https://doi.org/10.33830/isst.v4i1.5224>
- Lehto, C., Filyushkina, A., Ranius, T., & Hedblom, M. (2024). Seeing through their eyes: Revealing recreationists' landscape preferences through viewshed analysis and machine learning. *Landscape and Urban Planning*, 248, 105097. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105097>

- Li, C. (2025). AI alignment is all your need for future drug discovery. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 8. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1668794>
- Li, J., Li, H., Liu, S., & Zhang, W. (2024). Research on risk prediction and management of outdoor sports based on artificial intelligence. *Journal of Human Movement Science*, 5(2). <https://doi.org/10.23977/jhms.2024.050207>
- Ling, S., Rui, S., & Wenshu, W. (2025). Research on the Application of Artificial Intelligence Technology in Sports Science. *Journal of Technology Innovation and Engineering*, 1(5). <https://doi.org/10.63887/jtie.2025.1.5.13>
- Manoharan, G., Nivedha, M., & Ashtikar, S. P. (2024). Harnessing the Power of Artificial Intelligence in Reinventing the Manufacturing Sector (pp. 113–137). igi global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2615-2.ch007>
- Maral, T. (2024). Sosyal Bilimlerin Kesişim Noktası: Yapay Zeka ve Etik. *Ankara Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi (Yapay Zeka ve Sosyal Bilimler Öğretimi)*, 17-33.
- Mateer, T. J., Lawson, D. F., Melton, T. N., Taff, B. D., Lawhon, B., Agans, J. P., Miller, Z. D., & Brasier, K. J. (2023). The Potential Pro-Environmental Behavior Spillover Effects of Specialization in Environmentally Responsible Outdoor Recreation. *Land*, 12(11), 1970. <https://doi.org/10.3390/land12111970>
- Mccole, D., Owens, T., Perry, E. E., Bobilya, A. J., & Janes, M. M. (2024). A Data-Based Discussion About Land Management Decisions That Limit Access to Protected Areas. *Journal of Outdoor Recreation, Education, and Leadership*. <https://doi.org/10.18666/jorel-2024-12508>
- Mete, M. H. (2023). Sosyal bilimlerde büyük veri analitiği, yapay zeka ve makine öğreniminin kullanımı. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 23(1), 99-120.
- Moosavi, S., Razavi-Far, R., Farajzadeh-Zanjani, M., Saif, M., & Palade, V. (2024). Explainable AI in Manufacturing and Industrial Cyber-Physical Systems: A Survey. *Electronics*, 13(17), 3497. <https://doi.org/10.3390/electronics13173497>
- Morse, W. C. (2020). Recreation as a Social-Ecological Complex Adaptive System. *Sustainability*, 12(3), 753. <https://doi.org/10.3390/su12030753>
- Nandeewara Rao, P., Maiti, S., & Ramakrishna, G. N. (2025). The Role of Artificial Intelligence in the Agriculture Sector in India: The Direction of Farming in the Future (pp. 19–31). *emerald*. <https://doi.org/10.1108/978-1-83662-570-420251003>
- O'Toole, D., Swanston, C. W., Janowiak, M. K., Brandt, L. A., Leopold, P. R., Handler, S. D., Shannon, P. D., Schmitt, K. M., & Ontl, T. A. (2019). Climate Change Adaptation Strategies and Approaches for Outdoor Recreation. *Sustainability*, 11(24), 7030. <https://doi.org/10.3390/su11247030>
- Omar, A. S., Nyachiro, A., & Obadiah, M. (2025). Leveraging AI and Automation in Research Project Planning and Execution: A Systematic Literature Review. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, XII(XV), 486–498. <https://doi.org/10.51244/ijrsi.2025.121500044p>
- Omitaomu, O. A., Mostafavi, A., Niu, H., & Randhawa, S. (2025). Urban-AI 2024 Workshop Report: The 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Advances in Urban-AI (Urban-AI 2024). *SIGSPATIAL Special*, 15(1), 5–8. <https://doi.org/10.1145/3757932.3757934>
- Özbalcı, M. C., Bilgin, T. T., & Dikici, S. (2024). Forecasting urban forest recreation areas in Turkey using machine learning methods. *Journal of Scientific Reports-A*, 058, 40–56. <https://doi.org/10.59313/jsr-a.1457140>
- Özdemir, O. (2024). Sosyal Bilimlerde Kullanılan Ölçme Araçlarının Yapay Zeka İle Değerlendirilmesi. *EĞİTİM & BİLİM 2024-II*, 87.
- Özyılmaz-Misican, D., Çavuş, V. (2023). İşsizlik Oranlarının Yapay Sinir Ağları ile Öngörüsü. *Disiplinlerarası Yapay Zeka Araştırmaları, Nobel Bilimsel Eserler*, Sy: 91-110.
- Parkinson, C., Shen, X., Macdonald, M., Logan, S. W., Gorrell, L., & Lindberg, K. (2025). Outdoor recreation's association with mental health and well-being during the COVID-19 pandemic. *PloS One*, 20(4), e0321278. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321278>

