

DİJİTAL EKOSİSTEM VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEKNOLOJİ

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL



İKSAD
Publishing House

DİJİTAL EKOSİSTEM VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEKNOLOJİ

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL

YAZARLAR

Prof. Dr. Hakan DİLİPAK

Prof. Dr. Nurettin DOĞAN

Prof. Dr. Yunus KAYIR

Doç. Dr. Ömer ASAL

Doç. Dr. Volkan GÖREKE

Dr. Öğr. Üyesi Ece CANTEMİR

Dr. Öğr. Üyesi Vekil SARI

Dr. Burak AĞGÜL

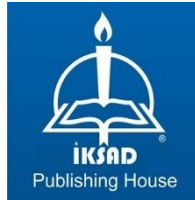
Öğr. Gör. Ahmet AYDIN

Öğr. Gör. Bilal İNAN

Öğr. Gör. Volkan CANTEMİR

Öğr. Gör. Dr. Hüseyin GÖKAL

Ömer Faruk ÜTÜK



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-465-2

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

DOĞAL DİL İŞLEME (NLP) VE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

Öğr. Gör. Volkan CANTEMİR.....5

BÖLÜM 2

FEDERATİF ÖĞRENME PARADİGMALARI: YATAY, DİKEY VE TRANSFER YAKLAŞIMLARININ MATEMATİKSEL TEMELLERİ VE UYGULAMALI ANALİZİ

Doç. Dr. Volkan GÖREKE

Dr. Öğr. Üyesi Vekil SARI.....21

BÖLÜM 3

BÜYÜK DİL MODELLERİ

Öğr. Gör. Ahmet AYDIN.....37

BÖLÜM 4

DERİN ÖĞRENME: KURAMSAL TEMELLER, MİMARİLER VE GÜNCEL UYGULAMALAR

Öğr. Gör. Bilal İNAN

Prof. Dr. Nurettin DOĞAN.....61

BÖLÜM 5

İNSAN BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ

Öğr. Gör. Ahmet AYDIN.....81

BÖLÜM 6

BLOK ZİNCİR TEKNOLOJİSİ: TEMELLER, UYGULAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Dr. Burak AĞGÜL.....101

BÖLÜM 7

ENDÜSTRİ 4.0 VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: AKILLI FABRİKALAR VE TOPLUM 5.0

Dr. Öğr. Üyesi Ece CANTEMİR.....119

BÖLÜM 8

GELECEĞİN BİLİŞİM TRENDLERİ BİYOTEKNOLOJİ, ROBOTİK, İNSAN-MAKİNE BİRLEŞİMİ

Öğr. Gör. Dr. Hüseyin GÖKAL.....137

BÖLÜM 9

TÜRKİYE METAL SANAYİİNDEKİ İŞ KAZALARININ ANALİTİK DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAPAY ZEKA DESTEKLİ YAKLAŞIMLAR

Ömer Faruk ÜTÜK

Doç. Dr. Ömer ASAL

Prof. Dr. Yunus KAYIR

Prof. Dr. Hakan DİLİPAK.....155

ÖNSÖZ

Dijital Ekosistem ve Sürdürülebilir Teknoloji, salt teknolojik yenilik listesi değil; insanı, etiği ve sürdürülebilirliği merkeze alan bütüncül bir bakışın davetidir. Bu kitap, kuramsal temeller ile uygulamalı örnekleri buluşturarak, bugün hızla evrilen yapay zekâ ekosistemini, dijital dönüşüm süreçlerini ve toplumsal etkilerini aynı çatı altında ele alıyor. Amacımız, yalnızca “neleri yapabiliyoruz?” sorusuna değil, “neden yapmalıyız, nasıl yapmalıyız ve kimin için?” sorularına da tutarlı yanıtlar önermek.

İlk bölüm kümesi, günümüz bilişim bilimlerinin omurgasını oluşturan alanlara odaklanıyor: **Doğal Dil İşleme (NLP) ve Yapay Zekâ Uygulamaları, Büyük Dil Modelleri ve Derin Öğrenme** başlıkları; dilin biçimsel temsillerinden olasılıksal modellemeye, derin mimarilerin kuramsal dayanaklarından güncel kullanım senaryolarına uzanan bir çerçeve sunuyor. Bu eksende **Federatif Öğrenme Paradigmaları**; yatay, dikey ve transfer yaklaşımlarının matematiksel temellerini ve mahremiyet korumalı öğrenmenin pratik nüanslarını görünür kılarak, veri yönetişi ve güvenilir yapay zekâ için kritik bir yol haritası oluşturuyor. **İnsan-Bilgisayar Etkileşimi** bölümü ise, teknolojinin nihai ölçütünün “kullanılabilirlik ve insan deneyimi” olduğunu hatırlatıyor; tasarım ilkeleri ve etik standartlarla performans ölçütlerinin nasıl dengelenebileceğini tartışıyor.

İkinci eksen, altyapı ve dönüşüm odaklı başlıklar yer alıyor: **Blok Zincir Teknolojisi** bölümü, dağıtık defter yapısı, mutabakat algoritmaları ve akıllı sözleşmelerin yanı sıra finans, tedarik zinciri ve sağlık gibi kritik uygulamaları ele alıyor. Ölçeklenebilirlik, enerji tüketimi ve hukuki belirsizlikler gibi zorlukları tartışırken; Web3, DAO ve NFT gibi yükselen trendlerle geleceğin dijital ekosistemine yön veren perspektifler sunuyor. **Endüstri 4.0 ve Dijital Dönüşüm: Akıllı Fabrikalar ve Toplum 5.0** bölümü; siber-fiziksel sistemler, otonom üretim ve veri odaklı karar destek mekanizmalarının sanayi ve toplum ekosistemlerinde nasıl değer ürettiğini somut örneklerle inceliyor. Bu yaklaşım, yalnızca üretim verimliliği değil; esneklik, güvenlik, sürdürülebilirlik ve insan refahı boyutlarını birlikte düşünmeyi teşvik ediyor.

Ufuk taraması niteliğindeki **Geleceğin Bilişim Trendleri** bölümünde; **biyoteknoloji, robotik ve insan-makine birleşimi** başlığı, disiplinler arası kavrayış gerektiren kırılma noktalarını işaret ediyor. Burada, nöro-teknolojik

arayüzlerden biyo-bilgi işlem kavramına kadar pek çok yenilikte etik çerçeve, standartlar ve toplumsal kabulün belirleyici olduğunun altı çiziliyor. Bu hassas denge, ilerlemenin hızını değil, yönünü doğru belirlemenin önemini vurguluyor.

Son olarak, **Türkiye metal sanayiindeki iş kazalarının analitik değerlendirilmesi ve yapay zekâ destekli yaklaşımlar** bölümü, yerel bağlamda yüksek katma değer ve acil ihtiyaç barındıran bir soruna çözüm odaklı bilişim perspektifi getiriyor. Öngörücü analiz, risk profil çıkarımı ve erken uyarı sistemleri; iş sağlığı ve güvenliği kültürünün güçlendirilmesiyle birleştiğinde, teknolojinin en somut toplumsal faydalarından birine dönüşüyor.

Bu kitap, lisansüstü öğrencilerden araştırmacılara, mühendislerden politika yapıcılara uzanan geniş bir okur kitlesine hitap etmektedir. Bölümler, kuramsal temelleri berrak biçimde ortaya koyarken; uygulama örnekleri, yöntem karşılaştırmaları ve saha odaklı çıkarımlarla okura “nasıl” ve “neden” sorularının birlikte yanıtlandığı bir okuma deneyimi sunuyor. Editoryal tercihimiz, disiplinler arası diyalogu güçlendirmek; teknik derinliği insan merkezli amaçlarla buluşturmak ve sürdürülebilir bir teknoloji tasavvuruna katkı vermektir.

Bu kitabın içeriği, katkı sunan yazarlar tarafından hazırlanmış olup her türlü bilgi, kaynak ve sorumluluk yazarların kendilerine aittir. Yazarlar, çalışmalarını ve araştırmalarını kaynak göstererek özgün ve güvenilir bir içerik sunmaya özen göstermiştir. Kitabın her bir bölümü, ilgili uzmanlık alanında deneyimli isimler tarafından bilimsel kaynaklara dayalı olarak hazırlanmıştır. Bu nedenle, sunulan bilgilerin doğruluğu ve güvenilirliği yazarlar tarafından sağlanmaktadır.

Ayrıca, kitapta ifade edilen fikirler ve görüşler, yazarların araştırmalarına dayalı kişisel değerlendirmeleridir; editör veya yayınevinin resmi görüşlerini yansıtmaz. Editör ve yayınevi, içerik oluşturma ve düzenleme sürecinde rehberlik etmiş olabilir; ancak kitapta yer alan her fikir ve yorum yazarlara aittir.

Bu kitap projesi, yoğun emek ve özveri gerektiren bir sürecin sonucunda ortaya çıkmıştır. Yazarlar, uzmanlık alanlarındaki bilgi ve deneyimlerini paylaşarak teknik bilgiye katkı sağlamışlardır. Ayrıca, İKSAD Yayınevi’nin desteği bu çalışmanın yayımlanmasını mümkün kılmıştır. Profesyonellikleri ve sağladıkları katkılar için İKSAD Yayınevi’ne en içten teşekkürlerimizi sunarız.

Katkı sunan tüm yazar ve hakemlere, bilimsel titizlikleri ve üretken paylaşımları için teşekkür ederiz. Dijital Ekosistem ve Sürdürülebilir Teknoloji ,ortak aklın ve sorumluluk bilincinin eseri olarak hem bugünün sorunlarına çözüm üretmeyi hem de yarının olanaklarını etik ve kapsayıcı bir çerçevede keşfetmeyi amaçlıyor. Dilerim bu kitap, yeni projelere, disiplinler arası işbirliklerine ve nitelikli tartışmalara kapı aralar.

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL
Editör

BÖLÜM 1

DOĞAL DİL İŞLEME (NLP) VE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

Öğr. Gör. Volkan CANTEMİR¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17979694>

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Sakarya, Türkiye.
volkancantemir@subu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-6632-8151

1. GİRİŞ

21. yüzyılın dijitalleşme süreci, insan-makine etkileşimini daha doğal, etkili ve hızlı hâle getirme ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Bu gereksinimin sonucu olarak, Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing – NLP), insanların günlük hayatta kullandıkları dili bilgisayarların anlayabileceği biçime dönüştürmeyi amaçlayan çok disiplinli bir yapay zekâ alanı olarak öne çıkmaktadır (Güner, 2023). Dilin yapısal ve anlamsal yönlerini analiz ederek makinelerin insan diliyle etkileşime geçmesini sağlayan Doğal Dil İşleme (NLP), günümüzde birçok teknolojik uygulamanın temelini oluşturmaktadır.

NLP; dil bilimi, bilgisayar bilimi ve yapay zekânın kesişim noktasında konumlanmakta olup, özellikle son yıllarda yaşanan derin öğrenme temelli gelişmelerle birlikte önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Geleneksel kural tabanlı sistemlerden istatistiksel modellere ve derin öğrenme tabanlı dil modellerine evrilen bu süreç, insan dilinin karmaşıklığını daha yüksek doğruluk oranlarıyla işleyebilen sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Bugün GPT-5 gibi üretici dil modelleri, yalnızca metni anlamakla kalmayıp yaratıcı içerikler üretme, sorulara anlamlı yanıtlar verme ve çok dilli metinlerde yüksek başarıyla çalışabilme yeteneğine sahiptir.

Bu çalışmada, Doğal Dil İşlemenin teorik temelleri ile çağdaş uygulamaları ele alınmıştır. Öncelikle NLP'nin tarihsel gelişimi anlatılmış sonrasında sırasıyla NLP'nin temel kavramları ve bileşenleri detaylandırılmıştır. Ardından chatbotlar, sesli asistanlar ve dil modelleri gibi güncel kullanım örnekleri incelenmiştir. Takip eden kısımda, günümüzün önde gelen NLP modelleri olan GPT-5, BERT ve DALL·E gibi yapılar teknik özellikleriyle birlikte ele alınmıştır. Son olarak ise, NLP alanında karşılaşılan etik sorunlar ve bu teknolojinin geleceğine ilişkin öngörüler tartışılmaktadır.

NLP'nin gelişimi, yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda bireylerin ve toplumların bilgiye erişim biçiminde köklü bir değişimi de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda çalışma, NLP'nin akademik ve pratik yönlerini bir araya getirerek kapsamlı bir bakış açısı sunmayı hedeflemektedir.

2. DOĞAL DİL İŞLEMENİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Doğal Dil İşleme (NLP) alanının gelişimi, farklı kuramsal yaklaşımlar ve teknolojik yeniliklerin ortaya çıkmasıyla birlikte önemli bir evrim sürecine sahne olmuştur. Bu sürecin başlangıcı, 1950'li yıllara kadar uzanmakta olup,

Alan Turing'in "Computing Machinery and Intelligence" (Bilgi İşlem Makineleri ve Zekâ) başlıklı makalesi bu alandaki dönüm noktalarından biri olarak kabul edilmektedir. Turing, söz konusu çalışmasında "Makineler düşünebilir mi?" sorusunu ortaya atarak yapay zekâ araştırmalarında yeni bir dönem başlatmış ve daha sonra kendi adıyla anılan Turing Testi'ni geliştirmiştir (Kuşçu, 2015). Bu testin temel amacı, bir kişinin ekran aracılığıyla yazılı olarak yönelttiği sorulara verilen yanıtlar üzerinden karşısındakinin insan mı yoksa makine mi olduğunu ayırt etmesidir. Eğer bu ayırım yapılamıyorsa, ilgili sistemin "zeki" bir makine olarak değerlendirilebileceği öngörülmektedir. Turing'in ortaya koyduğu bu teorik çerçeveyi takip eden yıllarda, 1954 yılında gerçekleştirilen Georgetown Deneyi, NLP tarihinde uygulamalı anlamda önemli bir kilometre taşı olarak kabul edilir. Bu deneyde, yalnızca altı gramer kuralı kullanılarak 60'tan fazla Rusça cümle, tam otomatik biçimde İngilizceye çevrilmiş ve bu başarı, makine çevirisi alanında büyük bir ilerleme olarak değerlendirilmiştir (Yılmaz, 2023). Bunu izleyen dönemde, 1964-1966 yılları arasında geliştirilen ELIZA adlı program, doğal dil işleme sistemlerinin ilk örneklerinden biri olarak literatürde yerini almıştır. ELIZA, önceden tanımlanmış kural dizileri aracılığıyla insanlarla metin tabanlı diyalog kurabilme yeteneğine sahip olacak şekilde tasarlanmış ve insan-bilgisayar etkileşiminin simülasyonu açısından önemli bir katkı sunmuştur (Arslan, 2020). Tüm bu öncü çalışmaların ardından, 2010'lu yıllarda derin öğrenme tabanlı yaklaşımların (örn. RNN, Transformer, BERT, GPT) yaygınlaşmasıyla birlikte NLP sistemlerinin başarısı çarpıcı biçimde artmış ve çok daha doğal, bağlama duyarlı ve öğrenen yapılar geliştirilmiştir.

3. DOĞAL DİL İŞLEMENİN TEMELLERİ

Doğal Dil İşleme (NLP), insanların günlük yaşamda kullandığı doğal dili anlamak, analiz etmek ve üretmek amacıyla geliştirilen algoritmalar bütünüdür (Adalı, 2016). Bu alan, yalnızca dilin yüzeysel yapısıyla değil, aynı zamanda anlam düzeyinde işlenmesiyle de ilgilenir. NLP sistemlerinin başarısı, dilin yapısal özelliklerini doğru biçimde analiz edebilmesine bağlıdır. Bu nedenle NLP'nin temelleri, dilbilimsel analiz süreçleri, veri ön işleme teknikleri ve dil modelleme yaklaşımları gibi birçok alt bileşeni kapsamaktadır.

3.1.Dilbilimsel Analiz

NLP'nin en temel yapı taşlarından biri, dilbilgisel çözümlemelerdir. Bu çözümlemeler çeşitli düzeylerde gerçekleştirilir:

- **Morfolojik Analiz:** Kelimelerin kök, ek ve biçim bilgisi üzerinden çözümlemesidir. Türkçede eklemeli dil yapısı nedeniyle bu analiz, anlamlı birimler arası ilişkileri belirlemek açısından oldukça önemlidir (Karaca & Bayır, 2024).
- **Sözdizimsel Analiz:** Bir cümledeki yapısal bileşenlerini inceleyen ve kelimeler arasındaki gramer ilişkilerini belirleyen dilbilimsel bir süreçtir. Bu analiz, cümle içindeki sözcüklerin diziliş sırasını ve aralarındaki sözdizimsel bağlantıları ortaya koyar. Temel olarak özne, yüklem, nesne gibi dilin temel öğeleri arasındaki ilişkileri tanımlar ve cümle yapısının dilbilgisi kurallarına uygunluğunu değerlendirir (Coşar, 2025). Sözdizimsel analiz, özellikle doğal dil işleme (NLP) uygulamalarında metnin biçimsel yapısının anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir.
- **Anlamsal (Semantik) Analiz:** Dilin içeriğine ve anlam boyutuna odaklanan bir doğal dil işleme sürecidir. Bu süreçte, kelimelerin ve cümlelerin taşıdığı anlamlar çözümlemeye tabi tutulur; bağlam içerisindeki anlam ilişkileri ve sözcüklerin çok anlamlılığı gibi semantik belirsizlikler giderilmeye çalışılır. Anlamsal analiz yalnızca kelime düzeyindeki anlamları değil, aynı zamanda ifadeler arası anlamsal tutarlılığı ve bağlamsal bütünlüğü de dikkate alır. Bu sayede, metnin yüzeysel yapısından öteye geçilerek derin anlam yapısına ulaşılır. Doğal dil işleme sistemlerinde anlamsal analiz, bilgi çıkarımı, soru-cevap sistemleri, anlamsal arama motorları ve diyalog sistemleri gibi uygulamaların temel bileşenlerinden biri olarak kritik bir rol üstlenmektedir.

3.2.Verİ Ön İşleme

Doğal dil işleme süreçlerinde kullanılan ham metin verileri, çoğunlukla doğrudan analiz ve modelleme için uygun değildir. Bu nedenle, metnin istatistiksel ya da anlamsal olarak işlenebilir bir yapıya kavuşması amacıyla çeşitli ön işleme (preprocessing) adımları uygulanmaktadır. Bu adımlar, metindeki gereksiz öğelerin temizlenmesini ve verinin daha düzenli,

yapılandırılmış bir hâle getirilmesini sağlar (Kontuk & Turan, 2020). Başlıca ön işleme adımları aşağıda açıklanmıştır:

- **Küçük harfe dönüştürme:** Metindeki tüm karakterlerin küçük harfe dönüştürülmesi, büyük/küçük harf farklılıklarından kaynaklanabilecek anlamsal ayrışmaların önüne geçer (Kına & Biçek, 2023). Örneğin “Kitap” ve “kitap” kelimeleri, semantik olarak aynı anlamı taşımasına rağmen sistem tarafından farklı olarak algılanabilir. Bu dönüşüm, metni sadeleştirerek daha tutarlı bir analiz ortamı sağlar.
- **Noktalama işaretlerinin temizliği:** Noktalama işaretleri genellikle metnin anlamsal içeriğine doğrudan katkı sağlamaz. Bu nedenle, veri setinden nokta, virgül, ünlem gibi işaretlerin temizlenmesi, kelime bazlı analizlerin daha doğru bir şekilde yapılabilmesini kolaylaştırır. Ancak bazı bağlamsal durumlarda (örneğin: soru cümleleri, duygusal tonlama) bu işaretlerin anlam taşıyabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.
- **Tokenization (Kelimeleme):** Tokenization, ham metnin daha küçük ve anlamlı parçalara bölünmesi işlemidir. Bu işlem genellikle kelime, cümle veya karakter bazında gerçekleştirilir. Amaç, metni işlemeye uygun birimlere ayırarak sonraki aşamalarda bu birimlerin analizini mümkün kılmaktır (Balcıoğlu, 2024). Örneğin, "Doğal dil işleme önemlidir." cümlesi tokenization işlemine tabi tutulduğunda ["doğal", "dil", "işleme", "önemlidir"] gibi bir diziye dönüşebilir.
- **Stop Word:** Doğal dilde sıklıkla kullanılan ancak taşıdıkları anlamsal değer düşük olan kelimeler, "stop words" olarak adlandırılır. Türkçede "ve", "ile", "bu", "gibi", "da" gibi kelimeler bu gruba dâhildir. Bu kelimeler, çoğu zaman metnin genel içeriğine katkı sunmadığından çıkarılırlar (Baştürk & Onan, 2025). Böylece modelin yalnızca anlam açısından önemli kelimelere odaklanması sağlanır.
- **Stemming ve Lemmatization:** Bu işlemler, kelimeleri kök ya da temel biçimlerine indirgemeyi amaçlar. Ağralı ve Aydın (2021) Stemming ve Lemmatization kavramlarını şu şekilde açıklar:
 - **Stemming,** kelimenin eklerini keserek daha basit bir biçime dönüştürür. Bu işlem genellikle dilbilgisel doğruluk

gözetmeden gerçekleştirilir (örneğin: "kitaplar", "kitapçı" → "kitap").

- **Lemmatization** ise daha sofistike bir işlemdir ve kelimenin sözlükteki temel formuna (lemma) indirgenmesini sağlar. Bu işlem sırasında kelimenin türü (isim, fiil vb.) dikkate alınır.

Bu adımlar, aynı kökten türeyen kelimelerin analizde tek bir biçim altında toplanmasını mümkün kılarak veri boyutunu azaltır ve model performansını artırır.

Bu ön işleme adımları, doğal dil verisinin daha tutarlı, temiz ve anlamlı bir şekilde temsil edilmesini sağlamakta; böylece sonraki analiz ve modelleme süreçlerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

3.3.Dil Modellemesi Yaklaşımları

NLP’de, bir metindeki kelimelerin olasılık dağılımını modellemek temel bir yaklaşımdır:

- **N-gram Modelleri:** Belirli sayıda kelime dizisini dikkate alarak olasılık hesaplaması yapar (Ural, Vural, & Çiftçi, 2020). Temel ancak bağlamı sınırlı şekilde ele alır.
- **TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency):** Belirli kelimelerin önem derecesini belirlemek için kullanılan istatistiksel yöntemdir (Çelik & Koç, 2021).
- **Word Embeddings (Kelime Vektörleri):** Word2Vec, GloVe gibi yöntemlerle kelimeler sayısal vektörlere dönüştürülerek anlamsal yakınlıkları modele yansıtılır (Yıldırım & Yıldız, 2018).
- **Transformer Tabanlı Modeller:** Özellikle GPT, BERT ve XLM-RoBERTa gibi derin öğrenme temelli modellerin temelini oluşturan mimarilerdir. Bu yapılar, dikkat mekanizmaları sayesinde uzun bağlamları etkili şekilde işleyebilir (Vural & Aydoğan, 2024).

4. UYGULAMALAR

Doğal dil işleme teknolojilerinin en somut çıktılarından biri, insanlarla doğal bir şekilde etkileşim kurabilen chatbotlar ve sesli asistanlardır. Bu uygulamalar, dilin hem anlamsal hem de bağlamsal yönlerini analiz edebilme kapasitesine sahip gelişmiş dil modellerine dayanmaktadır. İletişimi

otomatikleştirme, müşteri hizmetlerini iyileştirme ve kullanıcı deneyimini artırma gibi pek çok alanda etkin şekilde kullanılmaktadır.

4.1.Chatbotlar

Chatbotlar, önceden tanımlanmış kurallar ya da öğrenmeye dayalı sistemler aracılığıyla kullanıcılarla metin tabanlı iletişim kuran genel olarak sınıflandırma algoritmaları kullanılarak oluşturulan yazılımlardır (İşeri, Aydın, & Tutuk, 2021). Temel olarak iki tür chatbot mimarisi bulunmaktadır:

- **Kural Tabanlı Chatbotlar:** Belirli anahtar kelimeler veya soru kalıpları ile çalışır. Yapay zekâ unsuru içermez, sınırlı diyalog kabiliyetine sahiptir.
- **Yapay Zekâ Tabanlı Chatbotlar:** Kullanıcı girdilerini analiz ederek bağlamı anlayan, geçmiş konuşmaları değerlendiren ve anlamlı yanıtlar üretebilen sistemlerdir. Genellikle makine öğrenmesi, derin öğrenme ve büyük dil modelleri ile güçlendirilmiştir.

Kullanım alanları arasında e-ticaret, bankacılık, eğitim, sağlık ve kamu hizmetleri bulunmaktadır. Örneğin, sanal müşteri temsilcileri kullanıcı sorunlarını ilk temas noktasında çözerek operasyonel verimlilik sağlamaktadır.

4.2.Sesli Asistanlar

Sesli asistanlar, kullanıcı komutlarını sesli girdiler üzerinden anlayan ve yanıtlayan sistemlerdir. Doğal dil işleme ile ses tanıma (speech recognition) teknolojilerinin birleşimiyle çalışırlar. Başlıca örnekler şunlardır:

- Apple Siri
- Amazon Alexa
- Google Assistant
- Microsoft Cortana

Bu sistemlerde işleyen tipik süreç şunlardır:

- **Ses tanıma:** Kullanıcının konuşması dijital metne dönüştürülür.
- **Doğal dil anlama (NLU):** Elde edilen metin analiz edilerek kullanıcı niyeti tespit edilir.
- **Doğal dil üretimi (NLG):** Yanıt, doğal dil biçiminde üretilerek kullanıcıya iletilir.

Sesli asistanlar akıllı ev sistemlerinin yönetiminden takvim yönetimine, bilgi aramalarından ulaşım planlamasına kadar pek çok alanda görev alabilmektedir.

Hem chatbotlar hem de sesli asistanların başarısı, arka planda kullanılan dil modeline doğrudan bağlıdır. Bu sistemlerde kullanılan dil modelleri, kullanıcı ifadelerinin bağlamını ve anlamını anlamaya yardımcı olur. Gelişmiş modeller (örneğin BERT veya GPT) şu yetenekleri sunar:

- Bağlama dayalı anlam çıkarımı
- Uzun konuşma geçmişi takibi
- Kullanıcı niyetini doğru analiz etme
- Konuşma doğal akışına uygun cevap üretimi

Bu nedenle modern NLP uygulamalarında dil modelleri sadece yanıt üreticisi değil, aynı zamanda anlam çözümleyici birer aracı olarak konumlanmaktadır.

4.3. Transformer Tabanlı Modeller

Doğal dil işleme alanında yaşanan en büyük sıçramalardan biri, transformer tabanlı derin öğrenme modellerinin geliştirilmesiyle mümkün olmuştur. Bu modeller, metni sadece kelime seviyesinde değil, bağlamsal ve anlamsal düzeyde anlayarak daha doğal ve etkili yanıtlar üretebilmektedir. Günümüzde GPT-5, BERT ve DALL·E gibi modeller, NLP uygulamalarının hem akademik hem de endüstriyel alandaki yönünü belirleyen başlıca araçlar hâline gelmiştir.

4.3.1. Transformer Mimarisi ve Gelişimi

Vaswani ve arkadaşları (2017) tarafından geliştirilen Transformer mimarisi, doğal dil işleme modellerinde devrim yaratmıştır. Bu mimari, özellikle “self-attention” (öz-dikkat) mekanizması sayesinde, metin içerisindeki her bir kelimenin bağlam içindeki önemini dinamik olarak belirleyebilmekte ve uzun cümleleri etkin biçimde analiz edebilmektedir.

Transformer mimarisi, hem encoder (kodlayıcı) hem decoder (çözücü) katmanlarıyla çalışabilen bir yapı sunar. Encoder tarafı daha çok sınıflandırma ve anlam çıkarımı gibi görevlerde, decoder tarafı ise metin üretimi gibi görevlerde kullanılmaktadır. Bu yapı hem BERT gibi anlayıcı modellerin hem de GPT gibi üretici modellerin temelini oluşturur.

4.3.2. BERT

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), Google tarafından geliştirilmiş ve 2018 yılında duyurulmuş çift yönlü bir dil modelidir. BERT'in en önemli özelliği, kelimelerin anlamını yalnızca sağdan sola ya da soldan sağa değil, her iki yönden de değerlendirerek daha zengin bir bağlam yakalamasıdır (Devlin vd., 2019). Bu model, önceden eğitilmiş hâlde sunulur ve farklı görevler için ince ayar (fine-tuning) yapılabilir.

BERT, metin sınıflandırma, duygu analizi, soru-cevap sistemleri gibi görevlerde yüksek doğruluk oranları ile kullanılmaktadır. Türkçeye özgü olarak geliştirilen BERT modelleri (ör. BERTurk) de mevcuttur ve düşük kaynaklı diller için özelleştirilmiş çözümler sunmaktadır.

4.3.3. GPT-5

GPT-5 (Generative Pre-trained Transformer 5), OpenAI tarafından geliştirilen ve 7 Ağustos 2025 yılında tanıtımı yapılan ileri nesil bir yapay zekâ dil modelidir (Openai Research, 2025). GPT-5, önceki sürümlere kıyasla daha yüksek kapasiteye, daha gelişmiş bağlam analizi yeteneğine ve çok modlu (metin+görsel) anlayışa sahiptir. Geniş ölçekli veri setleri üzerinde eğitilen model, ek bir ince ayar yapılmaksızın çok çeşitli görevlerde başarılı performans gösterebilmektedir.

GPT-5 şu özelliklere sahiptir:

- Uzun bağlamları analiz edebilme (25.000+ kelime)
- Karmaşık sorulara daha tutarlı ve bütüncül yanıtlar verebilme
- Metin oluşturma, çeviri, özetleme ve kod üretimi gibi görevlerde yüksek esneklik
- Gelişmiş çok dilli destek

GPT-5, üretici yapay zekâ kavramını güçlendirmiş ve eğitim, sağlık, hukuk, yazılım geliştirme gibi birçok sektörde yeni nesil uygulamaların gelişmesine zemin hazırlamıştır.

4.3.4. DALL·E

DALL·E, yine OpenAI tarafından geliştirilen ve metinden görsel üretebilen üretici yapay zekâ modelidir. NLP alanının sınırlarını genişleterek, dilin görsel temsili üzerinden yaratıcı içerik üretimi sağlamaktadır (Şen, 2021).

Kullanıcı tarafından verilen metinsel açıklamaları (örneğin “bir astronotun ayda gitar çaldığı bir tablo”) anlamlandırarak özgün görseller oluşturabilir.

DALL·E, çok modlu yapay zekânın en önemli örneklerinden biridir ve sanat, reklamcılık, tasarım gibi alanlarda yeni fırsatlar sunmaktadır.

5. NLP’NİN GELECEĞİ VE ETİK SORUNLAR

Doğal Dil İşleme (NLP) alanı, yapay zekâ teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Büyük dil modellerinin artan kapasitesi ve üretici yapay zekâ uygulamalarının çeşitlenmesi, gelecekte NLP’nin sağlık, hukuk, eğitim, kamu hizmetleri gibi pek çok sektörde daha yaygın kullanılmasını mümkün kılacaktır. Ancak bu ilerlemeler, beraberinde çeşitli etik, toplumsal ve hukuki sorunları da getirmektedir.

5.1. Gelecekte NLP’nin Yönelimleri

NLP alanında gelecekte öne çıkması beklenen bazı yönelimler şunlardır:

- **Çok Dilli ve Kültürel Farklılıklara Duyarlı Modeller:** Günümüzde dil modelleri çoğunlukla yüksek kaynaklı diller (örneğin İngilizce) üzerinde eğitilmektedir. Türkçe gibi kaynakları sınırlı diller için daha etkili modellerin geliştirilmesi öncelikli hedefler arasında yer almaktadır.
- **Düşük Hesaplama Kaynağına Sahip NLP:** Özellikle mobil ve gömülü sistemlerde NLP modellerinin kullanılabilmesi için daha az kaynak tüketen “hafif” modeller geliştirilmesi önem kazanmaktadır.
- **Multimodal NLP:** Sadece metin değil, ses, görüntü ve video gibi farklı veri türleriyle entegre çalışan çok modlu sistemler yaygınlaşacaktır.
- **Kuantum NLP:** Henüz teorik düzeyde olan bu yaklaşım, kuantum hesaplamasının NLP problemlerine uygulanmasını hedeflemekte olup gelecekte önemli bir araştırma alanı olabilir.

5.2. Etik Sorunlar

NLP sistemlerinin yaygınlaşması ile sunduğu faydaların yanı sıra çeşitli etik sorunları da gündeme getirdiği söylenebilir. Bunlara alt başlıklar halinde inceleyecek olursak başlıca maddeleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- **Önyargı ve Ayrımcılık:** NLP modelleri, eğitildikleri veri kümelerinde yer alan önyargıları yansıtarak cinsiyet, ırk veya etnik

köken temelli ayrımcılığa neden olabilir. Örneğin, “kadın” kelimesi ile "hemşire", "erkek" kelimesi ile "mühendis" kelimesinin sık eşleşmesi bu tür önyargılara örnektir.

- **Mahremiyet ve Veri Güvenliği:** Kullanıcı verilerinin işlenmesi sırasında kişisel bilgilerin sızdırılması ya da izinsiz kullanımı, GDPR ve benzeri regülasyonlara aykırı durumlar yaratabilir.
- **Yanıltıcı Bilgi Üretimi (Disinformation):** GPT gibi modeller, gerçekmiş gibi görünen ancak tamamen kurgusal içerikler üretebilir. Bu durum, dezenformasyon ve sosyal manipülasyon riskini artırmaktadır.
- **Şeffaflık ve Açıklanabilirlik:** NLP sistemlerinin kararlarının nasıl alındığı çoğu zaman kullanıcılar tarafından anlaşılamamaktadır. Bu durum, algoritmik sorumluluk ve şeffaflık ilkeleriyle çelişmektedir.

5.3.Yasal ve Politik Düzenlemeler

Avrupa Birliği’nin gündeminde yer alan Yapay Zekâ Yasası (AI Act) gibi girişimler, yapay zekâ sistemlerinin sınıflandırılması, risk bazlı değerlendirme yapılması ve yüksek riskli uygulamalara denetim getirilmesi gibi önlemler içermektedir (Başara, 2025). NLP sistemleri de bu düzenlemeler kapsamında değerlendirilmektedir.

Ayrıca, açık kaynak NLP modellerinin denetimsiz kullanımı, kötü amaçlı içeriklerin (nefret söylemi, dolandırıcılık, propaganda vb.) otomatik olarak üretilmesini kolaylaştırabileceğinden, ulusal düzeyde etik denetim mekanizmalarının kurulması önem arz etmektedir.

6. SONUÇ

Doğal Dil İşleme (NLP), bilişim teknolojileri içinde giderek daha merkezi bir konuma yerleşmektedir. İnsan dili gibi karmaşık, bağlama duyarlı ve kültürel olarak şekillenmiş bir yapının bilgisayar sistemleri tarafından anlaşılması, yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda dilbilimsel, etik ve toplumsal bir meydan okumadır. Bu bölümde NLP’nin temel kavramları, uygulama alanları, çağdaş modelleri ve geleceğe dair yönelimleri sistematik bir biçimde ele alınmıştır.

Öncelikle NLP’nin temel bileşenleri; morfolojik çözümleme, anlamsal analiz, sözdizimsel yapılandırma gibi çok katmanlı süreçler üzerinden

tanıtılmıştır. Devamında, chatbotlar ve sesli asistanlar gibi gerçek dünya uygulamalarının, nasıl dil modeli temelli sistemlerle inşa edildiği açıklanmış, GPT-5, BERT ve DALL·E gibi çağdaş modellerin teknik kapasiteleri irdelenmiştir. Bu teknolojiler, NLP'yi sadece bir analiz aracı değil, aynı zamanda içerik üreten yaratıcı bir yapay zekâ alanına dönüştürmüştür.

NLP'nin geleceği, çok modlu sistemlerin yükselişi, daha adil ve kapsayıcı modellerin geliştirilmesi, kaynak verisi az olan dillerin desteklenmesi ve veri güvenliğine duyarlı tasarımlarla şekillenecektir. Ancak bu teknolojik ilerlemelerin, etik, hukuki ve sosyal açılardan dikkatle değerlendirilmesi gerektiği açıktır. Model önyargıları, mahremiyet ihlalleri ve algoritmik hesap verilebilirlik konuları, sadece teknik değil, aynı zamanda etik birer meseledir. Bu bağlamda, NLP üzerine yapılacak akademik çalışmaların sadece teknolojik gelişmeleri takip etmesi değil, aynı zamanda bu gelişmelerin birey ve toplum üzerindeki etkilerini de eleştirel bir gözle incelemesi önem taşımaktadır. Bilimsel tarafsızlıkla geliştirilen bu tür analizler, yapay zekânın daha şeffaf, etik ve kapsayıcı bir biçimde ilerlemesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adalı, E. (2016). Doğal Dil İşleme. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri Ve Mühendisliği Dergisi*.
- Ağralı, Ö., & Aydın, Ö. (2021). Tweet Classification and Sentiment Analysis on Metaverse Related Messages. *Journal of Metaverse*, 25-30.
- Arslan, K. (2020). Eğitimde Yapay Zeka ve Uygulamaları. *Batı Anadolu Eğitim Bilimleri Dergisi*, 71-88.
- Balcıoğlu, Y. S. (2024). Detecting Turkish Cyberbullying Tweets Using Machine Learning. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 1410-1428.
- Başara, G. T. (2025). Avrupa Dijital Düzenleme Sisteminde Yapay Zekâ Yasası. *Ankara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 2983-3016.
- Baştürk, B., & Onan, A. (2025). Discovering Latent Themes in Heart Disease Article Abstracts: A Topic Modeling Approach. *Dokuz Eylül University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, 216-223.
- Coşar, A. M. (2025). Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi. *Söz Dizimi Açısından ChatGPT'nin Türkçesine Bir Bakış*, 377-389.
- Çelik, Ö., & Koç, B. C. (2021). TF-IDF, Word2vec ve Fasttext Vektör Model Yöntemleri ile Türkçe Haber Metinlerinin Sınıflandırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 121-127.
- Çorbacı, O. K. (2024). İlahi Hitaptan Makine Diline: Kutsal Metinlerin Yz Ile Yeniden Okunması. *Dinbilimleri Akademik Araştırma Dergisi*, 541-572.
- Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019, June). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In *Proceedings of the 2019 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies, volume 1 (long and short papers)* (pp. 4171-4186).
- Güner, S. P. (2023). Çevirmen-Bilgisayar Etkileşiminin Kilit Bileşeni: Doğal Dil İşleme. *Uluslararası Filoloji ve Çeviribilim Dergisi*, 56-79.

- İşeri, İ., Aydın, Ö., & Tutuk, K. (2021). Müşteri Hizmetleri Yönetiminde Yapay Zeka Temelli Chatbot Geliştirilmesi. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 358-365.
- Karaca, M. F., & Bayır, Ş. (2024). Türkçe Doğal Dil İşleme: Ses Bilgisi ve Morfolojik Analiz. *Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 448-465.
- Kına, E., & Biçek, E. (2023). Tweetlerin Duygu Analizi İçin Hibrit Bir Yaklaşım. *Doğu Fen Bilimleri Dergisi*, 57-68.
- Kontuk, R., & Turan, M. (2020). NLP Kullanılarak Haberlerin Yaş Gruplarına Göre Sınıflandırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 372-382.
- Kuşçu, E. (2015). Çeviride Yapay Zeka Uygulamaları. *Atatürk Üniversitesi Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Dergisi*, 45-58.
- Openai Research. (2025, Kasım 25). OpenAi Web Sitesi: <https://openai.com/research/index/release/?page=2> adresinden alındı
- Şen, E. (2021). GPT3: DALL-E ve JL2P Ekseninde Veri Görselleştirme ve Hareketlendirme Üzerine Bir İnceleme. *USBAD Uluslararası Sosyal Bilimler Akademi Dergisi*, 253-280.
- Ural, M. N., Vural, A., & Çiftçi, A. (2020). Conceptual Development Analysis of Health Tourism Based on “N-Gram.”. 5. *Uluslararası Sağlık Bilimleri ve Yönetimi Kongresi*, (s. 9-11). Kırşehir.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., . . . Polosukhin, I. (2017). Attention is All you Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 5999–6009.
- Vural, M., & Aydoğan, M. (2024). Duygu Analizi Görevi Üzerinde Geniş Dil Modellerinin Performansının Kıyaslanması. 14. *Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi (ICAR)*, (s. 296-305).
- Yıldırım, S., & Yıldız, T. (2018). Türkçe İçin Karşılaştırmalı Metin Sınıflandırma Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 879-886.
- Yılmaz, S. (2023). Arapça-Türkçe Çeviri Türlerinde Nöral Makine Çeviri Modellerinin Verimliliği: ChatGPT Örneği. *Şarkiyat Mecmuası*, 339-355.

BÖLÜM 2

FEDERATİF ÖĞRENME PARADİGMALARI: YATAY, DİKEY VE TRANSFER YAKLAŞIMLARININ MATEMATİKSEL TEMELLERİ VE UYGULAMALI ANALİZİ

Doç.Dr. Volkan GÖREKE¹

Dr.Öğr.Üyesi Vekil SARI²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17979740>

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, STBMYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Sivas, Türkiye. vgoreke@cumhuriyet.edu.tr, orcid id: 0000-0002-2418-8373

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye. vsari@cumhuriyet.edu.tr, orcid id: 0000-0001-5963-0179

1. GİRİŞ

Makine öğrenmesinin geleneksel yöntemleri çoğu zaman daha küçük veri kümeleriyle etkili şekilde çalışabilirken, derin öğrenme modelleri genellikle yüksek temsil kapasitesi nedeniyle çok miktarda veriye ihtiyaç duyar. Bu nedenle yeterli miktarda eğitim verisine ulaşılamayan uygulama alanlarında örneğin, verinin gizlilik, güvenlik veya kurumlar arası dağıtık yapı nedeniyle paylaşılamadığı durumlarda derin öğrenme yöntemleri pratikte sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle, veriyi merkezileştirmeden ortak model oluşturulmasına imkân veren yaklaşımlar önem kazanmaktadır (Drosatos vd., 2023, s.1) McMahan ve arkadaşlarının 2017 tarihli çalışmasında, geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinde verilerin merkezi bir veri merkezine toplanmasını gerektirdiği belirtilmekte olup, bu yaklaşımın mobil cihazlar gibi dağıtık sistemlerdeki veri hassasiyeti ve transfer zorlukları nedeniyle her zaman uygulanabilir olmadığı vurgulanmaktadır. (McMahan, H. B., vd. 2016, s.1) Buna ek olarak, verilerin merkeze taşınması sürecinde yasal ve teknik darboğazlar da belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle Genel Veri Koruma Yönetmeliği (The General Data Protection Regulation -GDPR) gibi veri koruma düzenlemeleri kişisel verilerin yer değiştirmesini kısıtlarken, ham verilerin sürekli olarak merkezi sunucuya iletilmesi ağ bant genişliğini tüketmekte ve iletişim maliyetlerini yönetilemez seviyelere çıkarabilmektedir (Li vd., 2020, s.2). (Kumar, Y ve Singla, R. 2021). Federatif Öğrenme (FÖ), dağıtık veri kaynakları üzerinde model eğitimi yapmayı mümkün kılan ve ilk olarak Google tarafından 2016 yılında önerilen yenilikçi bir yöntemdir (McMahan, H. B., vd. 2016, s.3) . FÖ, çok sayıda bağımsız istemcinin (örneğin cihazların veya kurumların) yerel verilerini kullanarak merkezi bir veri havuzuna ihtiyaç duymadan ortak bir model geliştirmesini sağlayan bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Bu yöntemde her bir istemci U_j yalnızca kendi veri kümesine sahiptir ve diğer istemcilerin verilerine doğrudan erişemez. FÖ'nün temel amacı, dağıtık bir şekilde çalışarak tahmin gücü yüksek bir model F oluşturmak ve belirli bir hata ölçütünü L minimize etmektir.

FÖ sürecinde farklı veri işleme birimleri görev alır ve istemciler ile merkezi koordinatör (master) arasında bir iletişim protokolü işletilir. Koordinatör, istemcilerden gelen yerel model güncellemelerini toplayarak global bir model F_G oluşturur ve bu modeli istemcilere geri iletir. Böylece

veriler istemcilerde kalırken, öğrenme süreci merkezi bir noktada toplanmış gibi ilerler.

Federatif Öğrenme süreci genel olarak üç aşamadan oluşur:

Başlangıç modeli dağıtımı: FÖ sürecinin ilk adımında, koordinatör tarafından önceden tanımlanmış bir başlangıç modeli F_0 tüm istemcilere iletilir. Bu model, her istemcinin kendi verisi üzerinde eğitim yapabilmesi için temel teşkil eder.

Yerel model güncellemesi: Her istemci U_j , kendi yerel veri seti üzerinde modeli eğitir ve öğrenme sırasında koordinatörden alınan global model bilgilerini dikkate alır. Bu sayede yerel model F_j^{yerel} hem kendi verisine uyumlu hem de global modelle tutarlı hâle gelir.

Global modelin oluşturulması ve paylaşımı: Koordinatör, tüm istemcilerden gelen yerel modelleri birleştirerek yeni bir global model F_G üretir. Bu güncellenmiş model, sonraki eğitim turu için tekrar istemcilere iletilir ve süreç iteratif olarak devam eder.

Bu yaklaşım, verilerin gizliliğini korurken dağıtık cihazların hesaplama gücünden faydalanmayı mümkün kılar. FÖ, özellikle kullanıcı verilerinin hassas olduğu, farklı kurum veya cihazlar arasında veri paylaşımının sınırlı olduğu senaryolarda son derece uygun bir yöntemdir (Li vd., 2020, Yang vd., 2020).

2. Temel Kavramlar ve Sınıflama

Federatif öğrenme farklı veri dağılım senaryolarına göre üç ana kategoriye ayrılır: Yatay Federatif Öğrenme (YFÖ), Dikey Federatif Öğrenme (DFÖ) ve Transfer Federatif Öğrenme (TFÖ). Bu sınıflama, veri örneklerinin ve özellik uzaylarının nasıl kesiştiğine bağlıdır (Kairouz vd., 2021). Yatay Federatif Öğrenme; istemcilerin veri kümeleri, aynı özellik uzayını paylaşır fakat örnekler (kullanıcılar) farklıdır. Örneğin mobil cihazlarda klavye tahmini, her cihazın özelliği aynı (yazı karakterleri), ancak kullanıcı cümleleri farklıdır. Uygulaması kolaydır, istemcilerin verisi aynı yapıya sahiptir ancak veri heterojenliği, cihazlardaki kaynak kısıtlamaları dezavantajları arasında yer alır (Bonawitz vd., 2019, Zhang vd., 2021). Dikey Federatif Öğrenme; veri kümeleri aynı kullanıcı tabanını paylaşır, fakat özellik uzayları farklıdır. Bir bankanın müşteri finansal verileri ile bir e-ticaret platformunun alışveriş geçmişi buna örnek olarak verilebilir. Aynı müşteriler vardır, fakat farklı

özellikler mevcuttur. Bu yöntemin avantajı olarak kurumlar arası işbirliği ile daha kapsamlı modeller üretilebilmesi söylenebilir. Dezavantajı ise kimlik eşleme (identity matching), güvenli çok taraflı hesaplama gerektirir (Zhang vd., 2021). Federatif Öğrenme yapısında genellikle her kullanıcının (istemcinin) belirli bir görevi öğrenmek için yeterli etiketli veri sağladığı varsayılır. Ayrıca, farklı istemcilerdeki verilerin ortak bir özellik uzayında bulunduğu kabul edilir (Kairouz vd., 2021). Ancak bu varsayımlar geçerli olmadığında sorunlar ortaya çıkar:

- Eğer yeterli etiketli veri mevcut değil ise model tüm veri kümesinin özelliklerini öğrenemez ve bu durum düşük tahmin başarımına yol açar. Aynı zamanda, istemciden gelen gradyanlar yalnızca mevcut verinin özelliklerine yönelir, bu da küresel modelin öğrenme kapasitesini zayıflatır.
- Eğer istemciler farklı özellik uzaylarında veri tutuyorsa (örneğin veriler tamamen farklı türlerden geliyorsa), model ortak bir temsil öğrenemez. Böylece FÖ sistemi, kullanıcıya özgü modeller için anlamlı bilgi çıkaramaz.

Bu durumlarda TFÖ yöntemleri devreye girer. TFÖ, yatay ve dikey transfer öğrenmesinin kesişimi olarak görülebilir. Genel anlamda, transfer öğrenmesi bir modelin bir veri kümesinde (kaynak alan) öğrendiklerini, başka bir veri kümesinde (hedef alan) kullanarak performansını artırmayı amaçlayan bir tekniktir.

TFÖ’de amaç, kullanıcının (U_i) modelini başka kullanıcıların ($U_j, i \neq j$) verilerinden veya modellerinden yararlanarak geliştirmektir. Burada U_i hedef, U_j ise kaynak olarak adlandırılır (Yang vd. 2019). Veri kümeleri arasında örnek veya özellik uzayında küçük kesişimler olabilir. Hedef model, veriler paylaşılmadan ortak bir temsil öğrenerek geliştirilebilir. Bu, manifold hizalaması (Wang, C. ve Mahadevan, S.,2009) veya alan-adversaryal öğrenme (Ganin, Y., Lempitsky, V., 2015) gibi yöntemlerle yapılabilir. Bunun dışında hedef model:

- Kaynak modelden örnekleri farklı ağırlıklarla kullanarak
- Kaynak modelden doğrudan gradyan alarak da iyileştirilebilir. Ayrıca bazı TFÖ yöntemleri, kaynak ve hedef arasındaki veri dağılımı farklılıklarını da dikkate alır (Pan, S. J., Yang, Q., 2010).

3. Kategorilere Ait Matematiksel Yaklaşımlar

YFÖ, farklı cihazların veya kuruluşların aynı özellik alanına sahip oldukları, fakat farklı veri örneklerini (örnek uzayı farklı) topladıkları durumlar için geliştirilmiş bir makine öğrenimi yaklaşımıdır. Örneğin: Bir banka zincirinin farklı şubeleri düşünelim. Her şubenin müşteri yaşı, gelir düzeyi, kredi geçmişi gibi aynı türde özellikleri vardır, ancak farklı müşterilere (örnekler) sahiptir.