- Parlakayıldız, S., & Kül Avan, S. (2024). Artificial Intelligence and the Internet of Things in Recreation: A Systematic Literature Review. *Journal of Sport Sciences Research*, 9(3), 374-388. <https://doi.org/10.25307/jssr.1516895>
- Patil, V. S., Bhosale, S. P., Gaonkar, N. S., & Atkeere, U. U. (2024). Medical and pharmaceutical research using artificial intelligence. In *Futuristic trends in pharmacy & nursing (Vol. 3, Book 16, pp. 42-54)*. IIP Series. <https://doi.org/10.58532/V3BKPN16P1CH5>
- Perkumienė, D., Atalay, A., Šiliekienė, D., & Česonienė, L. (2025). Artificial Intelligence and Landscape Sustainability: Comparative Insights from Urban Sports and Recreation Areas in Turkey and Lithuania. *Land*, 14(12), 2330. <https://doi.org/10.3390/land14122330>
- Prorok, M. (2024). The development of artificial intelligence in organizational management. *Deliberationes*, 17(1), 95-105. <https://doi.org/10.54230/delib.2024.1.95>
- Rajabi, K. I. (2025). Beyond the LMS: How a Multi-Platform, AI-Enhanced Ecosystem Boosts Motivation, Interaction, Deep Learning, and Design Competence among Arabic-Speaking Graduate Students. *springer science business media llc*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7156104/v1>
- Raveena, M., & Rathod, L. L. (2024). Role of AI in talent identification and performance prediction in track and field. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*, 5(7SE). <https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v5.i7se.2024.5878>
- Revathy, G., Selvakumar, K., Murugapriya, P., & Ravikumar, D. (2022). Smart manufacturing in Industry 4.0 using computational intelligence (pp. 31-48). *crc*. <https://doi.org/10.1201/9781003335801-3>
- Ryu, S., Jung, S. H., Kim, G. H., & Lee, S. (2025). Visitor Number Prediction for Daegwallyeong Forest Trail Using Machine Learning. *Sustainability*, 17(13), 6061. <https://doi.org/10.3390/su17136061>
- Sarajevo, C., Sarajevo, S., & Herzegovina, B. (2025). Rewriting the Rules: How Artificial Intelligence (AI) is Reshaping Medical Science. *International Journal on Biomedicine and Healthcare*, 13(1), 80. <https://doi.org/10.5455/ijbh.2025.13.80-82>
- Sekti, B. A. (2025). Machine Learning and Artificial Intelligence (AI) in Manufacturing (pp. 255-292). *igi global scientific*. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-1082-4.ch011>
- Sevinç, H. G. (2025). Yönetimin Değişen Pradigması: Yapay Zeka Liderliği. *Liberal Düşünce Dergisi*(118), 89-116. <https://doi.org/10.36484/liberal.1542213>
- Shahid, D. S. A., Tabassam, M. R., Cheachi, D. C., Riaz, D. M., Gill, A., Gill, M. S. A., & Obayashi, D. T. (2025). Artificial Intelligence and Performance Analytics in Olympic Sports. *ACADEMIA International Journal for Social Sciences*, 4(4), 1825-1835. <https://doi.org/10.63056/acad.004.04.1032>
- Song, T., Meng, F., Sun, H., Hou, B., Xue, J., Xu, G., & Pang, C. (2023). A review of artificial intelligence in marine science. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1090185>
- Sönmez, N. K., Bilgiçli, İ., Çilesiz, E., Karaçar, E., & Karaköse, D. (2025). AI-Supported Participant Experience Management in Recreational Areas: The Case of Smart Parks. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 29(1), 312-323.
- Srikanth, K., Das, S., & Deb, M. (2024). Relevance Of Artificial Intelligence In Healthcare: An Exhaustive Review. *Educational Administration: Theory and Practice*. <https://doi.org/10.53555/kuey.v30i4.3048>
- Susyanah, S., & Fajar, A. (2024). The artificial intelligence, social sciences learning innovation catalyst. *International Conference on Applied Social Sciences in Education*, 1(1), 114-120. <https://doi.org/10.31316/icasse.v1i1.6845>
- Vilalta Capdevila, T., Mclellan, B. A., Loosen, A., Forshner, A., Pigeon, K., Jacob, A. L., Wright, P., & Ehlers, L. (2024). Advancements in monitoring: a comparison of traditional and application-based tools for measuring outdoor recreation. *PeerJ*, 12, e17744. <https://doi.org/10.7717/peerj.17744>
- Wheeler, I., Freimund, W., & Miller, A. (2025). Systems thinking for complex recreation management: a case study in Moab, Utah, USA. *Socio-Ecological Practice Research*, 7(2). <https://doi.org/10.1007/s42532-025-00219-y>

- Wieneke, H., & Voigt, I. (2023). Principles of artificial intelligence and its application in cardiovascular medicine. *Clinical Cardiology*, 47(1). <https://doi.org/10.1002/clc.24148>
- Wood, S. A., Lia, E. H., Milnor, A. A., Crowley, C. S. L., Winder, S. G., & White, E. M. (2020). Next-generation visitation models using social media to estimate recreation on public lands. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70829-x>
- Xiangyu Wang, Jun Chu, Y. R., Shaowei Wang,. (2024). Emerging Trends in Sports and Artificial Intelligence: A Scientometric Analysis in Citespace. *Journal of Electrical Systems*, 20(2), 1897–1910. <https://doi.org/10.52783/jes.1637>
- Yu, B., & Kumbier, K. (2018). Artificial intelligence and statistics. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 19(1), 6–9. <https://doi.org/10.1631/fitee.1700813>
- Zawawi, A. A., & Qi, O. S. (2025). Smart Recreation: Recreating Experiences with Artificial Intelligence. *Science Proceedings Series*, 6(1), 61-62. <https://doi.org/10.31580/5wp3p057>

# YAPAY ZEKA ÇALIŞMALAR

## EDİTÖRLER

Prof. Dr. Murat SARIKAYA  
Doç. Dr. Mustafa Kemal BALKİ  
Öğr. Gör. Volkan ÇAVUŞ