Bu durumda yatay federatif öğrenme kullanılarak, tüm şubelerin verilerini birleştirmeden ortak bir model eğitilebilir.

Toplamda K adet istemci olduğunu varsayalım. Her istemcinin kendi yerel veri kümesi Eşitlik 1 ile verilmiştir.

$$\left\{ \left(x_{k,i}, y_{k,i} \right) \right\}_{i=1}^{n_k}, k=1,2,3,K \quad (1)$$

Burada; $X_{k,i}$ istemci k 'daki i . örneğin özellik vektörü, $y_{k,i}$ o örneğe karşılık gelen etiket, n_k , istemci k 'nın veri sayısını ifade eder. Toplam veri sayısı n , Eşitlik 2 ile verilmiştir.

$$n = \sum_{k=1}^K n_k \quad (2)$$

Amaç, tüm istemcilerdeki verilerden öğrenilen tek bir küresel modeli (global model) elde etmektir. Bu amaç, empirik risk minimizasyonu ile Eşitlik 3 ile formüle edilir.

$$\min_w F(w), F(w) = \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{n} F_k(w) \quad (3)$$

Her bir istemcinin yerel kaybı Eşitlik 4 ile verilmiştir.

$$F_k(w) = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} l(w; x_{k,i}, y_{k,i}) \quad (4)$$

Bu eşitlikte l kayıp fonksiyonu w modelin parametre vektörüdür.

McMahan ve arkadaşları tarafından önerilen FedAvg algoritması (McMahan vd, 2016), yatay federatif öğrenmede en yaygın kullanılan yöntemdir.

Aşamalar şu şekildedir:

1. Sunucu başlangıcı: Merkezi bir sunucu (örneğin Google'ın sunucusu), başlangıç modeli w^0 'ı belirler.
2. İstemci seçimi: Her iletişim turunda (round) sunucu, uygun istemcilerden bir alt küme S_t 'yi seçer.
3. Yerel model eğitimi: Her seçilen istemci $k \in S_t$:
 - Sunucudan son global model w^t 'yi alır.
 - Yerel verisi üzerinde birkaç SGD (Stokastik Gradyan İnişi) adımı uygular: $w_k^{t+1} \leftarrow LocalTrain(w^t)$
 - Güncellenmiş yerel model parametresini w_k^{t+1} sunucuya geri gönderir.
4. Sunucu tarafında model birleştirme: Sunucu, gelen modelleri veri büyüklüklerine göre ağırlıklı ortalama ile birleştirir. Bu aşamadaki gerçekleşen işleve ait matematiksel ifade Eşitlik 5 ile verilmiştir.

$$w^{t+1} = \sum_{k \in S_t} \frac{n_k}{\sum_{j \in S_t} n_j} w_k^{t+1} \quad (5)$$

Bu işlem birkaç tur (round) tekrarlanarak model küresel optimuma yakınsar.

YFÖ paradigmaları, pratik uygulamalarda etkinliği ve performansı sınırlayan temel zorluklarla karakterize edilmektedir. Bu zorlukların başında, katılımcı istemciler arasındaki veri dağılımlarının bağımsız ve aynı olmamasından kaynaklanan istatistiksel heterojenlik gelmektedir. Bu durum, küresel modelin optimizasyon sürecini olumsuz etkileyerek yakınsama oranını yavaşlatma, model yanlılığı (bias) oluşturma ve hatta ıraksama riski taşıma potansiyeline sahiptir. İkinci olarak, her bir eğitim iterasyonunda model parametrelerinin merkezi sunucu ile istemciler arasında transferi, özellikle yüksek parametre sayısına sahip derin sinir ağları için önemli bir iletişim darboğazı teşkil etmektedir. Son olarak, istemci cihazların heterojen hesaplama kapasiteleri, bellek kısıtlılıkları ve ağ bağlantılarındaki kararsızlıklar gibi faktörleri içeren sistem heterojenliği, eğitim sürecinin istikrarını ve

verimliliğini sekteye uğratan operasyonel bir kısıtlılık olarak öne çıkmaktadır. Bu üç temel meydan okuma, YFÖ sistemlerinin ölçeklenebilirliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir.

DFÖ paradigması, aynı örneklem kümesi üzerinde çalışan, ancak her bir tarafın benzersiz (ayrık) özellik setlerine sahip olduğu çok taraflı işbirliğine dayalı öğrenme senaryosunu tanımlar (Yang vd, 2019). Genellikle bölünmüş model yapısı kullanır. Model parametreleri üç parçaya ayrılır: $w=(w^A, w^B, w^g)$

- w^A : taraf A'nın yerel model parametreleri,
- w^B : taraf B'nin yerel model parametreleri,
- w^g : global (birleştirici katman) katmanın model parametrelerini ifade eder.

Her taraf Eşitlik 6 ve Eşitlik 7 ile verildiği gibi kendi verisinden yerel temsiller üretir.

$$h_A = f_A(x^A; w^A) \quad (6)$$

$$h_B = f_B(x^B; w^B) \quad (7)$$

Bu temsiller daha sonra gizlilik koruyucu bir şekilde birleştirilir ve global tahmin yapılır. Bu işleve ait matematiksel ifade Eşitlik 8 ile verilmiştir.

$$\hat{y} = g(h_A, h_B; w^g) \quad (8)$$

Burada, f_A ve f_B tarafların yerel modelleridir (örneğin küçük bir sinir ağı veya doğrusal katman), g ise ortak birleştirici veya karar katmanıdır. Tüm taraflar, örneklerin ortak olduğu veri kümesi üzerinde aşağıdaki kaybı minimize eder (Eşitlik 9).

$$\min_{w^A, w^B, w^g} \sum_{i \in L_{ortak}} l(g(f_A(x_i^A), f_B(x_i^B)); y_i) \quad (9)$$

Burada; L_{ortak} iki kurumda da mevcut olan örneklerin kümesidir. l , kayıp fonksiyonunu (örneğin çapraz entropi) ifade etmektedir.

Bu yöntemin avantajları şu şekilde sıralanabilir. Hiçbir tarafın ham özelliklerini paylaşmama durumu veri gizliliğinin korunmasını sağlar. Bankalar, sağlık kurumları, sigorta şirketleri gibi farklı sektörlerin ortak model geliştirebilme esnekliği sayesinde kurumsal işbirliğine imkan sağlar. Dezavantajları ise, taraflar arası veri karmaşıklığı, şifreleme yöntemleri için ek hesaplama maliyetinin gereksinimi ve iletişim, senkronizasyonun, klasik makine öğrenmesine göre daha yavaş olması şeklinde sıralanabilir (Hardy vd., 2017, Cai vd., 2024).

TFÖ, farklı kurumların/partilerin hem örnek setleri hem de özellik uzayları bakımından örtüşmesinin düşük olduğu, fakat yine de birbirlerinden bilgi transferi ile ortak hedeflerin geliştirilebileceği durumlarda kullanılan bir çerçevedir. Tipik olarak:

- Kaynak taraf/taraflar geniş etiketli veriye sahip olabilir; hedef taraf/taraflar ise etiketler bakımından fakir veya farklı özellik uzayına sahiptir.
- Amaç, kaynak tarafların sahip olduğu bilgiyi (temsil, parametre) hedef tarafın model doğruluğunu artıracak şekilde güvenli biçimde transfer etmektir; bu transfer sırasında ham veriler paylaşılmaz. (Liu vd., 2018; Yang vd., 2019).

Bir *kaynak* (S) ve bir *hedef* (T) tarafı ifade etmek üzere iki taraflı (genelleştirilebilir çok taraflı) TFÖ durumu ele alındığı düşünülürse kaynak ve hedef verinin matematiksel ifadesi sırasıyla Eşitlik 10 ve Eşitlik 11 ile verilebilir.

$$D_S = \left\{ \left(\mathbf{x}_i^S, \mathbf{y}_i^S \right) \right\}_{i=1}^{n_s}, \mathbf{x}_i^S \in X_S \quad (10)$$

$$D_T = \left\{ \left(\mathbf{x}_j^T, \mathbf{y}_j^T \right) \right\}_{j=1}^{n_t}, \mathbf{x}_j^T \in X_T \quad (11)$$

Genel durumda $X_S \neq X_T$ Bu TFÖ'yü, klasik yatay/dikey FÖ'den ayıran ana özelliklerden biridir. Amaç: hedef taraf için iyi genelleşen bir tahmin fonksiyonu $f_T: X_T \rightarrow Y$ elde etmek ve bu esnada kaynak tarafın zengin etiket bilgisinden ham veri paylaşmadan yararlanmaktır (Pan & Yang, 2010; Liu vd.,

2018). TFÖ’de yaygın ve esnek bir yaklaşım olan ortak temsil yönteminde farklı tarafların (örneğin iki kurumun) kendi verilerinden ortak bir gizli temsil uzayında bilgi çıkarmasıdır. Bunu yapmak için her taraf, verisini gizli temsillere dönüştüren bir kodlayıcı ya da temsil üretici model öğrenir. Bu modeller birbirlerinden bağımsız olarak eğitilir, ancak çıktıları aynı temsil uzayında hizalanır. Kaynak taraf (örneğin büyük etiketli veri sahibi kurum) için kodlayıcı fonksiyon Eşitlik 12 ile verilmiştir.

$$\phi_s: X_s \rightarrow Z, z_i^s = \phi_s(x_i^s; \theta_s) \quad (12)$$

Burada ϕ_s kaynaktaki veriden gizli temsili (örneğin özellik vektörü) çıkaran kodlayıcıdır; θ_s parametrelerini gösterir.

Hedef taraf (etiketi az olan kurum) için benzer biçimde kodlayıcı fonksiyonu Eşitlik 13 ile verilebilir.

$$\phi_t: X_t \rightarrow Z, z_i^t = \phi_t(x_i^t; \theta_t) \quad (13)$$

Ortak karar / çıktı katmanı ise matematiksel olarak Eşitlik 14 ile ifade edilebilir.

$$h: Z \rightarrow \mathcal{Y}, \hat{y} = h(z; w) \quad (14)$$

Bu katman, elde edilen gizli temsilleri kullanarak tahmini (örneğin sınıflandırma sonucunu) üretir.

Bu yapı sayesinde:

- Her taraf kendi verisinden özellik çıkarımı yapar (kodlama işlemi).
- Kodlanmış temsiller z^s ve z^t , ortak gizli uzayda hizalanır; yani istatistiksel olarak benzer hâle getirilir.
- Böylece kaynak tarafın öğrenilmiş bilgisi, hedef tarafın modeline aktarılabilir (transfer).

Bu yaklaşım, TFÖ’nün çekirdeğini oluşturur ve “bilgi transferi”nin gizlilikten ödün vermeden gerçekleşmesini sağlar.

4. Örnek Bir Uygulama

Aşağıdaki örnek kodda Yatay Federatif Öğrenme ile FedAvg (Federated Averaging) algoritmasını uygulayan basit bir simülasyon verilmiştir. Federatif Öğrenme senaryosunu simüle edilmektedir. Birden fazla istemci kendi yerel verilerinde model eğitir, ama verileri merkezi bir sunucuya göndermeden sadece model ağırlıklarını paylaşırlar.

```
1 | # YFÖ_FedAvg.py -- Colab / Python hücresi
2 | import numpy as np
3 | from sklearn.datasets import make_classification
4 | from sklearn.metrics import accuracy_score
5 |
6 | np.random.seed(0)
7 |
8 | def sigmoid(x):
9 |     return 1 / (1 + np.exp(-x))
10 |
11 | def run_hfl_fedavg(num_clients=5, n_per_client=200, dim=10,
12 |                  rounds=20, local_epochs=3, lr=0.5):
13 |     # 1) Her istemci için sentetik veri oluştur
14 |     clients_data = []
15 |     for k in range(num_clients):
16 |         X, y = make_classification(n_samples=n_per_client, n_features=dim,
17 |                                   n_informative=int(dim/2), random_state=42 + k)
18 |         # küçük heterojenlik: özellikleri hafifçe kaydır
19 |         X = X + 0.1 * k
20 |         clients_data.append((X, y.astype(float)))
21 |
22 |     # 2) Global ağırlıkları sıfır ile başlat
23 |     w_global = np.zeros(dim)
24 |
25 |     # 3) Yerel eğitim fonksiyonu: basit tam-batch gradient descent (öğretici amaç)
26 |     def local_train(X, y, w_init, epochs, lr):
27 |         w = w_init.copy()
28 |         n = X.shape[0]
29 |         for _ in range(epochs):
30 |             logits = X.dot(w)
31 |             preds = sigmoid(logits)
32 |             grad = X.T.dot(preds - y) / n
33 |             w = w - lr * grad
34 |         return w
```

```

34 |
35 |     # 4) Federated rounds: her tur tüm istemciler yerel eğitimi yapıp
ağırlıkları sunucuya gönderir
36 |     for _ in range(rounds):
37 |         local_weights = []
38 |         local_sizes = []
39 |         for (X, y) in clients_data:
40 |             w_local = local_train(X, y, w_global, local_epochs, lr)
41 |             local_weights.append(w_local)
42 |             local_sizes.append(len(y))
43 |         # FedAvg: veri-kapalı ağırlıklı ortalama
44 |         w_new = np.zeros_like(w_global)
45 |         denom = sum(local_sizes)
46 |         for w_loc, n_k in zip(local_weights, local_sizes):
47 |             w_new += (n_k / denom) * w_loc
48 |         w_global = w_new
49 |
50 |     # 5) Değerlendir: tüm istemcilerin verisini birleştirip global model ile
test et
51 |     X_test = np.vstack([X for X, _ in clients_data])
52 |     y_test = np.hstack([y for _, y in clients_data])
53 |     logits = X_test.dot(w_global)
54 |     preds = (sigmoid(logits) >= 0.5).astype(float)
55 |     acc = accuracy_score(y_test, preds)
56 |     return acc, w_global
57 |
58 | # Çalıştırma (Colab hücresinde çalıştır)
59 | acc_hfl, w_hfl = run_hfl_fedavg()
60 | print("HFL (FedAvg) doğruluk (birleştirilmiş test):", round(acc_hfl, 4))

```

Veri Oluşturma (satır 11-17):

- 5 farklı istemci için sentetik sınıflandırma verisi üretilir.
- Her istemcide 200 örnek, 10 özellik vardır.
- Her istemcinin verisi biraz farklı (heterojenlik için $X = X + 0.1 * k$)

Global Model (satır 19):

- Merkezi sunucu, tüm istemciler için ortak bir model ağırlığı (w_{global}) tutar
- Başlangıçta sıfır

Yerel Eğitim (satır 22-30):

- Her istemci kendi verisinde lojistik regresyon eğitimi yapar.
- Gradient descent ile ağırlıkları güncellenir.

- Veriyi sunucuya göndermeden sadece yerel olarak eğitir.

FedAvg Algoritması (satır 32-43):

- 20 tur boyunca:
 - Her istemci global modeli alıp yerel eğitim yapar.
 - Eğitilmiş ağırlıkları sunucuya gönderir.
 - Sunucu, tüm istemcilerin ağırlıklarının veri boyutlarına göre ağırlıklı ortalamasını alır.
 - Yeni global model bu ortalama olur.

Değerlendirme (satır 45-50):

- Tüm istemcilerin verisi birleştirilerek global model test edilir.
- Doğruluk (accuracy) hesaplanır.

5. Sonuç

Federatif Öğrenme, modern makine öğrenmesi paradigmalarının karşılaştığı veri gizliliği, yasal kısıtlamalar ve hesaplama maliyeti gibi temel zorlukları ele alan yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Google tarafından 2016 yılında önerilen bu yöntem, merkezi bir veri havuzuna ihtiyaç duymadan, dağıtık veri kaynakları üzerinde model eğitimini mümkün kılarak geleneksel makine öğrenmesi anlayışında köklü bir değişimi temsil etmektedir.

Bu çalışmada ele alınan üç temel federatif öğrenme paradigması (Yatay, Dikey ve Transfer) farklı veri dağılım senaryolarına özgü çözümler sunmaktadır. Yatay Federatif Öğrenme, aynı özellik uzayına sahip ancak farklı örneklem kümelerine sahip istemciler için tasarlanmış olup, FedAvg algoritması üzerinden veri boyutlarına göre ağırlıklı ortalama ile global model oluşturmaktadır. Mobil cihazlarda klavye tahmini gibi uygulamalarda pratik değer gösteren bu yaklaşım, istatistiksel heterojenlik, iletişim darboğazları ve sistem heterojenliği gibi önemli zorluklarla karşı karşıyadır.

Dikey Federatif Öğrenme ise aynı kullanıcı tabanını paylaşan ancak farklı özellik uzaylarına sahip kurumlar arası işbirliği için kritik bir çerçeve sunmaktadır. Bankalar ve e-ticaret platformları arasındaki veri entegrasyonu örneğinde görüldüğü gibi, bu paradigma bölünmüş model yapısı kullanarak her tarafın kendi özelliklerinden yerel temsiller üretmesini ve bunların gizlilik koruyucu bir şekilde birleştirilmesini sağlamaktadır. Ancak kimlik eşleme gereksinimleri, güvenli çok taraflı hesaplama maliyetleri ve artan iletişim yükü bu yöntemin dezavantajları arasında yer almaktadır.

Transfer Federatif Öğrenme, hem örnek setleri hem de özellik uzayları bakımından düşük örtüşmeye sahip durumlar için geliştirilmiş olup, etiketli veri yetersizliği ve farklı özellik uzayları problemlerine çözüm getirmektedir. Ortak temsil öğrenme yaklaşımı ile kaynak ve hedef taraflar arasında bilgi transferi gerçekleştiren bu paradigma, manifold hizalaması ve alan-adversaryal öğrenme gibi ileri düzey tekniklerle desteklenmektedir.

Çalışmada sunulan matematiksel formülasyonlar, her üç paradigmanın teorik temellerini netleştirmekte ve FedAvg algoritmasının Python uygulaması ile Yatay Federatif Öğrenme'nin pratik uygulanabilirliği somut bir şekilde gösterilmektedir. Beş istemci üzerinde gerçekleştirilen benzetim, her istemcinin yerel verilerini paylaşmadan sadece model ağırlıklarını göndererek ortak bir global model oluşturabildiğini kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, Federatif Öğrenme paradigmaları, sağlık, finans, telekomünikasyon gibi gizliliğin kritik olduğu sektörlerde sürdürülebilir ve etik makine öğrenmesi çözümleri için vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir. Bununla birlikte, veri heterojenliği, iletişim verimliliği ve sistem ölçeklenebilirliği gibi açık problemler, gelecekteki araştırmaların odak noktalarını oluşturmaya devam edecektir. Bu çalışmada sunulan matematiksel temeller ve uygulama örnekleri, araştırmacılar ve uygulayıcılar için federatif öğrenme sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu konusunda sağlam bir referans çerçevesi sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Bonawitz, K., Eichner, H., Grieskamp, W., Huba, D., Ingerman, A., Ivanov, V., Kiddon, C., Konečný, J., Mazzocchi, S., McMahan, H. B., Van Overveldt, T., Petrou, D., Ramage, D., & Roselander, J. (2019). Towards federated learning at scale: System design. *Proceedings of Machine Learning and Systems*, 1, 374–388.
- Cai, D., Fan, T., Kang, Y., Fan, L., Xu, M., Wang, S., ve Yang, Q. (2024). *Accelerating vertical federated learning* (Version 2). arXiv preprint arXiv:2207.11456. <https://arxiv.org/abs/2207.11456>
- Drosatos, G., Efraimidis, G., ve Arampatzis, A. (2023). Federated and transfer learning applications. *Applied Sciences*, 13(21), 11722. <https://doi.org/10.3390/app132111722>
- Kairouz, P., McMahan, H. B., Avent, B., Bellet, A., Bennis, M., Bhagoji, A. N., Zhao, S. (2021). Advances and open problems in federated learning. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 14(1–2), 1-210. <https://doi.org/10.1561/22000000083>.
- Kumar, Y., & Singla, R. (2021). Federated learning systems for healthcare: Perspective and recent progress. In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 965, pp. 141–156). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70604-3_6.
- Li, L., Fan, Y., Tse, M., & Lin, K. Y. (2020). A review of applications in federated learning. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106854. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106854>
- Li, T., Sahu, A. K., Talwalkar, A., & Smith, V. (2020). "Federated Learning: Challenges, Methods, and Future Directions". *IEEE Signal Processing Magazine*, 37(3), 50-60. 10.1109/MSP.2020.2975749
- Liu, Y., Kang, Y., Xing, C., Chen, T., ve Q. Yang. (2018). Secure Federated Transfer Learning. arXiv:1812.03337. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.03337>
- McMahan, H. B., Moore, E., Ramage, D., ve Arcas, B. A. Y. (2016). Federated learning of deep networks using model averaging. *arXiv*. DOI:10.48550/arXiv.1602.05629.
- Ganin, Y., Lempitsky, V. (2015). Unsupervised domain adaptation by backpropagation. *ICML'15: Proceedings of the 32nd International*

- Conference on International Conference on Machine Learning - Volume 37 (ICML)*, Lille, France, 1180–1189.
- Hardy, S., Henecka, W., Ivey-Law, H., Nock, R., Patrini, G., Smith, G., & Thorne, B. (2017). *Private federated learning on vertically partitioned data via entity resolution and additively homomorphic encryption* (Version 1). arXiv preprint arXiv:1711.10677. <https://arxiv.org/abs/1711.10677>
- Pan, S. J. ve Yang, Q. (2010). *A survey on transfer learning*. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), 1345–1359. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191>
- Yang, Q., Liu, Y., Cheng, Y., Kang, Y., Chen, T., & Yu, H. (2020). *Federated learning*. *Synthese Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*, 13(1), 1–207. <https://doi.org/10.2200/S00960ED2V01Y201910AIM043>.
- Zhang, C., Xie, Y., Bai, H., Yu, B., Li, W., & Gao, Y. (2021). A survey on federated learning. *Knowledge-Based Systems*, *216*, 106775. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.106775>
- Yang, Q., Liu, Y., Chen, T., Tong, Y. (2019). Federated machine learning: Concept and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 10(2), 12. <https://doi.org/10.1145/3298981>
- Wang, C., Mahadevan, S. (2009). Manifold alignment using Procrustes analysis. *Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning (ICML)*, 1120–1127.

BÖLÜM 3

BÜYÜK DİL MODELLERİ

Öğr. Gör. Ahmet AYDIN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17979916>

¹ Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, Veri Tabanı, Ağ Tasarımı ve Yönetimi Bölümü, Adana, Türkiye. aaydin@atu.edu.com, orcid id: 0000-0003-4916-2505

1. GİRİŞ

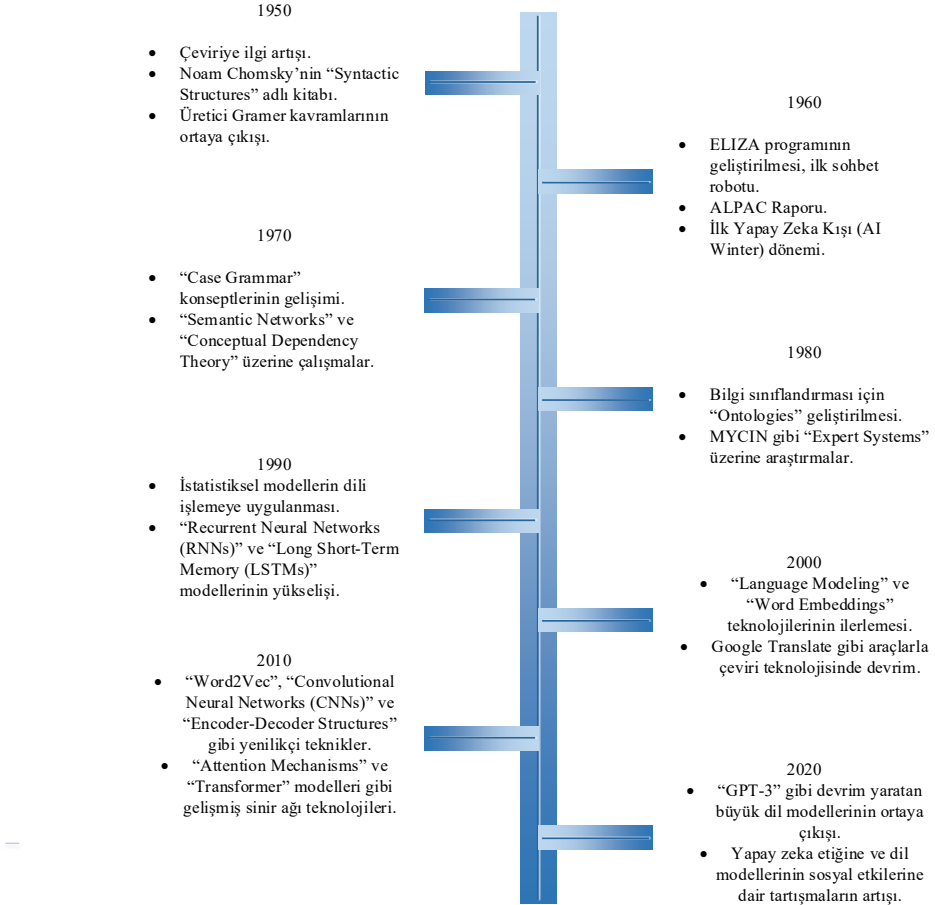
Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing – NLP), bilgisayarların insan dilini anlama, yorumlama ve üretme becerilerini kazandırmaya çalışan yapay zekâ disiplinlerinden biridir. İnsan dili, yalnızca kelimelerden ibaret bir semboller dizisi değildir; bağlam, kültür, niyet ve çok katmanlı anlam ilişkileri içerir. Bu nedenle, dilin makinelerle öğretilmesi uzun yıllardır hem bilişsel bilimlerin hem de bilgisayar bilimlerinin en zorlu araştırma alanlarından biri olmuştur.

NLP'nin gelişiminde, özellikle 1990'lı yıllardan itibaren istatistiksel yöntemler öne çıkmıştır. n-gram tabanlı dil modelleri, kelime dizilerinin olasılık dağılımlarını öğrenerek metin tahmini yapabilmekteydi (Chen & Goodman, 1999). Ancak bu yaklaşım, uzun bağımlılıkları yakalamakta zorlanıyor ve veri boyutları büyüdükçe verimsiz hale geliyordu. 2000'li yılların başında ise yapay sinir ağlarının yükselişiyle birlikte RNN (Recurrent Neural Networks) ve onların gelişmiş versiyonları olan LSTM (Long Short-Term Memory) ve GRU (Gated Recurrent Unit) modelleri kullanılmaya başlandı (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). Bu yapılar, dildeki ardışık bağımlılıkları daha iyi öğrenebiliyor, özellikle konuşma tanıma ve dil modelleme görevlerinde önemli ilerlemeler sağlıyordu.

Ancak RNN ve LSTM tabanlı modellerin de sınırlılıkları vardı. Özellikle uzun dizilerde gradyan sönümlenmesi ve hesaplama maliyetinin yüksekliği, bu yöntemlerin ölçeklenebilirliğini sınırlıyordu. Bu noktada, 2017 yılında Vaswani ve arkadaşlarının yayımladığı “Attention is All You Need” başlıklı makale ile tanıtılan Transformer mimarisi, NLP’de devrim niteliğinde bir kırılma yarattı (Vaswani vd., 2017). Transformer, öz-dikkat mekanizması sayesinde, dildeki her bir ögenin diğer öğelerle olan ilişkisini aynı anda değerlendirebilme yeteneği kazandı. Böylece hem uzun bağımlılıkların modellenmesi mümkün oldu, hem de paralel hesaplama desteği sayesinde büyük veri setleri üzerinde eğitilebilir hale geldi.

Transformer’ın başarısı, yalnızca tekil görevlerde değil, geniş kapsamlı ve çok çeşitli dil işleme görevlerinde olağanüstü sonuçlar doğurdu. Bu mimari üzerine inşa edilen modellerden BERT (2018), bağlamsal kelime temsiliinde yeni bir standart belirlerken; GPT serisi (2018’den itibaren) insan benzeri metin üretimiyle büyük yankı uyandırdı. BERT, çift yönlü kodlama yapısıyla dilin

bağlamsal bilgisini yakalamada öncü oldu (Devlin vd., 2019); GPT ise yalnızca dil modelleme hedefiyle eğitilmiş olmasına rağmen, geniş ölçekli veri ve parametre büyüklüğü sayesinde çok çeşitli görevlerde başarı gösterdi (Brown vd., 2020). Bu evrimsel süreç, Şekil 1’de özetlenmektedir.



Şekil 1. NLP'nin tarihsel evrimi: İstatistiksel yöntemlerden RNN/LSTM yapısına, oradan Transformer mimarisine ve son olarak LLM'lere geçiş

Transformer tabanlı modellerin ölçeklendirilmesiyle birlikte Large Language Models (LLMs) kavramı doğdu. Buradaki "büyük" tanımı yalnızca parametre sayısına işaret etmez; aynı zamanda kullanılan veri setlerinin çeşitliliğini, modelin öğrenme kapasitesini ve çok amaçlı kullanılabilirliğini de kapsar. İlk büyük sıçrama, 2019 yılında OpenAI tarafından yayımlanan GPT-2

ile yaşandı. Yaklaşık 1,5 milyar parametreye sahip bu model, insan yazısını andıran metinler üretebiliyor, fakat aynı zamanda kötüye kullanım endişeleri nedeniyle başlangıçta kısıtlı erişimle duyurulmuştu. Bunu, 2020’de tanıtılan GPT-3 izledi. 175 milyar parametreye sahip GPT-3, dil modellemenin geldiği noktayı gözler önüne serdi: tek bir model, çeviri, özetleme, kodlama, soru-cevap ve daha birçok görevde oldukça etkiliydi.

Bugün geldiğimiz noktada, 2023’te tanıtılan GPT-4 gibi modeller, trilyon seviyesine yaklaşan parametre boyutlarıyla yalnızca akademi ve endüstride değil, gündelik yaşamda da önemli bir yer edinmiştir.

Buna ek olarak, 2024–2025 döneminde tanıtılan GPT-5 serisi, yalnızca parametre ölçeği açısından değil, özellikle uzun bağlam işleme, çoklu görev genellemesi ve gelişmiş muhakeme kabiliyetiyle LLM evriminde bir sonraki aşamayı temsil etmiştir.

LLM’lerin büyüklüklerinin nasıl arttığını göstermek amacıyla Tablo 1’de seçilmiş modellerin parametre sayıları özetlenmiştir.

Tablo 1. Modern dil modellerinin parametre boyutları ve çıkış yılları

Model	Yıl	Parametre Sayısı
BERT	2018	~340 milyon
GPT-2	2019	~1,5 milyar
GPT-3	2020	~175 milyar
GPT-4	2023	>1 trilyon (tahmini)
GPT-5	2024-2025	Açıklanmamış

LLM’lerin günümüzde bu kadar önemli olmasının üç temel nedeni vardır. Birincisi, ölçek büyüdükçe modellerin öğrenme kapasitesi dramatik biçimde artmaktadır; bu durum, “ölçekleme yasaları” olarak literatüre geçmiştir. İkincisi, LLM’ler çok amaçlıdır; aynı model farklı görevlerde yeniden eğitime ihtiyaç duymadan kullanılabilir. Üçüncüsü, LLM’ler insan benzeri metin üretiminde ulaştıkları başarı ile yapay zekâ teknolojisinin günlük yaşama entegrasyonunu kolaylaştırmıştır. Bu nedenlerle LLM’ler yalnızca teknik bir

yenilik değil, aynı zamanda eğitim, sağlık, hukuk, ekonomi ve kültürel yaşam gibi alanlarda da etkisi hissedilen geniş kapsamlı bir dönüşümün merkezinde yer almaktadır.

Sonuç olarak, NLP'nin istatistiksel yöntemlerden LLM'lere uzanan yolculuğu, yapay zekâ tarihinde en hızlı ve en etkileyici evrimlerden biri olarak değerlendirilebilir. Bu evrim, yalnızca dil teknolojilerinin gelişimini değil, aynı zamanda insanın bilgiye erişim ve iletişim biçimini de kökten değiştirmektedir.

2. Mimari Temeller ve Eğitim Süreci

Doğal dil işleme (NLP) alanında son yıllarda yaşanan büyük ilerlemeler, yalnızca algoritmik yeniliklerden değil, aynı zamanda bu yeniliklerin nasıl ölçeklendirildiği ve eğitildiğinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda modern dil modellerinin başarısını açıklayan dört temel bileşen öne çıkmaktadır: Transformer mimarisi, ön-eğitim ve ince ayar süreçleri, insan geribildirimleriyle pekiştirmeli öğrenme (RLHF) ve ölçekleme yasaları. Bu kavramlar tek başlarına incelendiğinde bağımsız gibi görünseler de, bütüncül bir yaklaşımla ele alındığında, günümüzün büyük dil modellerinin ortaya çıkışını açıklayan mantıksal bir zincir oluşturmaktadır (Ouyang vd., 2022).

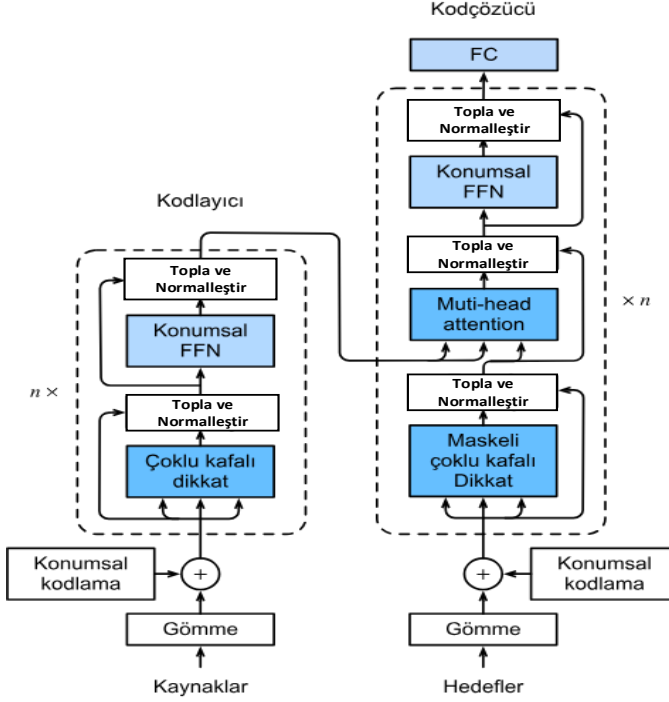
2.1. Transformer Mimarisi

Transformer, Vaswani ve arkadaşları (2017) tarafından tanıtılmış olup, doğal dil işleme tarihinde köklü bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Öncesinde yaygın olarak kullanılan RNN ve LSTM tabanlı dizisel modeller, uzun cümlelerdeki bağımlılıkları öğrenmekte zorlanmakta ve paralel işlemeye elverişli olmamaktaydı. Bu durum, özellikle büyük veri üzerinde model eğitimi için önemli bir darboğaz oluştuyordu.

Transformer, tamamen dikkat mekanizmasına dayalı yapısı sayesinde bu sınırlılıkları aşmıştır. Mimari, giriş dizisini aynı anda işleyebilmekte ve uzun mesafeli bağımlılıkları güçlü biçimde öğrenebilmektedir. Bu yönüyle yalnızca dil işleme değil, bilgisayarla görme, biyoinformatik ve çoklu-modallik gibi pek çok farklı alanda da hızlı bir şekilde uyarlanmıştır (Dosovitskiy vd., 2021).

Mimari iki ana bölümden oluşmaktadır: encoder ve decoder. Encoder, girdi dizisini işlerken her bir token için bağlamsal temsiller üretir; decoder ise bu temsilleri kullanarak çıktı dizisini oluşturur. Encoder ve decoder katmanları

çoklu öz-dikkat blokları ve ileri beslemeli katmanlardan meydana gelmektedir. Şekil 2’de Transformer mimarisinin temel yapısı, encoder–decoder etkileşimleriyle birlikte gösterilmektedir.



Şekil 2. Transformer mimarisinin temel yapısı

Transformer’ın en kritik unsuru olan öz-dikkat mekanizması, bir kelimenin diğer tüm kelimelerle olan bağıını hesaplayarak, dizideki her konumun diğer tüm konumlara “dikkat etmesine” olanak tanır. Bu sayede uzun cümlelerde dahi bağlamsal bilgi kaybolmadan öğrenilebilmektedir.

Transformer, bu özellikleri sayesinde modern dil modellerinin mimari temelini oluşturmaktadır. Ancak bu mimariyi güçlü kılan esas unsur, onun nasıl eğitildiğidir.

2.2. Ön-eğitim ve İnce Ayar

Transformer tabanlı modellerin başarısında en önemli dönüm noktalarından biri, ön eğitim ve ince ayar paradigmasının ortaya çıkışıdır. Bu

yaklaşım, doğal dil işleme modellerinin yalnızca tek bir görev için sıfırdan eğitilmesi anlayışını değiştirmiş ve daha esnek, yeniden kullanılabilir yapılar geliştirilmesine imkân tanımıştır.

Ön eğitim aşamasında model, çok büyük miktarda metin üzerinde eğitilerek dilin genel yapısını öğrenir. Maskelenmiş dil modelleme ve nedensel dil modelleme gibi yöntemler bu süreçte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede model, sözcükler ve cümleler arasındaki ilişkileri bağlamsal düzeyde kavrayabilmektedir.

İnce ayar aşamasında ise ön eğitim sırasında edinilen genel bilgi, daha küçük ve belirli görevlere odaklı veri kümeleriyle uyarlanır. Önceden eğitilmiş bir model, bu yöntemle duygu analizi, isim varlık tanıma veya makine çevirisi gibi farklı görevlerde yüksek performans sergileyebilir.

Bu iki aşama sayesinde modeller hem genel dil bilgisini korur hem de özel uygulamalarda güçlü sonuçlar elde eder. Sürecin devamında, ön eğitim ve ince ayarın ötesine geçen insan geribildirimleriyle pekiştirmeli öğrenme yöntemleri devreye girerek modellerin çıktılarının kullanıcı beklentilerine daha uyumlu hale gelmesi sağlanmaktadır.

2.3. RLHF ve Yeni Eğitim Stratejileri

İnsan geribildirimleriyle pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning with Human Feedback, RLHF), büyük dil modellerinin insan odaklı hale gelmesinde kritik bir aşama olarak öne çıkmaktadır. Klasik ön eğitim ve ince ayar süreçleri, modellerin dilsel doğruluğunu önemli ölçüde artırsa da kullanıcı beklentilerine uygunluk, güvenlik ve etik standartlara uyum konularında sınırlılıklar barındırabilmektedir. RLHF bu eksiklikleri gidermek amacıyla geliştirilmiş ve gözetimli ince ayar, insan geribildirimi ve pekiştirmeli optimizasyon adımlarının bütünleşik biçimde uygulanmasına dayanan bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır.

Bu yöntemde süreç üç aşamada ilerlemektedir. İlk olarak model, gözetimli ince ayar ile temel görevler üzerinde eğitilir. Ardından insan değerlendiriciler, modelin ürettiği yanıtları kalite açısından sıralar ve tercihlerini belirtir. Son aşamada pekiştirmeli öğrenme algoritmaları, bu insan tercihlerini dikkate alarak modeli yeniden optimize eder.

RLHF'nin etkisi, özellikle son yıllarda geliştirilen etkileşimli dil sistemlerinde açık biçimde gözlemlenmiştir. Bu yöntem sayesinde modeller yalnızca biçimsel olarak doğru yanıtlar üretmekle kalmaz, aynı zamanda kullanıcı dostu, güvenilir ve bağlama uygun çıktılar da sunabilir. Böylece Transformer mimarisi üzerine inşa edilen ön eğitim ve ince ayar süreçleri, RLHF ile rafine edilerek daha üst düzeyde işlevsellik kazanır.

Bununla birlikte, burada önemli bir soru gündeme gelmektedir: Bu modellerin nihai performansını asıl belirleyen etken nedir? Bu sorunun yanıtı, ölçekleme yasalarının sunduğu çerçevede aranmalıdır.

2.4. Ölçekleme Yasaları

Büyük dil modellerinin başarısı yalnızca mimari tasarım ya da eğitim stratejilerinin sonucu değildir. Ölçek faktörleri de bu başarıda belirleyici bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar, dil modellerinin performansının üç temel unsurla doğrudan bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Birincisi, eğitim verisinin miktarıdır. Veri setinin büyüklüğü ve çeşitliliği arttıkça model, dilin yapısını daha geniş kapsamda öğrenebilmekte ve daha farklı bağlamlarda doğru sonuçlar üretebilmektedir. İkincisi, modelin parametre sayısıdır. Daha fazla parametreye sahip modeller, daha karmaşık örüntüleri yakalama kapasitesine sahiptir. Bu nedenle milyarlarca parametreye sahip büyük ölçekli modeller, daha önce çözilemeyen ya da imkânsız görülen görevlerde yüksek başarı gösterebilmektedir. Üçüncü unsur ise hesaplama gücüdür. Yeterli donanım desteği olmadan bu denli büyük modellerin eğitimi mümkün değildir. Günümüzde GPU ve TPU kümeleri, bu sürecin en temel bileşenleri olarak öne çıkmaktadır.

Bu üç unsur arasında öngörülebilir bir ölçekleme ilişkisi bulunmaktadır. Eğitim verisi, parametre sayısı ve hesaplama gücü birlikte artırıldığında, model performansında düzenli bir iyileşme gözlenmektedir. Bu ilişki yalnızca mevcut başarıları açıklamakla kalmamakta, aynı zamanda gelecekteki model geliştirme çalışmalarına da yol göstermektedir. Böylece büyük dil modellerinin gelişimi, yalnızca algoritmik yeniliklerle değil, aynı zamanda ölçeklendirme stratejileriyle de şekillenmektedir.

3. Veri ve Uygulama Alanları

Büyük dil modellerinin (LLM) başarısı, yalnızca mimari yenilikler ve eğitim stratejileri ile sınırlı değildir. Bu modellerin yeteneklerinin gelişmesinde, kullanılan veri setlerinin ölçeği ve çeşitliliği kadar, uygulama alanlarının genişliği de belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, LLM'lerin veri kaynakları, genel kullanım alanları, alan odaklı uygulamalar ve çok modlu yaklaşımlar ayrıntılı biçimde ele alınmalıdır (Kaplan vd., 2020).

3.1 Büyük Ölçekli Veri Setlerinin Rolü

Büyük dil modellerinin performansı, eğitimde kullanılan veri setlerinin kapsamı ile doğrudan ilişkilidir (Gao vd., 2021). Erken dönem dil modelleri genellikle sınırlı boyutta ve tekdüze veri kümeleriyle eğitildiği için yalnızca belirli görevlerde kısmi başarı gösterebilmekteydi. Ancak günümüzde kullanılan LLM'ler, milyarlarca kelimeden oluşan ve farklı türleri kapsayan devasa derlemeler üzerinde eğitilmektedir. Kitaplar, ansiklopedik kaynaklar, akademik makaleler, çevrimiçi forumlar, haber arşivleri, Wikipedia içerikleri ve yazılım kod depoları, modern modellerin başlıca eğitim kaynakları arasında yer almaktadır.

Bu çeşitlilik, modellerin yalnızca gündelik dilde değil, aynı zamanda uzmanlık gerektiren disiplinlerde de güçlü performans göstermesini sağlamaktadır. Örneğin, hukuki metinlerden öğrenen bir model, sözleşme analizi konusunda yüksek doğruluk sergileyebilirken; yazılım kod depoları üzerinde eğitilen bir model, programlama hatalarını saptama ve kod tamamlama gibi görevlerde başarılı olmaktadır. LLM'lerin tipik veri kaynakları oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır: kamuya açık web sitelerinin taranmasıyla elde edilen veriler, açık kaynak veri kümeleri, lisanslı veya özel erişime tabi ticari veri setleri ve kullanıcı tarafından üretilen ya da kitle kaynaklı içerikler bu kapsamda başlıca kullanılan veri kaynaklarıdır. Bu çok yönlü veri ekosistemi, modellerin hem genel hem de alan-öзgü görevlerde yüksek performans göstermesini mümkün kılmaktadır.

3.2 Genel Uygulamalar

LLM'ler, öncelikle doğal dil işleme alanının klasik görevlerinde etkili sonuçlar üretmektedir. Makine çevirisi, bu görevlerin başında gelmektedir

(Johnson vd., 2017); devasa çok dilli veri setleri üzerinde eğitilen modeller, insan çevirmenlere yakın doğrulukta sonuçlar üretebilmekte ve bağlamsal uyumu yüksek metinler oluşturabilmektedir. Benzer biçimde, metin özetleme görevlerinde uzun ve karmaşık belgelerden özlü bilgiler çıkarılabilmekte, bu durum akademik araştırmadan haber takibine kadar geniş bir kullanım alanı yaratmaktadır.

Soru-cevap sistemleri de LLM'lerin öne çıktığı bir diğer alandır (Rajpurkar vd., 2016). Bu tür sistemlerde model, verilen soruya ya doğrudan bir yanıt üretmekte ya da mevcut belgelerden doğru pasajı seçmektedir. Diyalog sistemleri, kullanıcılarla etkileşimli sohbet kurabilme yeteneği ile öne çıkarken, müşteri hizmetlerinden kişisel asistanlara kadar pek çok alanda yaygınlaşmaktadır. Son olarak, kod üretimi ve yazılım geliştirme desteği de LLM'lerin önemli bir genel uygulama alanı haline gelmiştir. Yazılım kod depolarından öğrenen modeller, kod tamamlama, hata tespiti ve otomatik belge üretimi gibi işlevlerde yüksek performans göstermektedir. Bu genel uygulamalar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Büyük Dil Modellerinin Uygulama Alanları

Uygulama Alanı	Açıklama
Makine çevirisi	Çok dilli veri setleri üzerinde eğitilmiş modeller, bağlamsal uyumu yüksek ve akıcı çeviriler üretmektedir.
Metin özetleme	Uzun belgelerden, makalelerden veya raporlardan özlü ve anlaşılır özetler çıkarılmasını sağlamaktadır.
Soru-cevap sistemleri	Belirli bir bağlama dayalı ya da genel bilgi tabanlı sorulara uygun yanıtlar üretebilmektedir.
Diyalog sistemleri	Kullanıcılarla doğal, bağlama duyarlı ve tutarlı sohbet etkileşimleri kurabilmektedir.
Kod üretimi	Yazılım kod depolarından öğrenen modeller, kod tamamlama, hata tespiti ve belge üretimi gibi görevlerde başarı göstermektedir.

Tablo 2, büyük dil modellerinin günümüzde öne çıkan genel uygulama alanlarını ve bu alanlardaki temel işlevlerini özetlemektedir.

3.3 Alan Odaklı Uygulamalar

Büyük dil modellerinin en dikkat çekici yönlerinden biri, belirli alanlara özgü veri kümeleriyle uyarlanabildiğinde ortaya çıkan yüksek katma değerdir. Sağlık alanında geliştirilen modeller, klinik notların analizinde, biyomedikal literatürün özetlenmesinde ve tanı destek sistemlerinde kayda değer başarılar göstermektedir (Lee vd., 2020). Hukuk alanında ise mevzuat incelemesi, dava özetleme ve yargı kararlarının analizi gibi görevlerde etkin biçimde kullanılmaktadır. Eğitim sektöründe, otomatik değerlendirme sistemleri, kişiselleştirilmiş öğrenme materyalleri ve soru üretimi gibi uygulamalar öğrencilerin öğrenme süreçlerini desteklemektedir. Yazılım geliştirme alanında ise yalnızca kod üretimi değil, aynı zamanda yazılım güvenliği, hata analizi ve optimizasyon süreçlerinde de modellerin katkısı giderek artmaktadır.

Bu alan odaklı uygulamalar, büyük dil modellerinin yalnızca dil işleme becerileriyle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda uzmanlık gerektiren konularda alan bilgisi üretebildiğini göstermektedir. Böylece bu sistemler, genel amaçlı dil işleyicilerden öteye geçerek belirli disiplinlerde uzmanlaşabilen ve somut değer üretebilen araçlar haline gelmektedir.

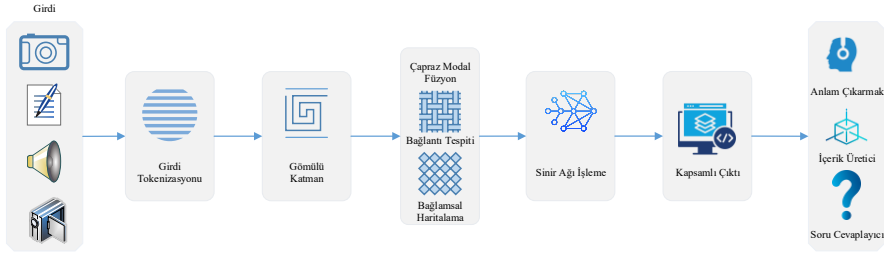
3.4 Çok Modlu LLM'ler

Dil modellerinde son dönemde yaşanan en önemli gelişmelerden biri de, yalnızca metinle sınırlı kalmayan ve farklı veri türlerini bir arada işleyebilen çok modlu LLM'lerin ortaya çıkışıdır. Bu tür modeller, metinle birlikte görselleri, sesleri ve hatta sensör verilerini işleyerek daha kapsamlı ve insan benzeri bilişsel beceriler sergileyebilmektedir (Radford vd., 2021).

Örneğin CLIP, metin ve görsel veriyi ortak bir temsil uzayında ilişkilendirebilmiş; GPT-5 gibi yeni nesil modeller ise metin, görsel ve ses girdilerini bütünleştirerek karmaşık çok modlu görevlerde başarı göstermiştir. Bu gelişmeler, dil modellerinin yalnızca “dil işleyiciler” olmaktan çıkıp, çok yönlü genel amaçlı yapay zekâ sistemleri haline gelmekte olduğunu göstermektedir.

Modern LLM'lerin başarısını belirleyen faktörler arasında veri kaynaklarının çeşitliliği, genel ve alan odaklı uygulamalardaki esneklik ve çok modlu yeteneklerin yükselişi önemli bir yer tutmaktadır. Eğitim verisinin kapsamı, modellerin dilsel ve bağlamsal kapasitesini artırırken, uygulama

alanlarındaki yaygınlaşma bu kapasitenin pratik faydaya dönüşmesini sağlamaktadır. Çok modlu yaklaşımlar ise LLM'lerin gelecekte yalnızca yazılı dili değil, insanın etkileşim kurduğu tüm veri biçimlerini kapsayacak şekilde gelişeceğini işaret etmektedir. Şekil 3'de çok modlu bir LLM örneği sunulmaktadır.



Şekil 3. Çok modlu LLM örneği

4. Zorluklar ve Güncel Tartışmalar

Doğal Dil İşleme (NLP) alanında derin öğrenme yöntemleri ve özellikle büyük dil modelleri (LLM) son yıllarda olağanüstü bir ilerleme göstermiştir. Milyarlarca parametreye sahip bu sistemler, metin anlama, üretme ve dönüştürme becerilerinde insan performansına yaklaşan sonuçlar sunmaktadır. Ancak bu gelişmeler yalnızca olumlu sonuçlar doğurmamış, aynı zamanda çözülmesi gereken yeni sorunları ve çok yönlü tartışmaları da gündeme getirmiştir.

NLP araştırmalarında öne çıkan zorlukların başında yüksek hesaplama maliyetleri ve enerji tüketimi yer almaktadır. Büyük modellerin eğitimi, milyonlarca GPU saati ve büyük miktarda elektrik gerektirmekte, bu da hem ekonomik açıdan hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi kaygılar doğurmaktadır.

Bir diğer tartışma alanı, veri önyargıları ve etik sorunlardır. İnternette toplanan devasa veri kümeleri, toplumdaki önyargıları ve ayrımcı dil kalıplarını da beraberinde taşımakta; bu da model çıktılarında cinsiyet, ırk veya ideoloji temelli yanlılıklara yol açabilmektedir (Bender vd., 2021). Aynı zamanda telif hakları, veri gizliliği ve kişisel bilgilerin korunması da çözüm bekleyen önemli etik meseleler arasında yer almaktadır. Halüsinasyon ve güvenlik riskleri de

güncel tartışmaların merkezindedir. Dil modelleri, gerçekte var olmayan bilgileri yüksek ikna edicilikle sunabilir ya da kötü niyetli kullanıcıların saldırılarına maruz kalabilir. Bu durum, özellikle hukuk, sağlık ve yazılım gibi kritik alanlarda güvenilirlik ve güvenlik konularını öne çıkarmaktadır (Ji vd., 2023).

Son olarak, açık kaynak ve kapalı modeller arasındaki rekabet, NLP araştırmalarının geleceğini şekillendiren en önemli tartışmalardan biridir. Açık kaynaklı yaklaşımlar şeffaflık ve yenilik hızını artırırken, kapalı modeller ticari değer, güvenlik ve fikri mülkiyet hakları açısından öne çıkmaktadır.

Bu başlıklar, NLP'nin yalnızca teknik bir ilerleme alanı değil; aynı zamanda toplumsal, ekonomik ve etik boyutlarıyla da dikkatle değerlendirilmesi gereken bir araştırma sahası olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1. Hesaplama Maliyetleri ve Enerji Tüketimi

Büyük dil modellerinin eğitimi, milyarlarca parametre üzerinde trilyonlarca matris çarpımı gerektirir. Bu süreç yalnızca zaman açısından değil, aynı zamanda maliyet ve enerji tüketimi açısından da önemli bir yük getirmektedir. Eğitim sürecinde kullanılan devasa GPU kümeleri, elektrik tüketimi ve soğutma ihtiyaçlarıyla birlikte sürdürülebilirlik kaygılarını artırmaktadır. Tablo 3 üzerinde bahsedilen maliyetlere örnekler sunulmadır.

Tablo 3. Büyük ölçekli modellerin eğitim maliyetlerine dair yaklaşık değerler

Model	Parametre Sayısı	Eğitim GPU-Saat	Enerji Tüketimi (MWh)	Tahmini Maliyet (\$)
GPT-3 (2020)	175B	~3.6 milyon	~1.300	~4–5 milyon
PaLM (2022)	540B	~8.9 milyon	~3.500	~10–15 milyon
GPT-4 (2023)	~1T	>20 milyon	>8.000	~50+ milyon

Tablo 3'den görüldüğü üzere, parametre sayısı arttıkça GPU saatleri, enerji tüketimi ve maliyetler katlanarak yükselmektedir. GPT-4'ün eğitimi, yüz milyonlarca dolar yatırım gücüne sahip birkaç teknoloji devi dışında hiçbir

kurum için erişilebilir değildir. Bu durum, akademik araştırmacılar ve küçük girişimler için ciddi bir bariyer oluşturmaktadır. Ayrıca yüksek enerji tüketimi, yapay zekânın çevresel etkileri konusundaki etik tartışmaları derinleştirmektedir.

4.2. Veri Önyargıları ve Etik Sorunlar

Büyük dil modelleri genellikle internetten ve çeşitli dijital kaynaklardan toplanan çok büyük ölçekli veri setleriyle eğitilmektedir. Ancak bu veriler, toplumda zaten var olan önyargıları, ayrımcı söylemleri ve yanlış bilgileri de beraberinde taşımaktadır. Bu nedenle, model çıktılarında cinsiyet, ırk, kültür veya ideoloji temelli yanlılıkların görülmesi mümkündür. Özellikle hukuk, işe alım süreçleri, eğitim ve sağlık gibi kritik alanlarda bu tür önyargılar, ciddi toplumsal ve bireysel riskler yaratabilmektedir.

Etik boyutta dikkat çeken bir diğer konu, telif hakkı, veri gizliliği ve kişisel verilerin korunmasıdır. Örneğin, telifli makalelerden, kitaplardan veya çevrim içi içeriklerden alınan verilerle eğitilen bir modelin ürettiği çıktının hukuki statüsü hâlâ netlik kazanmamıştır. Benzer şekilde, kullanıcıların özel bilgilerinin istem dışı olarak modele yansımaları, hem mahremiyet hem de güvenlik açısından tartışmalı bir durum yaratmaktadır.

Sonuç olarak, büyük dil modellerinin yaygınlaşması yalnızca teknik bir başarı değil; aynı zamanda önyargıların önlenmesi, telif haklarının korunması ve kullanıcı gizliliğinin sağlanması gibi derin etik sorumlulukları da beraberinde getirmektedir.

4.3. Halüsinasyon ve Güvenlik Riskleri

Dil modelleri, temel olarak istatistiksel olasılıklara dayalı metin üretir. Bu yaklaşım, kimi zaman gerçekte var olmayan bilgilerin son derece ikna edici biçimde sunulmasına yol açabilir. Literatürde bu sorun “halüsinasyon” olarak adlandırılmaktadır.

Halüsinasyonların etkisi, kullanıldığı bağlama göre değişkenlik gösterir. Örneğin, akademik çalışmalarda sahte referanslar üretmek, yazılım geliştirmede hatalı kodlar önermek veya sağlık alanında yanlış tıbbi tavsiyeler sunmak, ciddi sonuçlara neden olabilir. Bu durum, LLM’lerin güvenilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır.

Bunun yanı sıra, güvenlik riskleri de göz ardı edilemez. Özellikle “prompt injection” saldırıları, modellerin istenmeyen çıktılar üretmesine ya da gizli bilgilere erişmesine imkân tanıyabilir. Bu nedenle, büyük dil modellerinin güvenlik testlerinden geçirilmesi, çıktıların doğrulanması ve güvenlik protokollerinin geliştirilmesi giderek daha kritik bir araştırma alanı haline gelmiştir.

4.4. Açık Kaynak vs. Kapalı Modeller Tartışması

Son yıllarda yapay zekâ ekosisteminde en hararetli tartışmalardan biri, büyük dil modellerinin açık mı kapalı mı olması gerektiğidir. Açık kaynaklı modeller araştırma özgürlüğü, şeffaflık ve inovasyonu desteklerken; kapalı modeller güvenlik, veri kontrolü ve ticari koruma sağladığını savunmaktadır. Tablo 4. üzerinde açık lisanslı ve kapalı lisanslı dil modellerine ait karşılaştırması sunulmaktadır.

Tablo 4. Açık ve kapalı büyük dil modellerinin karşılaştırması

Model	Parametre Sayısı	Erişim Tipi	Lisans / Açıklık	Kullanım Alanı
LLaMA 3 (Meta, 2024)	8B – 70B	Açık	Açık kaynak	Akademi, Ar-Ge
GPT-4 (OpenAI, 2023)	~1T	Kapalı	Ticari, kapalı	Genel amaçlı, endüstri
Mistral (2024)	7B – Mixtral 8×22B	Açık	Apache 2.0	Uygulama entegrasyonu, araştırma

LLaMA ve Mistral gibi açık kaynaklı modeller, araştırmacılar için düşük maliyetli deneyler yapmayı mümkün kılarken, topluluk katkıları sayesinde hızla gelişmektedir. Buna karşılık GPT-4 gibi kapalı modeller, ticari ürünler için yüksek performans ve güvenlik vaat etmektedir ancak şeffaflık eksikliği sebebiyle akademik dünyada eleştirilmektedir. Bu ikilem, NLP alanının gelecekte hangi yöne evrileceğini belirleyecek en önemli tartışmalardan biridir.

5. Gelecek Perspektifi ve Sonuç

Doğal Dil İşleme (NLP) alanı, yapay zekâ araştırmalarının en dinamik alt dallarından biri olmaya devam etmektedir. Büyük dil modelleri (LLM) yalnızca teknik ilerlemeler açısından değil, aynı zamanda toplumsal, ekonomik ve etik boyutlarıyla da gündemin merkezinde yer almaktadır. Önümüzdeki yıllarda araştırmaların ve uygulamaların odaklanacağı konular arasında daha küçük ve verimli modellerin geliştirilmesi, toplumsal etkilerin dengelenmesi, çok modlu sistemlerin yükselişi ve yapay genel zekâ (AGI) vizyonu öne çıkmaktadır.

5.1. Daha Küçük ve Verimli Modeller

Günümüzde milyarlarca parametreye sahip büyük dil modelleri, etkileyici bir performans sergilemekte ve pek çok görevde insan düzeyine yakın başarılar ortaya koymaktadır. Ancak bu modellerin eğitimi ve çalıştırılması için gereken devasa hesaplama gücü, hem ekonomik maliyetler hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından eleştirilere yol açmaktadır. Yüksek enerji tüketimi ve donanım gereksinimleri, yalnızca teknoloji devleri için erişilebilir bir yapay zekâ ekosistemi doğurmakta; bu durum ise daha küçük, verimli ve erişilebilir modellerin geliştirilmesini öncelikli bir araştırma gündemi haline getirmektedir (Strubell vd., 2020).

Bu amaçla çeşitli yöntemler ortaya konulmuştur. Bunlardan biri bilgi damıtma (model distillation) yaklaşımıdır (Sanh vd., 2020). Bu yöntemde, büyük ve güçlü bir model “öğretmen” rolünü üstlenirken, daha küçük bir “öğrenci” model onun çıktılarından öğrenmektedir. Öğrenci model, öğretmen modelin tahminlerini taklit ederek eğitildiği için çok daha az parametreye sahip olmasına rağmen benzer bir performans gösterebilmektedir. Nitekim BERT modelinden türetilen DistilBERT, yaklaşık yüzde kırk daha az parametreyle eğitilmesine rağmen, doğruluk açısından BERT’e oldukça yakın sonuçlar sunmaktadır.

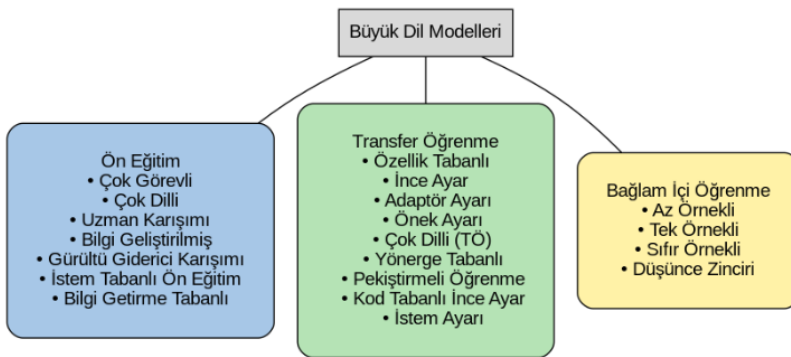
Bir diğer yöntem sayısallaştırma (quantization) olarak adlandırılmaktadır. Bu teknikte, modelin ağırlıklarının hassasiyeti düşürülmekte ve yüksek bellek kullanımına yol açan 32-bit temsiller yerine 8-bit veya 4-bit gibi daha düşük çözünürlüklü sayısal gösterimler tercih edilmektedir (Dettmers vd., 2022). Bu sayede model boyutu küçülmekte, hesaplama maliyeti azalmaktadır. Özellikle mobil cihazlarda ve gömülü sistemlerde çalışan uygulamalarda, sayısallaştırma

teknîği büyük dil modellerinin kullanımını mümkün kılan en kritik yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca (pruning) yöntemi de verimlilik artırma çalışmalarında öne çıkmaktadır. Budama, modelin tahmin performansına kayda değer katkı sağlamayan nöronların veya bağlantıların kaldırılmasına dayanmaktadır (Han vd., 2015). Böylece model gereksiz parametrelerden arındırılmakta ve daha hafif, hızlı çalışan bir yapı elde edilmektedir. Bu yöntem, özellikle büyük modellerin daha kısıtlı donanım üzerinde çalıştırılabilmesini kolaylaştırmaktadır.

Son olarak, düşük dereceli yaklaşımlar (low-rank approximation) bellek kullanımını azaltmak amacıyla yaygın biçimde incelenmektedir. Bu teknikte, modeldeki büyük boyutlu ağırlık matrisleri düşük boyutlu faktörlere ayrıştırılarak daha kompakt bir biçimde temsil edilmektedir. Bu yaklaşım, parametre sayısını azaltırken, öğrenilmiş temsillerin temel özelliklerini korumayı hedeflemektedir.

Tüm bu yöntemler, günümüzde araştırmacıların yalnızca daha güçlü değil, aynı zamanda daha erişilebilir, verimli ve sürdürülebilir dil modelleri geliştirme yönündeki çabalarının somut örnekleridir. Küçük ve optimize edilmiş modeller, yüksek donanım gücüne sahip olmayan kullanıcılar için yapay zekâ uygulamalarını erişilebilir hale getirmekte; aynı zamanda enerji tüketiminin azaltılması sayesinde küresel ölçekte daha çevre dostu bir yapay zekâ ekosisteminin oluşmasına katkı sunmaktadır. Şekil 4 üzerinde model küçültme teknikleri gösterilmiştir.



Şekil 4 Model küçültme teknikleri

Günümüzde model küçültme teknikleri optimizasyon algoritmalarına bağlı olarak performans gösterebilmektedirler.

5.2. Toplumsal ve Ekonomik Etkiler

Büyük dil modellerinin etkileri yalnızca teknik boyutlarla sınırlı değildir; bu teknolojilerin toplumsal ve ekonomik sonuçları da giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Eğitim alanında LLM'ler, öğrencilere ve araştırmacılara bilgiye hızlı erişim imkânı sunmakta ve bireysel öğrenme süreçlerinin kişiselleştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, modellerin zaman zaman yanlış veya önyargılı bilgi üretmesi, eğitim kalitesini ve öğrenme güvenilirliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Dolayısıyla bu teknolojilerin eğitimde kullanımı, fırsatlar kadar riskler de barındırmaktadır.

İşgücü piyasası açısından bakıldığında, tekrarlayan dil tabanlı görevlerin otomasyonu önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Çeviri, metin özetleme, müşteri desteği ve benzeri alanlarda sağlanan verimlilik artışı, bazı meslek gruplarında iş kaybı riskini beraberinde getirmektedir. Bu durum, çalışanların yeni beceriler edinmesini teşvik edecek yeniden eğitim ve dönüşüm politikalarının hayata geçirilmesini gerekli kılmaktadır (Liu & Lapata, 2019).

Ekonomik düzeyde, yapay zekâ tabanlı ürün ve hizmetlerin artışı yazılım endüstrisinde yeni iş kolları ve girişim fırsatları yaratmaktadır. Ancak bu gelişmelerin bir diğer yönü de altyapısal maliyetlerdir. Özellikle veri merkezlerinin artan enerji tüketimi, karbon ayak izinin büyümesine yol açmakta ve bu nedenle “yeşil yapay zekâ” olarak adlandırılan enerji verimliliği odaklı araştırmalar giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Yasal düzenlemeler de bu teknolojilerin toplumsal etkilerini yönlendiren kritik unsurlardan biridir. Avrupa Birliği'nin Yapay Zekâ Yasası (AI Act) gibi girişimler, büyük dil modellerinin şeffaf, güvenli ve etik ilkelere uygun şekilde geliştirilmesini ve kullanılmasını sağlamayı hedeflemektedir. Bu düzenlemeler, yalnızca kullanıcıların güvenliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda yapay zekâ ekosisteminin sürdürülebilir biçimde gelişmesine de katkı sunmaktadır.

Bütün bu faktörler değerlendirildiğinde, büyük dil modelleri hem eğitim ve istihdam hem de ekonomi ve hukuk alanlarında dönüştürücü bir potansiyel taşımaktadır. Ancak bu dönüşümün olumlu sonuçlar yaratabilmesi, teknolojinin

yalnızca teknik kapasitesiyle değil, aynı zamanda toplumsal uyum, etik sorumluluk ve düzenleyici çerçevelerle desteklenmesiyle mümkün olacaktır.

5.3. AGI ve Sorumlu Yapay Zekâ Araştırmaları

Doğal dil işlemenin en heyecan verici yönelimlerinden biri, insan zekâsına benzer esneklik ve yaratıcılık sergileyebilecek sistemlerin geliştirilmesi hedefidir. Bu vizyon, literatürde “Yapay Genel Zekâ” (Artificial General Intelligence – AGI) olarak adlandırılmaktadır. AGI, yalnızca tekil görevlerde yüksek performans göstermeyi değil, çok geniş bir problem yelpazesinde mantık yürütebilen, bağlamlar arasında bilgi aktarabilen ve yeni durumlara uyum sağlayabilen sistemlerin varlığını öngörmektedir.

Bununla birlikte AGI fikri, yalnızca teknik bir ilerleme vizyonu değil, aynı zamanda derin etik ve toplumsal tartışmaların da merkezindedir. Özellikle güvenlik boyutu, araştırmaların öncelikli gündemlerinden biridir. AGI sistemlerinin kontrol edilebilirliği, yanlış yönlendirilmesi veya kötüye kullanılması durumunda ortaya çıkabilecek riskler, büyük çaplı zarar potansiyeli taşımaktadır. Etik açıdan ise, bu tür sistemlerin karar alma süreçlerinde önyargısız, şeffaf ve adil bir yaklaşım sergilemesi kritik önemdedir. Ayrıca AGI’nin üreteceği karar ve çıktılardan doğacak sonuçların sorumluluğu da aynı bir tartışma alanıdır; bu sorumluluğun teknoloji geliştiricilere mi, kullanıcıya mı yoksa hukuki otoritelere mi ait olacağı sorusu halen yanıt beklemektedir (Bostrom, 2014).

Günümüzde bu tartışmalar, yalnızca mühendislik düzeyinde değil, aynı zamanda hukuk, siyaset bilimi, felsefe ve etik alanlarının kesişiminde yürütülmektedir. Sorumlu yapay zekâ araştırmaları, AGI’nin yalnızca teknik açıdan mümkün olup olmayacağını değil, aynı zamanda hangi koşullar altında topluma fayda sağlayabileceğini de sorgulamaktadır. Bu nedenle AGI, insanlık için geleceğe dair umut vaat eden fakat aynı zamanda dikkatle yönetilmesi gereken bir vizyon olarak öne çıkmaktadır. Çok modlu büyük dil modelleri üzerinden gerçekleştirilen güncel deneyler, AGI’ye giden yolda önemli ara basamaklar olarak değerlendirilmektedir.

6. SONUÇ

Bu bölümde, Doğal Dil İşleme alanındaki güncel gelişmeler, karşılaşılan zorluklar ve geleceğe yönelik eğilimler bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Büyük dil modellerinin yükselişi, dil tabanlı görevlerde insan seviyesine yaklaşan performanslar sunarken; yüksek hesaplama maliyetleri, enerji tüketimi, veri önyargıları, etik kaygılar ve güvenlik riskleri gibi önemli sorunları da beraberinde getirmiştir. Açık kaynak ile kapalı modeller arasındaki gerilim, alanın araştırma özgürlüğü, inovasyon hızı ve ticari stratejileri açısından belirleyici bir unsur olmaya devam etmektedir.

Geleceğe bakıldığında, model küçültme ve optimizasyon yöntemleri sayesinde daha verimli ve erişilebilir yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesi beklenmektedir. Aynı zamanda, çok modlu modellerin yükselişi, metinle sınırlı olmayan; görsel, işitsel ve diğer modalitelerden beslenen daha güçlü yapay zekâ yeteneklerini mümkün kılacaktır. Bu teknik ilerlemeler, toplumsal ve ekonomik alanlarda derin dönüşümler yaratırken, sorumlu yapay zekâ araştırmaları ve düzenleyici çerçeveler bu dönüşümün dengeli ve güvenli bir şekilde gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, NLP yalnızca bilgisayar bilimi açısından bir yenilik değil, aynı zamanda insan-makine etkileşimini yeniden tanımlayan bir paradigma haline gelmiştir. Önümüzdeki dönemde bu alanın başarısı, teknik üstünlük kadar etik sorumluluk, sürdürülebilirlik ve toplumsal faydayı da merkezine alan yaklaşımlarla mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., & Shmitchell, S. (2021). On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big? *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 610-623. <https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>
- Bostrom, N. (2014). *Superintelligence: Paths, dangers, strategies* (First edition). Oxford University Press.
- Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D. M., Wu, J., Winter, C., ... Amodei, D. (2020). Language models are few-shot learners. *Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 1877-1901. <https://doi.org/10.5555/3495724.3495883>
- Chen, S. F., & Goodman, J. (1999). An empirical study of smoothing techniques for language modeling. *Computer Speech & Language*, 13(4), 359-393. <https://doi.org/10.1006/csla.1999.0128>
- Dettmers, T., Lewis, M., Belkada, Y., & Zettlemoyer, L. (2022). GPT3.int8(): 8-bit Matrix Multiplication for Transformers at Scale. İçinde S. Koyejo, S. Mohamed, A. Agarwal, D. Belgrave, K. Cho, & A. Oh (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (C. 35, ss. 30318-30332). Curran Associates, Inc. https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/file/c3ba4962c05c49636d4c6206a97e9c8a-Paper-Conference.pdf
- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *Proceedings of the 2019 Conference of the North*, 4171-4186. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2021). *An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale* (No. arXiv:2010.11929). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>

- Gao, L., Biderman, S., Black, S., Golding, L., Hoppe, T., Foster, C., Phang, J., He, H., Thite, A., Nabeshima, N., Presser, S., & Leahy, C. (2021). *The Pile: An 800GB Dataset of Diverse Text for Language Modeling* (Versiyon 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2101.00027>
- Han, S., Pool, J., Tran, J., & Dally, W. J. (2015). Learning both weights and connections for efficient neural networks. *Proceedings of the 29th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 1, I*, 1135-1143. <https://doi.org/10.5555/2969239.2969366>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Ji, Z., Lee, N., Frieske, R., Yu, T., Su, D., Xu, Y., Ishii, E., Bang, Y. J., Madotto, A., & Fung, P. (2023). Survey of Hallucination in Natural Language Generation. *ACM Computing Surveys*, 55(12), 1-38. <https://doi.org/10.1145/3571730>
- Johnson, M., Schuster, M., Le, Q. V., Krikun, M., Wu, Y., Chen, Z., Thorat, N., Viégas, F., Wattenberg, M., Corrado, G., Hughes, M., & Dean, J. (2017). Google's Multilingual Neural Machine Translation System: Enabling Zero-Shot Translation. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, 5, 339-351. https://doi.org/10.1162/tacl_a_00065
- Kaplan, J., McCandlish, S., Henighan, T., Brown, T. B., Chess, B., Child, R., Gray, S., Radford, A., Wu, J., & Amodei, D. (2020). *Scaling Laws for Neural Language Models* (No. arXiv:2001.08361). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08361>
- Lee, J., Yoon, W., Kim, S., Kim, D., Kim, S., So, C. H., & Kang, J. (2020). BioBERT: A pre-trained biomedical language representation model for biomedical text mining. *Bioinformatics*, 36(4), 1234-1240. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz682>
- Liu, Y., & Lapata, M. (2019). *Text Summarization with Pretrained Encoders* (No. arXiv:1908.08345). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.08345>

- Ouyang, L., Wu, J., Jiang, X., Almeida, D., Wainwright, C. L., Mishkin, P., Zhang, C., Agarwal, S., Slama, K., Ray, A., Schulman, J., Hilton, J., Kelton, F., Miller, L., Simens, M., Askell, A., Welinder, P., Christiano, P., Leike, J., & Lowe, R. (2022). Training language models to follow instructions with human feedback. *Proceedings of the 36th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 27730-27744. <https://doi.org/10.5555/3600270.3602281>
- Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Askell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G., & Sutskever, I. (2021). Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision. *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning*, 8748-8763. <https://proceedings.mlr.press/v139/radford21a.html>
- Rajpurkar, P., Zhang, J., Lopyrev, K., & Liang, P. (2016). *SQuAD: 100,000+ Questions for Machine Comprehension of Text* (No. arXiv:1606.05250). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.05250>
- Sanh, V., Debut, L., Chaumond, J., & Wolf, T. (2020). *DistilBERT, a distilled version of BERT: Smaller, faster, cheaper and lighter* (No. arXiv:1910.01108). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.01108>
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2020). Energy and Policy Considerations for Modern Deep Learning Research. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 34(09), 13693-13696. <https://doi.org/10.1609/aaai.v34i09.7123>
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, 6000-6010. <https://doi.org/10.5555/3295222.3295349>

BÖLÜM 4

DERİN ÖĞRENME: KURAMSAL TEMELLER, MİMARİLER VE GÜNCEL UYGULAMALAR

Öğr. Gör. Bilal İNAN¹
Prof. Dr. Nurettin DOĞAN²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17980008>

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu , Yazılım, Uygulama Geliştirme ve Çözümleme Bölümü, Sakarya, Türkiye. bilalinan@subu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-5324-1604

² Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye. nurettin.dogan@selcuk.edu.tr, orcid id: 0000-0002-8267-8469

1. GİRİŞ

Derin öğrenme, günümüz yapay zekâ araştırmalarında temel belirleyici yaklaşım hâline gelmiştir. Geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri insan tarafından tanımlanan özelliklere dayanırken derin öğrenme çok katmanlı sinir ağları aracılığıyla ham veriden temsil üretebilme yeteneği sunar (Hatcher ve Yu, 2018; Sarker, 2021). Bu temsil gücü özellikle görüntü, metin ve ses gibi yüksek boyutlu veri yapılarında önceki yöntemlere kıyasla belirgin performans üstünlükleri sağlamıştır.

Bu gelişimi mümkün kılan üç temel unsur vardır. Bu üç temel dinamik Şekil 1’de özetlenmiştir.



Şekil 1. Derin öğrenmenin yükselişini belirleyen üç temel dinamik

Şekil 1’de gösterildiği gibi ilk unsur, sensör teknolojileri ve dijital platformlar üzerinden üretilen büyük veri hacmidir. Bu veri miktarı yüksek parametrelili modellerin eğitilmesi için gerekli çeşitliliği sağlar (Jordan ve Mitchell, 2015). İkinci unsur, GPU ve TPU gibi donanım hızlandırıcıları ile bulut bilişim altyapılarıdır. Bu altyapılar çok katmanlı sinir ağlarının pratik sürelerde eğitilebilmesine olanak tanır (Hatcher ve Yu, 2018). Üçüncü unsur ise konvolüsyonel sinir ağları ve Transformer yapıları gibi mimari yeniliklerdir. Bu yapılar farklı veri türlerinin özelliklerinin doğrudan model mimarisine entegre edilmesini mümkün kılar (Vaswani ve ark., 2017; Khan ve ark., 2022).

Bu üç unsurun birleşimi derin öğrenmeyi araştırma alanından çıkarıp sağlık bilişimi, finans, eğitim ve güvenlik gibi pek çok sektörde yaygın kullanılan bir teknoloji hâline getirmiştir. Özellikle tıbbi görüntü analizinde sınıflandırma, segmentasyon ve lezyon tespiti görevlerinde derin öğrenme modelleri klinik karar süreçlerini hızlandıran güçlü araçlar hâline gelmiştir (Esteve ve ark., 2019; Topol, 2019).

Derin öğrenmenin bu kadar geniş bir alanda kullanılmaya başlaması etik sorumlulukları ve açıklanabilirlik ihtiyacını da gündeme getirmiştir. Kritik alanlarda model doğruluğu tek başına yeterli değildir. Modellerin nasıl karar verdiğinin anlaşılabilir olması gerekir. Bu gereklilik açıklanabilir yapay zekâ çalışmalarını derin öğrenme araştırmalarının ayrılmaz bir bileşeni hâline getirmiştir (Arrieta ve ark., 2020; Gilpin ve ark., 2018).

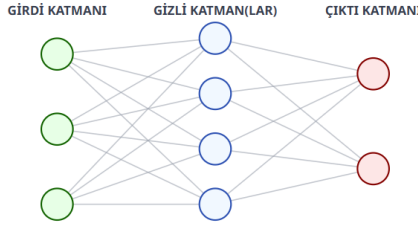
Bu bölümde derin öğrenmenin kuramsal temelleri, mimari yapıları, açıklanabilirlik yaklaşımları ve güncel uygulama alanları sistematik bir çerçeve içinde ele alınmaktadır. Ayrıca federated learning, multimodal modeller ve verimli yapay zekâ yaklaşımları ışığında geleceğe yönelik eğilimler tartışılacak ve bölüm kapsamlı bir SWOT analizi ile tamamlanacaktır.

2. Derin Öğrenmenin Kuramsal Temelleri

Derin öğrenme, ham veriden çok katmanlı temsiller üretebilen yapay sinir ağlarına dayanan modern bir hesaplama yaklaşımıdır. Geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinde özellik çıkarımı büyük ölçüde uzman bilgi gerektirirken derin öğrenme bu süreci otomatikleştirir. Bu nedenle görüntü, metin ve ses gibi karmaşık veri türlerinde üst düzey performans elde edilmesini sağlar (Hatcher ve Yu, 2018; Sarker, 2021).

2.1. Yapay Sinir Ağlarının Temel Mantığı

Yapay sinir ağları, birbirine bağlı yapay nöronlardan oluşan çok katmanlı yapılardır. Şekil 2’de yapay sinir ağının temel yapısı gösterilmektedir.



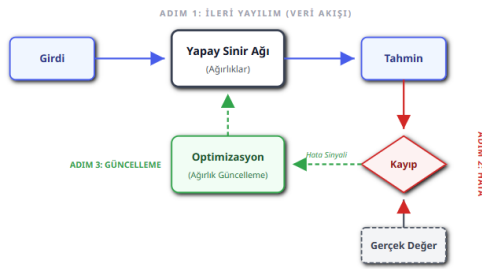
Şekil 2. Yapay Sinir Ağı Temel Yapısı

Şekil 2’de görüldüğü üzere temel olarak bir girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıktı katmanından oluşur. Her nöron, kendisine gelen girdileri ağırlıklandırır ve bir aktivasyon fonksiyonu aracılığıyla dönüştürerek bir sonraki katmana iletir (Hatcher ve Yu, 2018).

Aktivasyon fonksiyonları ağına doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesini sağlar. ReLU, sigmoid ve tanh gibi fonksiyonlar, modelin daha esnek bir temsil kapasitesine ulaşmasına katkı sunar. Katman sayısı arttıkça verinin giderek daha soyut temsil düzeylerine dönüştürülmesi, derin öğrenmenin geleneksel yöntemlerden ayrıldığı temel noktadır (Sarker, 2021).

2.2. Öğrenme Mekanizmaları

Bir derin öğrenme modelinin öğrenme süreci üç temel adımdan oluşur ve genel işleyiş Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Derin Öğrenme Sürecinin Döngüsel İşleyişi

İlk adımda ileri yayılım gerçekleşir ve girdi verisi katmanlardan geçerek çıktı üretilir. İkinci adım kayıp hesaplamasıdır. Bu adımda modelin çıktısı ile gerçek değer arasındaki fark ölçülür. Üçüncü adım geri yayılım sürecidir. Hata

bilgisi modele geri iletilir ve ağırlıklar bu bilgi doğrultusunda güncellenir (Jaiswal ve ark., 2020).

Bu döngü çok sayıda örnek üzerinde tekrarlandığında model daha uygun parametrelere ulaşır. Büyük veri kümeleri ile GPU ya da TPU destekli donanımlar bu sürecin verimli biçimde uygulanmasını sağlar (Hatcher ve Yu, 2018).

2.3. Derin Öğrenmenin Avantajları ve Sınırlılıkları

Derin öğrenmenin öne çıkan avantajı, özellik mühendisliği sürecini büyük ölçüde ortadan kaldırmasıdır. Bu nedenle tıbbi görüntü analizi, doğal dil işleme ve sensör verisi işleme gibi alanlarda yüksek doğruluk düzeyleri elde edilmektedir (Esteva ve ark., 2021). Bununla birlikte bazı sınırlılıklar vardır:

Büyük veri gereksinimi: Veri yetersiz olduğunda modeller aşırı öğrenme eğilimi gösterebilir.

Yüksek hesaplama maliyeti: Geniş mimarilerin eğitimi güçlü donanım gerektirir.

Kara kutu niteliği: Modelin nasıl bir karar verdiğinin açık biçimde anlaşılması özellikle riskli alanlarda sorun oluşturur (Arrieta ve ark., 2020).

Etik riskler: Veri gizliliği ve model önyargısı özellikle sağlık ve finans gibi alanlarda kritik öneme sahiptir (Gilpin ve ark., 2018).

Bu çerçevede derin öğrenme, güçlü bir hesaplama yaklaşımı olmasına rağmen açıklanabilirlik ve veri güvenliği gibi ilkelerle desteklenmesi gereken bir teknolojidir.

3. Derin Öğrenme Mimarileri

Derin öğrenme modellerinin başarısı farklı veri türlerine özgü yapısal özellikleri doğrudan model mimarisine yansıtan özel sinir ağı yapılarından kaynaklanır. Bu bölümde literatürde en yaygın kullanılan üç temel mimari ele alınmaktadır.

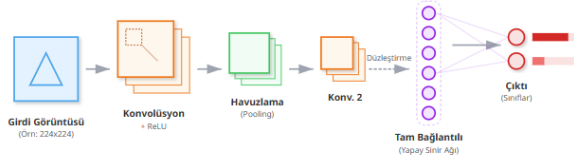
3.1. Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN)

Konvolüsyonel Sinir Ağları görüntü verileri için geliştirilmiş derin öğrenme modelleridir. Temel güçleri yerel örüntüleri filtreler yardımıyla otomatik olarak yakalayabilmeleridir. Böylece kenar, doku ve şekil gibi görsel bileşenler insan müdahalesine gerek kalmadan öğrenilir (Esteva ve ark., 2021). Standart bir CNN şu bileşenlerden oluşur:

- Konvolüsyon katmanları
- Aktivasyon katmanları
- Havuzlama katmanları
- Tam bağlantılı katmanlar

Modern CNN yapıları daha yüksek doğruluğa ulaşmak için optimize edilmiş mimariler kullanır. EfficientNet bu mimarilerin en bilinen örneklerindendir ve model boyutu ile doğruluk arasındaki dengeyi başarılı biçimde korur (Tan ve Le, 2019).

Şekil 4'te tipik bir CNN mimarisinin temel bileşenleri basitleştirilmiş biçimde gösterilmiştir.



Şekil 4. Tipik bir CNN Mimarisi

CNN modelleri tıbbi görüntüleme, otonom sürüş, endüstriyel kalite kontrol ve yüz tanıma gibi alanlarda hâlen temel bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir.

3.2. RNN, LSTM ve GRU Mimarileri

Tekrarlayan Sinir Ağları sıralı ve zaman bağımlı verilerin modellenmesi için geliştirilmiştir. Bu yapılarda geçmiş zaman adımlarından gelen bilgi bir iç durumda tutulur ve model zamansal ilişkileri bu yapı üzerinden öğrenir. Ancak klasik RNN modelleri uzun dizilerde gradyan sönmesi nedeniyle yeterli performans göstermez.

Bu sorun LSTM ve GRU yapılarının geliştirilmesiyle büyük ölçüde giderilmiştir. LSTM uzun dönem bağımlılıklarını yakalayabilen kapı mekanizmaları içerir. GRU daha az parametre ile benzer bir performans üretir ve hesaplama açısından daha verimlidir. Bu mimariler özellikle konuşma tanıma, biyomedikal sinyal işleme ve zaman serisi analizi gibi uygulamalarda hâlen etkili bir seçenek olarak kullanılmaktadır.

3.3. Transformer Mimarileri

Transformer mimarileri derin öğrenmede önemli bir kırılma noktası oluşturmuştur. Bu yapılar tekrarlayıcı katmanlara ihtiyaç duymadan diziler arası ilişkileri self-attention mekanizması ile öğrenir. Bu özellik uzun

dizilerdeki bağlam ilişkilerinin daha etkili biçimde modellenmesini sağlar (Vaswani ve ark., 2017).

Transformer tabanlı modeller doğal dil işlemede belirleyici bir rol oynamaktadır. BERT metin anlama görevlerinde yüksek başarı sağlamıştır (Devlin ve ark., 2018). GPT modelleri metin üretimi, soru yanıtlama ve içerik oluşturma gibi görevlerde güçlü bir performans sunmuştur (Brown ve ark., 2020). Vision Transformer yapısı görüntü sınıflandırmada CNN tabanlı modellere alternatif bir yapı olarak öne çıkmıştır (Vaswani ve ark., 2017; Khan ve ark., 2022).

3.4. Modern Yaklaşımlar: Self-Supervised, Multimodal ve Üretken Modeller

Self-supervised öğrenme etiketsiz veri üzerinde temsil öğrenebilen bir yaklaşımdır. Veri etiketlemenin zor olduğu tıbbi görüntüleme ve biyomedikal alanlarda geniş kullanım alanına sahiptir (Jaiswal ve ark., 202).

Multimodal modeller farklı veri türlerini tek bir yapıda birleştirmeyi mümkün kılar. Görüntü metin ve sensör verilerinin aynı model içinde işlenmesi klinik karar destek ve otonom sistemler gibi alanlarda daha kapsamlı bir çözüm sunar (Xu ve ark., 2023).

Üretken modeller derin öğrenmenin en hızlı gelişen alanlarından biridir. GAN ve Diffusion modelleri görüntü üretimi, veri artırma ve anonimleştirme gibi görevlerde yüksek kaliteli çıktılar üretmektedir (Ho ve ark., 2020). Diffusion modelleri özellikle stabilite ve kalite açısından son yıllarda ön plana çıkmıştır.

4. Açıklanabilir Derin Öğrenme ve Etik Boyut

Derin öğrenme modelleri yüksek sayıda parametre ve karmaşık katman yapılarına sahiptir. Bu nedenle modellerin bir karar verirken hangi bilgiyi nasıl işlediği çoğu durumda doğrudan görülemez. Literatürde kara kutu olarak adlandırılan bu özellik özellikle sağlık, finans, hukuk ve güvenlik gibi yüksek riskli alanlarda önemli belirsizlikler yaratır (Arrieta ve ark., 2020; Gilpin ve ark., 2018). Bir yapay zekâ sisteminin yalnızca yüksek doğruluk üretmesi yeterli değildir. Ürettiği kararın gerekçesinin anlaşılabilir ve doğrulanabilir olması hem teknik hem de etik bir gerekliliktir. Bu nedenle açıklanabilir yapay

zekâ modern derin öğrenme çalışmalarının temel bileşeni hâline gelmiştir (Tjoa ve Guan, 2020).

4.1. Kara Kutu Problemi ve Şeffaflık İhtiyacı

Derin sinir ağları çok katmanlı yapılardan oluşur ve her katmanda binlerce öğrenilmiş ağırlık bulunur. Bir CNN modelinin bir radyografide lezyon tespit ettiği durumda kararın hangi bölgeye dayandığı modelin ham çıktısından anlaşılmaz. Benzer şekilde bir Transformer modelinin bir ifadeyi riskli davranış olarak sınıflandırmasında hangi kelimelere dikkat ettiği doğrudan görülemez. Bu durum uzmanların modelin güvenilirliğini değerlendirmesini zorlaştırır.

XAI yaklaşımlarının temel işlevleri şunlardır:

- Model kararlarının anlaşılabilir biçimde sunulması
- Önyargılı veya hatalı sonuçların erken tespiti
- Kullanıcılar ve alan uzmanları için güven inşa edilmesi
- KVKK ve GDPR gibi düzenlemelere uyum sağlanması

Özellikle sağlık alanında bir sistemin nasıl bir değerlendirme yaptığı klinik sorumluluk ile doğrudan ilişkili olduğu için açıklanabilirlik vazgeçilmezdir (Holzinger ve ark., 2019; Amann ve ark., 2020).

4.2. XAI Teknikleri: Grad-CAM, Grad-CAM++, LIME ve SHAP

Derin öğrenme modellerinin karar süreçlerini görünür kılmak amacıyla çeşitli açıklama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler modelin yalnızca ne yaptığına değil aynı zamanda neden yaptığına ilişkin bilgi sunar ve özellikle sağlık, hukuk ve güvenlik gibi alanlarda kararların doğrulanması açısından önemli bir araçtır. Literatürde öne çıkan tekniklerden ilki Grad-CAM yaklaşımıdır. Grad-CAM CNN tabanlı modellerde sınıf aktivasyonlarının gradyanlarını kullanarak bir görüntü üzerinde hangi bölgelere odaklanıldığını gösterir ve böylece modelin karar mantığına ilişkin görsel bir temsil üretir (Selvaraju ve ark., 2017). Daha gelişmiş bir sürüm olan Grad-CAM++ küçük ve lokalize bölgelerin daha ayrıntılı biçimde açıklanmasını sağlar. Bu özellik özellikle küçük lezyonların tespit edildiği tıbbi görüntüleme uygulamalarında duyarlılığı belirgin biçimde artırır (Chattopadhyay ve ark., 2018).

Açıklama yöntemlerinden bir diğeri modelden bağımsız çalışan LIME yaklaşımıdır. LIME girdiyi küçük parçalara ayırır ve modelin her parçaya

verdiği tepkiyi ölçerek kararın hangi bileşenlere dayandığını ortaya koyar. Model bağımsızlığı sayesinde farklı mimariler için aynı ilke ile uygulanabilir olması yöntemi pratik bir seçenek hâline getirir (Garreau ve von Luxburg, 2020). Bir diğer önemli yaklaşım olan SHAP ise oyun teorisine dayalı matematiksel bir çerçeve kullanır. SHAP her özelliğin model kararına yaptığı katkıyı ayrı bir önem değeri olarak hesaplar ve bu yapı yerel açıklamalar ile küresel model davranışı arasında tutarlı bir geçiş sağlar (Lundberg ve Lee, 2017). Sağlık yapay zekâsı, biyomedikal sinyal analizi ve finans gibi kritik alanlarda SHAP yaklaşımı son yıllarda en sık kullanılan açıklama yöntemlerinden biri hâline gelmiştir (Lundberg ve ark., 2020; Samek ve ark., 2019).

4.3. Etik Sorunlar, Adalet ve Veri Gizliliği

Derin öğrenmenin kritik alanlarda kullanılmaya başlaması etik ve hukuki sorumlulukları daha görünür hâle getirmiştir. Eğitim verilerindeki dengesizlikler belirli gruplara yönelik sistematik hatalara yol açabileceği için veri önyargısı önemli bir risk olarak değerlendirilmektedir. Modelin iç işleyişinin anlaşılabilmesi da özellikle sağlık ve hukuk gibi alanlarda güven sorunlarına neden olur. Bu durum bir kararın neden üretildiğinin açıklanamaması nedeniyle mesleki sorumluluk ve doğrulanabilirlik açısından ciddi kısıtlar oluşturur.

Gizlilik ihlalleri ve sahte güven etkisi de derin öğrenme sistemlerinin karşılaştığı önemli etik sorunlardır. Tıbbi görüntüler ve kişisel bilgilerin hatalı yönetimi hukuki sonuçlar doğurabilir. Ayrıca kullanıcıların modeli olduğundan daha yetkin görmesi kritik hatalara neden olabilir. Bu nedenle açıklanabilir yapay zekâ teknik bir ekleme olmanın ötesinde etik uyum ve hesap verebilirlik açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Amann ve ark., 2020; Tjoa ve Guan, 2020; Holzinger ve ark., 2019; Amann ve ark., 2020).

5. Derin Öğrenmenin Güncel Uygulamaları

Derin öğrenme, farklı veri türlerini yüksek doğrulukla işleyebilmesi nedeniyle güncel yapay zekâ çalışmalarının odağında yer almaktadır. Sağlık bilişimi, doğal dil işleme, otonom sistemler, siber güvenlik ve finans başta olmak üzere birçok alanda derin öğrenme modellerinin performansı, klasik yöntemlerin üzerinde seyretmektedir. Özellikle görüntü temelli görevlerde CNN ve Transformer tabanlı mimariler; sınıflandırma, tespit ve segmentasyon

gibi işlemlerde güvenilir sonuçlar üretmektedir (Esteva ve ark., 2021; Litjens ve ark., 2017). Bu geniş uygulama yelpazesi ve sektörel dağılım Şekil 5'te özetlenmiştir.



Şekil 5. Derin Öğrenme Modellerinin Temel Uygulama Alanları

Sağlık alanı bu gelişmelerden en fazla yararlanan sektörlerden biridir. Tıbbi görüntülerde tümör tespiti, doku segmentasyonu ve otomatik raporlama gibi görevlerde derin öğrenme modelleri uzman kararlarını destekleyici bir rol üstlenmektedir.

Doğal dil işleme alanında Transformer temelli modeller; metin sınıflandırma, özetleme, duygu analizi ve çok modlu içerik yorumlama gibi görevlerde yüksek başarı sağlamaktadır (Devlin ve ark., 2019; Raffel ve ark., 2020). Otonom sürüş sistemlerinde ise nesne tespiti, derinlik tahmini ve çevresel algı süreçleri büyük ölçüde derin öğrenme modelleriyle yürütülmektedir (Grigorescu ve ark., 2020). Benzer biçimde siber güvenlikte anomali tespiti, kötü amaçlı yazılım sınıflandırma ve saldırı analizi gibi kritik görevler derin öğrenmenin sunduğu temsil gücünden yararlanmaktadır (Ferrag ve ark., 2022). Tarım, üretim ve finans sektörlerinde de verim tahmini, kalite kontrol, kestirimci bakım ve sahtekârlık analizi gibi iş akışları derin öğrenme sayesinde daha hızlı ve daha güvenilir biçimde gerçekleştirilebilmektedir (Li ve ark., 2022; Hoang ve Wiegratz, 2023). Bu geniş uygulama yelpazesi, derin öğrenmenin güncel teknolojik dönüşümde merkezi bir rol üstlendiğini açık biçimde göstermektedir.

6. Derin Öğrenmenin Geleceği

Derin öğrenme, günümüzde birçok alanda yüksek doğruluk sunan çözümler üretse de model boyutlarının büyümesi, hesaplama maliyetleri, açıklanabilirlik gereksinimi ve veri gizliliği gibi konular gelecekte odaklanılması gereken temel alanları oluşturmaktadır. Araştırmalar özellikle daha verimli modellerin geliştirilmesi, dağıtık öğrenme yöntemlerinin yaygınlaştırılması ve çoklu veri türlerini tek çatı altında toplayabilen mimarilerin güçlendirilmesi yönünde ilerlemektedir.



Şekil 6. Derin Öğrenmenin Geleceğini Şekillendiren Temel Eğilimler, Araştırma Alanları ve Altyapı Vizyonu

Şekil 6, derin öğrenmenin gelecek vizyonunu oluşturan verimlilik, gizlilik ve altyapı odaklı temel yönelimleri bütüncül bir çerçevede göstermektedir. Bu eğilimler, derin öğrenmenin yalnızca performans açısından değil erişilebilirlik ve güvenilirlik açısından da daha olgun bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır.

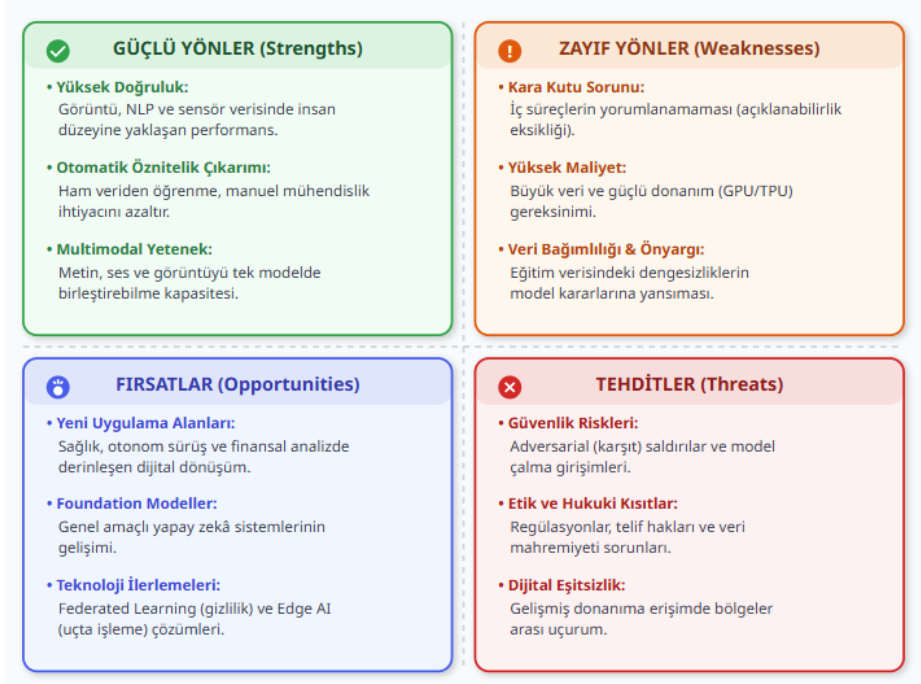
Önümüzdeki dönemde model sıkıştırma, düşük hassasiyetli hesaplama ve hafif mimariler gibi verimlilik odaklı tekniklerin daha fazla yaygınlaşması beklenmektedir (Frantar ve ark., 2022). Federated learning yaklaşımı ise veri gizliliğinin kritik olduğu sağlık ve finans gibi alanlarda merkezi veri toplamaya gerek kalmadan ortak modellerin geliştirilebilmesini mümkün kılmaktadır (Li ve ark., 2020). Bunun yanında multimodal ve foundation modeller, görüntü, metin ve sensör verilerini bütüncül bir yapıda işleyebilen daha genel amaçlı yapay zekâ sistemlerinin temelini oluşturmaktadır (Radford ve ark., 2021; Ramesh ve ark., 2022). Edge AI çözümleri de derin öğrenmenin buluttan

bağımsız şekilde cihaz üzerinde çalışmasına olanak tanıyarak gecikmeyi azaltan ve gizliliği artıran yeni senaryolar sunmaktadır (Chen ve ark., 2019). Uzun vadede kuantum bilgi işlem alanındaki gelişmeler, büyük ölçekli matris işlemlerini hızlandırarak derin öğrenme modellerinin eğitim süreçlerine yeni olanaklar sunabilir (Biamonte ve ark., 2017; Ciliberto ve ark., 2018).

Bu genel çerçeve, derin öğrenmenin geleceğinin yalnızca daha büyük modellerde değil aynı zamanda daha verimli, daha güvenilir ve daha bütünleşik yapay zekâ sistemlerinde şekilleneceğini göstermektedir.

7. SWOT Analizi

Derin öğrenme teknolojileri günümüzde birçok alanda yüksek doğruluk sağlayan çözümler üretmektedir. Bununla birlikte bu teknolojinin güçlü yönlerinin yanında çeşitli sınırlılıkları ve riskleri de bulunmaktadır. SWOT analizi, mevcut durumu bütüncül olarak değerlendirmek ve gelecekteki gelişim alanlarını belirlemek için uygun bir çerçeve sunar. Şekil 7'de derin öğrenme teknolojilerine yönelik SWOT analizi matrisi sunulmuştur.



Şekil 7. Derin Öğrenme Teknolojileri için Swot Analizi Matrisi.

Güçlü yönler arasında derin öğrenmenin görüntü işleme, doğal dil işleme ve sensör verisi analizinde insan uzmanlığına yaklaşan doğruluk sağlaması yer almaktadır (Esteva ve ark., 2021). Modellerin ham veriden temsil öğrenebilmesi, manuel özellik mühendisliğine duyulan ihtiyacı azaltmakta ve farklı veri türlerinde güçlü bir genelleme yeteneği oluşturmaktadır (Radford ve ark., 2021; Ramesh ve ark., 2022). Ayrıca multimodal yapıların gelişmesi sayesinde metin, görüntü ve ses gibi veri kaynakları tek bir modelde bütünleştirilebilmektedir (Xu ve ark., 2023).

Zayıf yönler arasında büyük veri gereksinimi, yüksek hesaplama maliyetleri ve model iç süreçlerinin çoğu durumda yorumlanamaması öne çıkmaktadır. Özellikle kara kutu niteliği sağlık ve hukuki uygulamalarda güven sorununun temel nedenidir (Holzinger ve ark., 2019; Amann ve ark., 2020). Ayrıca eğitim verisindeki dengesizlikler model çıktılarında sistematik önyargılara yol açabilmektedir. Adversarial saldırılar ise modellerin küçük manipülasyonlarla yanlış yönlendirilebileceğini göstermektedir (Akhtar ve Mian, 2018).

Fırsatlar, sağlıkta dijital dönüşüm, federated learning gibi gizlilik korumalı öğrenme yaklaşımları ve edge AI tabanlı gömülü zekâ uygulamalarıdır. Büyük ölçekli foundation modeller, çoklu veri türlerini birlikte işleyerek genel amaçlı yapay zekâ sistemlerinin gelişmesini desteklemektedir (Radford ve ark., 2021; Ramesh ve ark., 2022). Verimlilik odaklı model sıkıştırma ve düşük hassasiyetli hesaplama yöntemleri de daha geniş kullanım alanları için yeni olanaklar sunmaktadır (Frantar ve ark., 2022).

Tehditler arasında etik ve hukuki düzenlemeler, veri gizliliği kısıtları ve güvenlik açıkları bulunmaktadır. Adversarial saldırılar, model çalma girişimleri ve sahte içerik üretimi toplumsal riskleri artırmaktadır (Ho ve ark., 2020). Ayrıca gelişmiş donanım gereksinimleri nedeniyle teknolojiye erişimde farklı kurumlar ve bölgeler arasında belirgin eşitsizlikler ortaya çıkmaktadır.

Bu SWOT değerlendirmesi, derin öğrenmenin gelecekte yalnızca teknik açıdan değil aynı zamanda etik, güvenlik ve eşitlik boyutlarıyla da bütüncül bir şekilde yönetilmesi gerektiğini göstermektedir.

8. Sonuç

Derin öğrenme günümüzde yapay zekâ araştırmalarının ve uygulamalı bilişimin merkezinde yer almaktadır. Çok katmanlı yapay sinir ağlarının ham

veriden temsil öğrenebilmesi, görüntüden doğal dile kadar birçok alanda yüksek doğruluk sağlayan modellerin geliştirilmesine imkân tanımaktadır. CNN, RNN ve Transformer tabanlı yapılar, farklı veri türlerinin yapısal özelliklerine uyum sağlayarak sağlık, finans, güvenlik ve otonom sistemler gibi kritik alanlarda önemli kazanımlar üretmiştir (Esteve ve ark., 2021). Özellikle tıbbi görüntüleme alanında derin öğrenme modelleri, tanısal süreçleri hızlandırmakta ve klinik karar desteği için güvenilir çıktılar sunmaktadır.

Bununla birlikte bu teknolojinin geniş ölçekli uygulamalara taşınması bazı riskleri de beraberinde getirmektedir. Büyük veri ihtiyacı, yüksek hesaplama gereksinimleri, önyargı riski ve model iç süreçlerinin çoğu durumda yeterince açıklanamaması, güvenilir yapay zekâ tasarımı zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımı, yalnızca teknik doğrulama için değil aynı zamanda etik ve hukuki uyum açısından temel bir gereksinim hâline gelmiştir (Arrieta ve ark., 2020). Grad-CAM++ ve SHAP gibi yöntemler, derin modellerin karar mekanizmalarının görünür hâle gelmesini sağlayarak klinik ve kurumsal kabul süreçlerini güçlendirmektedir.

Geleceğe yönelik eğilimler, derin öğrenmenin daha verimli, daha güvenilir ve daha erişilebilir modellerle gelişeceğini göstermektedir. Model sıkıştırma, kuantizasyon, federated learning ve multimodal foundation modeller, yapay zekânın farklı sektörlerde daha yaygın kullanılmasını destekleyecektir (Radford ve ark., 2021; Ramesh ve ark., 2022). Bu çerçevede derin öğrenmenin geleceği yalnızca daha yüksek doğruluk üretmekten ibaret olmayacak aynı zamanda daha şeffaf, daha adil ve insan merkezli yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesiyle şekillenecektir.

Kaynakça

- Akhtar, N., & Mian, A. (2018). Threat of adversarial attacks on deep learning in computer vision: A survey. *Ieee Access*, 6, 14410-14430.
- Amann, J., Blasimme, A., Vayena, E., Frey, D., Madai, V. I., & Precise4Q Consortium. (2020). Explainability for artificial intelligence in healthcare: a multidisciplinary perspective. *BMC medical informatics and decision making*, 20(1), 310.
- Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Benetot, A., Tabik, S., Barbado, A., ... & Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information fusion*, 58, 82-115.
- Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. *Nature*, 549(7671), 195-202.
- Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P., ... & Amodei, D. (2020). Language models are few-shot learners. *Advances in neural information processing systems*, 33, 1877-1901.
- Chattopadhyay, A., Sarkar, A., Howlader, P., & Balasubramanian, V. N. (2018, March). Grad-cam++: Generalized gradient-based visual explanations for deep convolutional networks. In *2018 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV)* (pp. 839-847). IEEE.
- Chen, J., & Ran, X. (2019). Deep learning with edge computing: A review. *Proceedings of the IEEE*, 107(8), 1655-1674.
- Ciliberto, C., Herbster, M., Ialongo, A. D., Pontil, M., Rocchetto, A., Severini, S., & Wossnig, L. (2018). Quantum machine learning: a classical perspective. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 474(2209).
- Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019, June). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In *Proceedings of the 2019 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies, volume 1 (long and short papers)* (pp. 4171-4186).
- Esteva, A., Robicquet, A., Ramsundar, B., Kuleshov, V., DePristo, M., Chou, K., ... & Dean, J. (2019). A guide to deep learning in healthcare. *Nature medicine*, 25(1), 24-29.

- Frantar, E., Ashkboos, S., Hoefler, T., & Alistarh, D. (2022). Gptq: Accurate post-training quantization for generative pre-trained transformers. *arXiv preprint arXiv:2210.17323*.
- Garreau, D. & Luxburg, U.. (2020). Explaining the Explainer: A First Theoretical Analysis of LIME. *Proceedings of the Twenty Third International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, in *Proceedings of Machine Learning Research* 108:1287-1296
- Gilpin, L. H., Bau, D., Yuan, B. Z., Bajwa, A., Specter, M., & Kagal, L. (2018, October). Explaining explanations: An overview of interpretability of machine learning. In *2018 IEEE 5th International Conference on data science and advanced analytics (DSAA)* (pp. 80-89). IEEE.
- Grigorescu, S., Trasnea, B., Cocias, T., & Macesanu, G. (2020). A survey of deep learning techniques for autonomous driving. *Journal of field robotics*, 37(3), 362-386.
- Hatcher, W. G., & Yu, W. (2018). A survey of deep learning: Platforms, applications and emerging research trends. *IEEE access*, 6, 24411-24432.
- Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. *Advances in neural information processing systems*, 33, 6840-6851.
- Holzinger, A., Langs, G., Denk, H., Zatloukal, K., & Müller, H. (2019). Causability and explainability of artificial intelligence in medicine. *Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery*, 9(4), e1312.
- Jaiswal, A., Babu, A. R., Zadeh, M. Z., Banerjee, D., & Makedon, F. (2020). A survey on contrastive self-supervised learning. *Technologies*, 9(1), 2.
- Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255-260.
- Khan, S., Naseer, M., Hayat, M., Zamir, S. W., Khan, F. S., & Shah, M. (2022). Transformers in vision: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 54(10s), 1-41.
- Li, T., Sahu, A. K., Talwalkar, A., & Smith, V. (2020). Federated learning: Challenges, methods, and future directions. *IEEE signal processing magazine*, 37(3), 50-60.

- Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., ... & Sánchez, C. I. (2017). A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical image analysis*, 42, 60-88.
- Lundberg, S. M., & Lee, S. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (Vol. 30, pp. 4765–4774).
- Lundberg, S. M., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J. M., Nair, B., ... & Lee, S. I. (2020). From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature machine intelligence*, 2(1), 56-67.
- Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., ... & Sutskever, I. (2021, July). Learning transferable visual models from natural language supervision. In *International conference on machine learning* (pp. 8748-8763).
- Raffel, C., Shazeer, N., Roberts, A., Lee, K., Narang, S., Matena, M., ... & Liu, P. J. (2020). Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. *Journal of machine learning research*, 21(140), 1-67.
- Ramesh, A., Dhariwal, P., Nichol, A., Chu, C., & Chen, M. (2022). Hierarchical text-conditional image generation with clip latents. *arXiv preprint arXiv:2204.06125*, 1(2), 3.
- Samek, W., Montavon, G., Lapuschkin, S., Anders, C. J., & Müller, K. R. (2021). Explaining deep neural networks and beyond: A review of methods and applications. *Proceedings of the IEEE*, 109(3), 247-278.
- Sarker, I. H. (2021). Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. *SN computer science*, 2(3), 160.
- Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., et al. (2017). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)* (pp. 618–626).
- Tjoa, E., & Guan, C. (2020). A survey on explainable artificial intelligence (xai): Toward medical xai. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 32(11), 4793-4813.
- Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature medicine*, 25(1), 44-56.

- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Xu, P., Zhu, X., & Clifton, D. A. (2023). Multimodal learning with transformers: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(10), 12113-12132.

BÖLÜM 5

İNSAN BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ

Öğr. Gör. Ahmet AYDIN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17980224>

¹ Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, Veri Tabanı, Ağ Tasarımı ve Yönetimi Bölümü, Adana, Türkiye. aaydin@atu.edu.com, orcid id: 0000-0003-4916-2505

1. GİRİŞ

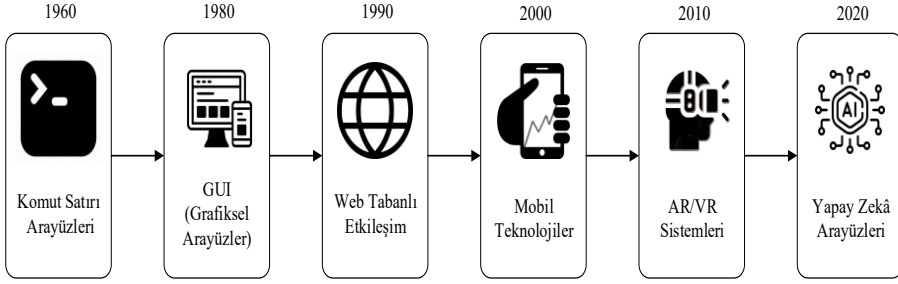
İnsan-Bilgisayar Etkileşimi (Human-Computer Interaction, HCI), kullanıcıların bilgisayar sistemleri ve dijital teknolojilerle nasıl etkileşime girdiğini inceleyen disiplinlerarası bir alandır (Carroll, 2009). HCI'nin temel amacı, bilgisayar sistemlerini kullanıcıların ihtiyaçlarına uygun, verimli, güvenilir ve erişilebilir hale getirmektir. Günümüzde yalnızca masaüstü bilgisayarlarla sınırlı kalmayan bu etkileşim; mobil cihazlar, giyilebilir teknolojiler, artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR) ve yapay zekâ tabanlı arayüzlere kadar geniş bir yelpazeye yayılmıştır.

1.1. HCI'nin Tarihsel Gelişimi

HCI'nin kökenleri, bilgisayarların yalnızca uzman kişilerce kullanılabildiği 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Bu dönemde etkileşim, çoğunlukla metin tabanlı komut satırları üzerinden gerçekleşmekteydi. Kullanıcıların sistemi etkin şekilde kullanabilmesi için programlama bilgisine sahip olması gerekiyordu. 1970'lerin sonunda ve 1980'lerin başında grafiksel kullanıcı arayüzlerinin (Graphical User Interface, GUI) ortaya çıkışı, HCI alanında devrim niteliğinde bir gelişmedi (Nielsen & Tahir, 2006). Apple Lisa, Macintosh ve Microsoft Windows gibi sistemler, kullanıcıların görsel ikonlar, menüler ve fare aracılığıyla bilgisayarlarla iletişim kurmasını sağladı.

1990'lı yıllar, internetin hızla yaygınlaşması ile HCI'nin yeni bir boyut kazandığı dönemdir. Web sitelerinin tasarımı, kullanılabilirlik çalışmaları ve hiper metin tabanlı etkileşim, bu dönemin öne çıkan konuları olmuştur. 2000'lerle birlikte mobil cihazların yükselişi, taşınabilirlik ve dokunmatik arayüzlerin öne çıkmasını sağlamıştır. Son on yılda ise HCI araştırmaları, artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR) ve yapay zekâ destekli sistemler etrafında yoğunlaşmıştır.

Şekil 1'de, HCI'nin tarihsel gelişimini özetleyen bir zaman çizelgesi sunulmaktadır.



Şekil 1. İnsan-Bilgisayar Etkileşiminin tarihsel gelişimi (1960–2025)

Şekil 1’de görüldüğü üzere, HCI alanı her on yılda farklı bir dönüşüm yaşamıştır. 1960’larda uzman odaklı kullanım hâkimken, 1980’lerle birlikte kişisel bilgisayarların yaygınlaşması, kullanıcı dostu arayüzlerin önemini artırmıştır. 1990’lar internetin yükselişiyle bilgiye erişimi kolaylaştırmış, 2000’ler mobil cihazlarla birlikte taşınabilirliği ön plana çıkarmıştır. Günümüzde ise yapay zekâ ve uzamsal etkileşim teknolojileri, kullanıcı deneyimini radikal biçimde yeniden tanımlamaktadır (Shneiderman & Plaisant, 2010).

1.2. HCI’nin Disiplinlerarası Yapısı

HCI yalnızca bilgisayar mühendisliğinin bir alt alanı değildir; aynı zamanda bilişsel psikoloji, ergonomi, endüstriyel tasarım, sosyoloji ve iletişim bilimleriyle yakından ilişkilidir (Carroll, 2003). İnsan zihninin bilgiyi nasıl işlediğini anlamak, kullanılabilir sistemler tasarlamamanın temel koşuludur. Bu nedenle HCI araştırmalarında kullanıcıların dikkat, algı, hafıza ve problem çözme süreçleri dikkate alınır. Ayrıca sosyoteknik bağlam, kullanıcıların farklı kültürel ve toplumsal koşullar altında teknolojiyi nasıl deneyimlediklerini anlamada önemli bir rol oynar.

1.3. HCI’nin Önemi

HCI’nin önemi, farklı boyutlarda değerlendirilebilir. Öncelikle, iyi tasarlanmış arayüzler kullanıcıların görevlerini daha hızlı ve hatasız biçimde yerine getirmesini sağlayarak verimliliği artırır (Nielsen, 1993). Bunun yanı sıra, HCI alanı erişilebilirlik açısından da kritik bir rol oynar; farklı fiziksel veya bilişsel yeteneklere sahip bireylerin teknolojiye eşit koşullarda erişebilmesi için kapsayıcı tasarım yaklaşımlarının uygulanması zorunludur. Kullanıcıların teknolojiyle etkileşimlerinden elde ettikleri deneyim, sistemin başarısının

belirleyici göstergelerinden biridir. Bu bağlamda kullanıcı memnuniyeti, HCI'nin en önemli hedeflerinden biri olarak öne çıkar (Hassenzahl, 2010). Ayrıca, dijitalleşen dünyada güvenlik ve etik boyutlar da giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Kullanıcı verilerinin gizliliğinin korunması, şeffaflık ve güvenilirlik ilkeleri, etkili bir HCI tasarımının ayrılmaz parçalarıdır.

Bu açılardan bakıldığında, kötü tasarlanmış bir sistem yalnızca kullanıcı deneyimini olumsuz etkilemekle kalmaz; aynı zamanda ekonomik kayıplara, güvenlik açıklarına ve toplumsal sorunlara da yol açabilir. Özellikle karmaşık arayüzlere sahip sağlık bilişim sistemlerinde yaşanan kullanıcı hataları, ciddi ve geri dönüşü olmayan sonuçlara neden olabilmektedir. Dolayısıyla, HCI araştırmaları ve uygulamaları hem bireysel hem de toplumsal düzeyde kritik bir öneme sahiptir.

Sonuç olarak, bu bölümde HCI'nin temel ilkeleri ve modelleri ele alınacak; kullanıcı merkezli tasarım ve kullanılabilirlik süreçleri tartışılacak; güncel eğilimler değerlendirilecek ve disiplinin geleceğine ilişkin öngörüler sunulacaktır.

2. HCI'NİN TEMEL İLKELERİ VE MODELLERİ

İnsan-Bilgisayar Etkileşimi alanında geliştirilen ilkeler ve modeller, kullanıcı deneyiminin anlaşılması ve sistem tasarımında yönlendirici bir çerçeve oluşturur. Bu ilkeler, yalnızca görsel tasarım estetiğine değil, aynı zamanda kullanıcıların bilişsel süreçlerine, hata yapma olasılıklarına ve öğrenme kapasitelerine de odaklanır. Tarihsel olarak Donald Norman, Ben Shneiderman ve Jakob Nielsen gibi araştırmacılar, HCI'nin kuramsal temelini oluşturan ve günümüzde de geçerliliğini koruyan modeller geliştirmişlerdir.

2.1. Norman'ın Etkileşim İlkeleri

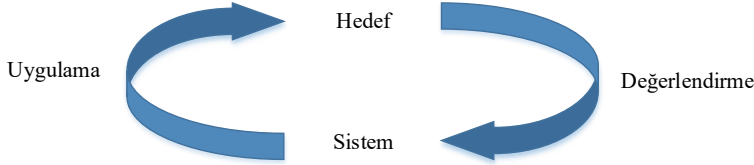
Donald Norman'ın geliştirdiği ilkeler, kullanıcıların bir sistemle etkileşim sürecinde yaşadığı bilişsel aşamaları açıklamaktadır (Norman, 2013). Norman, özellikle görünürlük, geri bildirim, kavramsal modeller, doğru haritalama ve kısıtlamalar üzerinde durur.

- **Görünürlük:** Kullanıcı bir sistemin hangi işlevleri sunduğunu kolaylıkla görebilmelidir. Görünür olmayan işlevler kullanıcıların hata yapma riskini artırır (Norman, 2010).
- **Geri Bildirim:** Kullanıcı bir eylemi gerçekleştirdiğinde, sistemin bu eyleme karşılık verdiğini hemen anlayabilmelidir. Örneğin, bir

düğmeye basıldığında renk değişimi veya sesli uyarı verilmesi geri bildirimdir.

- Kavramsal Modeller: Kullanıcıların zihinlerinde oluşturdukları sistem tasavvuru ile gerçek sistem davranışı uyumlu olmalıdır. Tutarsızlık, öğrenme zorluklarına yol açar.
- Doğru Haritalama: Kontroller ile sonuçları arasındaki ilişki doğal olmalıdır. Örneğin, bir ocağın düğmeleri ile ocak gözlerinin konumlarının uyumlu olması doğru haritalamaya örnektir.
- Kısıtlamalar: Kullanıcının yanlış işlemler yapmasını engelleyecek sınırlandırmaların tasarıma dahil edilmesi hata oranını azaltır.

Şekil 2’de *Norman’ın etkileşim döngüsü şematik olarak gösterilmektedir.*



Şekil 2. Norman’ın Etkileşim Döngüsü

Şekil 2’de görüldüğü üzere, kullanıcı niyetini belirler, eylemi gerçekleştirir, sistem yanıt verir ve kullanıcı bu yanıtı yorumlar. Döngüdeki herhangi bir kopukluk, kullanıcı memnuniyetsizliğine ve hata oranlarının artmasına yol açabilir.

2.2. Shneiderman’ın Sekiz Altın Kuralı

Ben Shneiderman, kullanıcı arayüzü tasarımı için sekiz altın kural geliştirmiştir. Bu kurallar tasarımcılara pratik bir rehber sunar (Shneiderman & Plaisant, 2010):

- Tutarlılık: Benzer işlemler her yerde aynı şekilde sunulmalıdır.
- Sık kullanılan işlemler için kısayol sağlama: Deneyimli kullanıcılar için hızlandırıcı seçenekler bulunmalıdır.
- Bilgilendirici geri bildirim: Her eyleme karşılık uygun bir sistem yanıtı verilmelidir.
- Tamamlanmış işlemlerde kapanış: Kullanıcı işlemin başarıyla tamamlandığını anlamalıdır.

- Hataların önlenmesi ve basit hata mesajları: Kullanıcıya yol gösterici, anlaşılır uyarılar verilmelidir.
- Eylem kolaylığı: Kullanıcı sistemle kolayca etkileşim kurabilmelidir.
- Estetik ve minimalist tasarım: Gereksiz öğeler kullanıcıyı yormamalıdır.
- Yardım ve belgeler: Kullanıcı gerektiğinde kolay erişilebilir yardım kaynaklarına ulaşabilmelidir.

Shneiderman'ın yaklaşımı, Norman'ın ilkelerine kıyasla daha uygulamaya dönük olup, yazılım ve arayüz geliştiren tasarımcılar için bir kontrol listesi niteliği taşır.

2.3. Norman ve Shneiderman İlkelerinin Karşılaştırılması

Bu iki çerçeve, farklı odaklara sahip olsa da kullanıcı dostu sistemler geliştirme konusunda birbirini tamamlamaktadır. Tablo 1'de Norman ve Shneiderman'ın ilkeleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 1. Norman ve Shneiderman İlkelerinin Karşılaştırması

Norman'ın İlkeleri	Shneiderman'ın Sekiz Kuralı	Ortak Noktalar
Görünürlük	Tutarlılık	Kullanıcıya net ipuçları sunma
Geri Bildirim	Bilgilendirici geri bildirim	Kullanıcı eylemlerine sistem yanıtı
Kavramsal Modeller	Kullanıcıya basit ve açık tasarım sunma	Zihinsel model uyumu
Doğru Haritalama	Sık kullanılan işlemlerin kolay erişilebilir olması	İşlem kolaylığı
Kısıtlamalar	Hataların önlenmesi	Hataları azaltma
—	Esneklik ve verimlilik	—
—	Estetik ve minimalist tasarım	—
—	Yardım ve belgeler	—

Tablo 1'de görüldüğü gibi Norman'ın yaklaşımı daha bilişsel ve soyut bir çerçeve sunarken, Shneiderman'ın kuralları daha çok pratik tasarım uygulamalarına odaklanmaktadır.

2.4. Nielsen'in Kullanılabilirlik Heuristikleri

Jakob Nielsen, 1990'lı yıllarda “10 kullanılabilirlik heuristiği” ile kullanıcı deneyimi tasarımında en yaygın kullanılan ilkelere birini geliştirmiştir (Nielsen, 1994). Bu ilkeler arasında sistem durumunun görünür olması, gerçek dünya ile uyum, kullanıcı kontrolü ve özgürlüğü, hata önleme, tutarlılık, esneklik, minimalist tasarım, hata kurtarma ve yardım/dökümantasyon gibi boyutlar yer almaktadır. Günümüzde birçok kullanılabilirlik testi ve UX değerlendirmesi, Nielsen'in bu heuristikleri temel almaktadır.

2.5. Bilişsel Modeller

HCI araştırmalarında bilişsel modeller, kullanıcıların bilgisayar sistemleriyle etkileşim sürecini anlamada kritik bir role sahiptir. Bu modeller, insanların bilgi işleme biçimlerini, karar alma süreçlerini ve görevleri yerine getirme stratejilerini açıklamaya çalışır. Bilişsel modeller, özellikle karmaşık görevlerin analizinde, kullanıcı performansının tahmin edilmesinde ve tasarım kararlarının bilimsel temele oturtulmasında kullanılmaktadır (Card vd., 2008).

- GOMS Modeli (Goals, Operators, Methods, Selection rules): GOMS modeli, kullanıcıların hedeflerini (goals), bu hedeflere ulaşmak için kullandıkları işlemleri (operators), farklı görevleri tamamlamak için tercih ettikleri yöntemleri (methods) ve bu yöntemler arasında seçim yaparken izledikleri kuralları (selection rules) tanımlar. Örneğin, bir metin düzenleme uygulamasında “belgeyi kaydetme” hedefi, menüden “Kaydet” seçeneğine tıklama veya klavye kısayolu kullanma gibi farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu model, özellikle kullanıcı davranışlarının öngörülmesi ve uzman kullanıcıların hız analizlerinde yararlı olmaktadır (John & Kieras, 1996).
- KLM (Keystroke-Level Model): KLM, GOMS modelinin daha ayrıntılı bir uzantısıdır. Kullanıcıların görevleri yerine getirirken gerçekleştirdikleri en küçük fiziksel eylemleri (örneğin klavye tuşlarına basma, fare tıklaması, ekran üzerinde göz gezdirmeye) analiz eder. Böylece bir görevin yaklaşık süresi önceden tahmin edilebilir. Özellikle yazılım mühendisliği ve arayüz optimizasyon çalışmalarında KLM yaygın olarak kullanılmaktadır (Card vd., 1980).

- **Zihinsel Modeller:** Kullanıcıların sistem hakkında kafalarında oluşturdukları soyut temsillerdir. Bir kullanıcı, e-posta gönderme sürecini “bir mektup yazıp postaya verme” benzetmesiyle düşünebilir. Eğer tasarımcıların sunduğu sistem bu zihinsel modelle uyuşmazsa, kullanıcı deneyiminde zorluklar ve hata oranlarında artış görülür. Tasarım sürecinde kullanıcıların zihinsel modellerini dikkate almak, öğrenilebilirliği artıran en önemli faktörlerden biridir (Schumacher & Czerwinski, 1992).
- **ACT-R (Adaptive Control of Thought–Rational):** ACT-R modeli, insan bilişsel süreçlerini simüle eden en kapsamlı çerçevelerden biridir. İnsan beyninin farklı modüllerini (ör. kısa süreli bellek, uzun süreli bellek, motor hareketler) modelleyerek karar verme, problem çözme ve öğrenme süreçlerini açıklamaya çalışır. ACT-R, özellikle eğitim teknolojileri ve uzman sistemlerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır (Anderson, 2009).

Bilişsel modellerin en önemli katkısı, kullanıcıların yalnızca “ne yaptıklarını” değil, aynı zamanda “neden bu şekilde yaptıklarını” anlamamıza imkân vermeleridir. Böylece sistem tasarımları, kullanıcıların doğal düşünme biçimleriyle uyumlu hale getirilebilir.

2.6. İnsan Faktörleri ve Bilişsel Yük

HCI, yalnızca sistem tasarımıyla değil, aynı zamanda insanın bilişsel ve fiziksel sınırlılıklarıyla da ilgilidir. Bu nedenle insan faktörlerinin dikkate alınması, kullanılabilirlik ve güvenilirlik açısından kritik öneme sahiptir.

Bilişsel Yük Teorisi (Cognitive Load Theory), kullanıcıların bilgi işleme kapasitelerinin sınırlı olduğunu vurgular. Karmaşık, gereksiz veya çelişkili bilgilerin sunulması, kullanıcıların zihinsel yükünü artırarak hata oranlarını yükseltir. Tasarımcıların amacı, kullanıcıya sadece gerekli bilgiyi, anlaşılır ve düzenli bir biçimde sunmak olmalıdır. Bu yaklaşım, özellikle eğitim yazılımlarında ve karar destek sistemlerinde büyük önem taşır (Sweller, 1988).

- **Dikkat ve Algı:** İnsanların görsel ve işitsel dikkat kapasiteleri sınırlıdır. Bu nedenle arayüzlerde kullanılan renkler, simgeler ve sesli uyarılar dikkat çekici ama aşırı yükleyici olmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Görsel algıyı kolaylaştıran kontrast kullanımı, yazı

tipi boyutu ve düzenli yerleşim, kullanıcıların bilgiye erişimini hızlandırır (Wickens, 2008).

- Bellek Faktörleri: Kısa süreli belleğin kapasitesi sınırlı olduğundan, kullanıcıların çok fazla bilgi ezberlemesine ihtiyaç duymadan sistemle etkileşim kurabilmesi gerekir. Örneğin, telefon numarasının otomatik biçimlendirilmesi veya sık kullanılan ayarların kaydedilmesi bu gerekliliğe örnektir (Miller, 1956).
- Fiziksel Ergonomi: İnsan faktörlerinin yalnızca bilişsel değil, fiziksel boyutu da vardır. Ekran boyutları, tuş yerleşimleri, dokunmatik alanların büyüklüğü gibi unsurlar ergonomi açısından kritik rol oynar. Örneğin, küçük dokunmatik butonların sık kullanıldığı bir mobil uygulama, kullanıcıların hata yapma oranını artırabilir (Helander, 1994).
- Yüksek Riskli Sistemler: İnsan faktörlerinin ihmal edilmesi, özellikle havacılık, sağlık ve savunma gibi yüksek riskli alanlarda ciddi sonuçlara yol açabilir. Örneğin, karmaşık ve anlaşılması güç bir tıbbi cihaz arayüzü, doktorların hata yapmasına neden olabilir. Bu nedenle bu alanlarda HCI tasarımları yalnızca kullanılabilirlik değil, aynı zamanda güvenlik açısından da hayati önem taşır.

Sonuç olarak, HCI'nin insan faktörlerini ve bilişsel yükü dikkate almayan hiçbir yaklaşımı uzun vadede başarılı olamaz. Kullanıcıların fiziksel ve zihinsel sınırlılıklarıyla uyumlu sistemler, hem daha güvenilir hem de daha memnuniyet verici deneyimler sunar.

3. KULLANICI MERKEZLİ TASARIM VE KULLANILABİLİRLİK

HCI alanında en önemli yaklaşımlardan biri, sistemlerin tasarım sürecinde kullanıcıların merkeze alınmasıdır. Kullanıcı Merkezli Tasarım (User-Centered Design, UCD) yaklaşımı, kullanıcıların gereksinimlerinin, beklentilerinin ve sınırlılıklarının sistematik biçimde analiz edilmesini esas alır. Bu yaklaşımda amaç, yalnızca işlevsel olarak doğru çalışan değil, aynı zamanda öğrenilebilir, erişilebilir ve kullanıcı dostu sistemler geliştirmektir.

3.1. Kullanıcı Merkezli Tasarım Süreci

Kullanıcı merkezli tasarım, döngüsel ve yinelemeli bir süreçtir (Gulliksen vd., 2003). Genel olarak şu aşamalardan oluşur:

- Gereksinim Analizi: Kullanıcıların ihtiyaçları, görevleri ve bağlamı anlaşılır. Bu aşamada gözlem, görüşme, günlük incelemesi ve anket gibi yöntemler kullanılır. Gereksinim analizi, yalnızca kullanıcıların ne istediğini değil, aynı zamanda gerçekten neye ihtiyaç duyduklarını ortaya çıkarmayı amaçlar.
- Tasarım ve Prototipleme: Toplanan veriler ışığında ilk taslaklar ve prototipler geliştirilir. Prototipler düşük sadakatli (örneğin kâğıt çizimleri, basit maketler) veya yüksek sadakatli (etkileşimli yazılım prototipleri) olabilir. Bu aşamada tasarımcılar, kullanıcıların geri bildirimlerine göre sürekli revizyon yapar.
- Değerlendirme: Prototipler, kullanıcılarla test edilerek kullanılabilirlik ve işlevsellik açısından değerlendirilir. Bu aşama, kullanıcıların gerçek davranışlarını gözlemlemek ve tasarım kararlarını doğrulamak için kritik önemdedir.
- Yineleme (Iteration): Değerlendirme sonuçlarına göre tasarım sürekli iyileştirilir. Başarılı UCD süreçleri, ürün ortaya çıkana kadar birkaç kez yineleme yapmayı gerektirir.

3.2. Kullanılabilirlik Kavramı ve Ölçütleri

Kullanılabilirlik, ISO 9241'e göre "belirli kullanıcıların, belirli amaçlar doğrultusunda, belirli bir bağlamda bir sistemi etkili, verimli ve tatmin edici biçimde kullanabilmesi" olarak tanımlanır. Kullanılabilirliği ölçmek için çeşitli kriterler geliştirilmiştir. Tablo 2'de bu ölçütler özetlenmektedir (Standardization, 2018).

Tablo 2. Kullanılabilirlik Ölçütleri

Ölçüt	Açıklama	Örnek Uygulama
Etkinlik	Kullanıcının görevini doğru şekilde tamamlayabilme düzeyi	Bir formu eksiksiz doldurabilmek
Verimlilik	Görevin minimum kaynak (zaman, çaba) ile tamamlanabilmesi	Arama motorunda en kısa sürede sonuç bulma
Memnuniyet	Kullanıcının deneyimden tatmin olma derecesi	Kullanıcı anketlerinde yüksek memnuniyet
Öğrenilebilirlik	Sistemin yeni kullanıcılar tarafından kolayca öğrenilebilmesi	İlk kullanımda menüleri kolay keşfetme
Hata Oranı	Kullanıcıların sistemle etkileşim sırasında yaptığı hata sayısı	Yanlış parola girişlerinin sayısı

Tablo 2, kullanılabilirliğin yalnızca işlevsellik değil, aynı zamanda kullanıcı deneyiminin öznel boyutlarını da kapsadığını göstermektedir. Örneğin, bir sistem teknik açıdan sorunsuz çalışsa bile kullanıcıların öğrenmesi güçse veya memnuniyet sağlamıyorsa kullanılabilirlik açısından başarısız sayılabilir.

3.3. Kullanılabilirlik Testleri ve Yöntemleri

Kullanılabilirliğin ölçülmesi, sistemin güçlü ve zayıf yönlerinin belirlenmesi açısından büyük önem taşır (Rubin, 2008). Yaygın yöntemlerden bazıları şunlardır:

- **Laboratuvar Testleri:** Kullanıcılar belirli görevleri yerine getirirken gözlemlenir; görev tamamlama süresi, hata oranı gibi metrikler kaydedilir (Dumas & Redish, 1999).
- **Alan Çalışmaları:** Kullanıcıların sistemle doğal ortamlarında etkileşimleri incelenir. Bu yöntem bağlamsal faktörleri yakalamak için uygundur.
- **Sesli-Düşünme (Think-Aloud) Yöntemi:** Kullanıcılar görevleri yerine getirirken düşüncelerini sesli ifade eder. Böylece zihinsel modelleri hakkında bilgi edinilir.
- **Heuristik Değerlendirme:** Uzmanlar, Nielsen'in heuristikleri gibi bilinen çerçevelere göre arayüzü değerlendirir.
- **A/B Testleri:** Kullanıcılara farklı tasarım versiyonları sunularak hangisinin daha iyi performans gösterdiği ölçülür.

Bu yöntemlerin bir arada kullanılması, hem nicel hem de nitel veriler sağlayarak daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanır.

3.4. Vaka Örnekleri

Kullanıcı merkezli tasarımın önemini göstermek için farklı alanlardan örnekler incelenebilir:

- **Sağlık Bilişimi:** Elektronik hasta kayıt sistemlerinde yapılan araştırmalar, kullanıcıların sürece dahil edilmediği tasarımlarda hata oranlarının yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşın UCD yaklaşımıyla geliştirilen sistemlerde veri giriş süreleri kısalmış ve kullanıcı memnuniyeti artmıştır (Zhang & Walji, 2011).
- **Mobil Bankacılık:** Kullanıcıların sık kullandıkları işlemlere (ör. bakiye sorgulama, para transferi) hızlı erişim sağlayan tasarımlar, daha yüksek kullanıcı memnuniyeti sağlamaktadır. Kullanılabilirlik testleri, karmaşık menü yapılarının kullanıcıları caydırdığını göstermektedir (Alalwan vd., 2017).
- **E-ticaret:** Alışveriş sepeti ve ödeme süreçlerinin sadeleştirildiği, adım sayısının azaltıldığı e-ticaret platformları, hem satış oranlarında artış hem de kullanıcı güveninde yükselme sağlamaktadır (Cyr vd., 2009).
- **Eğitim Yazılımları:** Öğrencilerin farklı seviyelerdeki bilgi yükünü kaldırabilecek şekilde tasarlanmış öğrenme platformları, öğrenme performansını artırmaktadır. Özellikle düşük bilişsel yükte tasarlanmış arayüzlerin öğrenilebilirlik açısından daha başarılı olduğu gösterilmiştir (R. E. Mayer, 2005).
- **Kamu Hizmetleri:** Çevrim içi vergi ödeme veya pasaport başvurusu gibi devlet hizmetlerinde kullanıcı merkezli tasarım, vatandaşların işlemleri daha kolay tamamlamasına imkân tanır. Kötü tasarlanmış bir kamu hizmeti portalı ise kullanıcıların işlemleri yarım bırakmasına veya yanlış bilgi girmesine yol açabilir.

Bu örnekler, kullanıcı merkezli tasarımın yalnızca kullanıcı deneyimini iyileştirmekle kalmadığını, aynı zamanda ekonomik fayda, güvenlik ve toplumsal etki boyutlarında da kritik önem taşıdığını göstermektedir.

4. GÜNCEL EĞİLİMLER VE UYGULAMA ALANLARI

HCI alanı, teknolojik yeniliklerle birlikte sürekli olarak dönüşmektedir. Geçmişte masaüstü bilgisayar arayüzleri araştırmaların odak noktası iken, günümüzde mobil cihazlar, giyilebilir teknolojiler, artırılmış ve sanal gerçeklik sistemleri ile yapay zekâ tabanlı arayüzler öne çıkmaktadır. Bu eğilimler, kullanıcıların dijital teknolojilerle etkileşim biçimlerini yeniden tanımlamaktadır.

4.1. Mobil ve Çoklu Platform Etkileşimleri

Akıllı telefonların yaygınlaşmasıyla birlikte mobil arayüzler, HCI araştırmalarının en yoğun alanlarından biri haline gelmiştir. Mobil uygulamalarda ekran boyutlarının sınırlı olması, dokunmatik etkileşimlerin hata riskini artırması ve değişken bağlamlarda kullanım (ör. hareket halindeyken) tasarım açısından önemli zorluklar yaratmaktadır. Ayrıca kullanıcıların bir görevi farklı cihazlarda (telefon, tablet, masaüstü) sürdürme beklentisi, çoklu platform deneyimi kavramını gündeme getirmiştir.

4.2. Yapay Zekâ ile Etkileşim ve Güven

Son yıllarda yapay zekâ destekli sistemlerin yaygınlaşması, HCI alanında yeni soruları beraberinde getirmiştir. Öneri motorları, sohbet robotları, otonom araçlar ve üretken yapay zekâ uygulamaları, kullanıcıların yalnızca yazılım arayüzleriyle değil, aynı zamanda “öğrenen ve karar veren” sistemlerle etkileşime girmesini gerektirmektedir (Amershi vd., 2019).

Bu noktada en kritik meselelerden biri güven kavramıdır. Kullanıcıların bir yapay zekâ sistemine güvенеbilmesi için sistemin şeffaf, öngörülebilir ve güvenilir olması gerekir. Aksi halde kullanıcılar, sistemin sunduğu önerilere kuşkuyla yaklaşmakta veya tamamen reddedebilmektedir. Bu durum özellikle sağlık, finans ve hukuk gibi kritik alanlarda hayati öneme sahiptir.

4.3. Erişilebilirlik ve Kapsayıcı Tasarım

Erişilebilirlik, HCI'nin temel ilkelerinden biri olarak günümüzde daha fazla önem kazanmaktadır. Görme, işitme veya motor beceri sınırlılıkları olan bireylerin dijital sistemlere erişiminin sağlanması, yalnızca etik bir sorumluluk değil aynı zamanda yasal bir zorunluluktur (Lazar vd., 2015). Kapsayıcı tasarım, farklı kullanıcı profillerinin ihtiyaçlarını gözetken çözümler geliştirmeyi amaçlar.

Örneğin, ekran okuyucular için uyumlu web siteleri, yüksek kontrastlı renk paletleri, işaret dili destekli video içerikleri veya alternatif giriş cihazları (ör. göz takip sistemleri) erişilebilirlik uygulamalarına örnek teşkil etmektedir. Bu tür tasarımlar yalnızca engelli kullanıcılar için değil, geçici kısıtlılıklar yaşayan (ör. yaralanma nedeniyle tek el kullanımı) veya farklı bağlamlarda (ör. gürültülü ortamda ses yerine metin kullanımı) bulunan tüm kullanıcılar için faydalıdır.

4.4. Etik, Gizlilik ve Veri Odaklı Tasarım

Veri odaklı teknolojilerin yaygınlaşması, HCI alanında etik ve gizlilik tartışmalarını ön plana çıkarmıştır. Kullanıcıların kişisel verilerinin toplanması, işlenmesi ve saklanması süreçlerinde şeffaflık ve güven ilkeleri temel önemdedir.

Etik tasarım, yalnızca kullanıcı verilerinin korunmasıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda algoritmik önyargıların engellenmesi, manipülatif arayüzlerden (ör. “karanlık desenler”) kaçınılması ve kullanıcıların bilinçli tercihler yapabilmesini sağlayacak şeffaf mekanizmaların sunulmasını da içerir (Friedman vd., 2008).

Günümüzde kullanıcı deneyimi tasarımcıları, yalnızca estetik ve işlevselliği değil, aynı zamanda sistemin toplumsal etkilerini de dikkate almak durumundadır. Bu bağlamda “etik HCI”, önümüzdeki yıllarda araştırmaların odak noktalarından biri olmaya devam edecektir.

5. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFİ

İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, bilgisayar sistemlerinin yalnızca teknik işlevlerini değil, aynı zamanda kullanıcıların bilişsel, sosyal ve duygusal deneyimlerini merkeze alan bir disiplin olarak gelişmiştir. Tarihsel olarak komut satırından grafiksel arayüzlere, web’den mobil cihazlara ve günümüzde yapay zekâ destekli sistemlere kadar uzanan yolculuk, HCI’nin sürekli evrim geçiren bir alan olduğunu göstermektedir.

HCI’nin disiplinlerarası niteliği, onu mühendislikten psikolojiye, tasarımdan sosyolojiye kadar farklı araştırma alanlarıyla ilişkilendirmektedir. Bu çeşitlilik, HCI’nin yalnızca teknolojik çözümler geliştirmekle kalmayıp, aynı zamanda toplumsal sorunlara da yanıt aramasını sağlamaktadır. Kullanılabilirlik, erişilebilirlik, etik ve güvenlik gibi boyutlar, teknolojinin bireyler ve toplum üzerindeki etkilerini doğrudan belirlemektedir.

- Gelecekte HCI araştırmalarının odaklanacağı alanlar arasında birkaç başlık öne çıkmaktadır:
- Yapay Zekâ Destekli Etkileşim: Üretken yapay zekâ, otonom sistemler ve kişiselleştirilmiş arayüzler, kullanıcı deneyiminde yeni standartlar belirleyecektir.
- AR/VR ve Uzamsal Etkileşim: Fiziksel ve sanal dünyayı bütünleştiren çözümler, özellikle eğitim, sağlık ve endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşacaktır.
- Beyin-Bilgisayar Arayüzleri: İnsan düşüncelerinin doğrudan bilgisayar sistemlerine aktarılabilmesi, HCI'nin en radikal dönüşümlerinden birini temsil edecektir (Lebedev & Nicolelis, 2006).
- Etik ve Veri Gizliliği: Algoritmik önyargıların engellenmesi, şeffaf yapay zekâ sistemleri ve kullanıcı haklarının korunması, HCI'nin önümüzdeki on yılındaki temel tartışma alanlarından biri olacaktır.

Sonuç olarak, HCI'nin geleceği, teknolojik yeniliklerin yanı sıra insan odaklı tasarım ilkelerinin ne ölçüde benimseneceği ile şekillenecektir. Kullanıcıların ihtiyaçlarını gözetir, bilişsel ve fiziksel sınırlılıkları dikkate alan, etik ve kapsayıcı yaklaşımlarla geliştirilen sistemler, yalnızca daha iyi kullanıcı deneyimleri sunmakla kalmayacak; aynı zamanda güvenilir, adil ve sürdürülebilir bir dijital dünyanın inşasına katkıda bulunacaktır.

KAYNAKÇA

- Alalwan, A. A., Dwivedi, Y. K., & Rana, N. P. (2017). Factors influencing adoption of mobile banking by Jordanian bank customers: Extending UTAUT2 with trust. *International Journal of Information Management*, 37(3), 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.01.002>
- Amershi, S., Weld, D., Vorvoreanu, M., Fourney, A., Nushi, B., Collisson, P., Suh, J., Iqbal, S., Bennett, P. N., Inkpen, K., Teevan, J., Kikin-Gil, R., & Horvitz, E. (2019). Guidelines for Human-AI Interaction. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300233>
- Anderson, J. R. (2009). *How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe?* (1st ed). Oxford University Press, Incorporated.
- Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (1980). The keystroke-level model for user performance time with interactive systems. *Communications of the ACM*, 23(7), 396-410. <https://doi.org/10.1145/358886.358895>
- Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (2008). *The psychology of human-computer interaction* (Repr). Erlbaum.
- Carroll, J. M. (2003). *HCI models, theories, and frameworks: Towards a multidisciplinary science*. Morgan Kaufmann Pub.
- Carroll, J. M. (2009). Human computer interaction (HCI). *Encyclopedia of Human-Computer Interaction. Aarhus: The Interaction Design Foundation, 1*, 21-62.
- Cyr, D., Head, M., & Ivanov, A. (2009). Perceived interactivity leading to e-loyalty: Development of a model for cognitive-affective user responses. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(10), 850-869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2009.07.004>
- Dumas, J. S., & Redish, J. (1999). *A practical guide to usability testing* (Rev. ed). Intellect.
- Friedman, B., Kahn, P. H., & Borning, A. (2008). Value Sensitive Design and Information Systems. İçinde K. E. Himma & H. T. Tavani (Ed.), *The Handbook of Information and Computer Ethics* (1. bs, ss. 69-101). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470281819.ch4>
- Gulliksen, J., Göransson, B., Boivie, I., Blomkvist, S., Persson, J., & Cajander, Å. (2003). Key principles for user-centred systems design. *Behaviour &*

- Information Technology*, 22(6), 397-409.
<https://doi.org/10.1080/01449290310001624329>
- Hassenzahl, M. (Ed.). (2010). *Experience design: Technology for all the right reasons*. Morgan & Claypool Publishers.
- Helander, M. (Ed.). (1994). *Handbook of human-computer interaction* (Paperback ed., 4. impr). North-Holland.
- John, B. E., & Kieras, D. E. (1996). The GOMS family of user interface analysis techniques: Comparison and contrast. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 3(4), 320-351.
<https://doi.org/10.1145/235833.236054>
- Lazar, J., Goldstein, D., & Taylor, A. (2015). *Ensuring Digital Accessibility Through Process and Policy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13367-3>
- Lebedev, M. A., & Nicolelis, M. A. L. (2006). Brain-machine interfaces: Past, present and future. *Trends in Neurosciences*, 29(9), 536-546.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.07.004>
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive Theory of Multimedia Learning. İçinde R. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (1. bs, ss. 31-48). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819.004>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97.
- Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Academic Press.
- Nielsen, J. (1994). Usability inspection methods. *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems - CHI '94*, 413-414.
<https://doi.org/10.1145/259963.260531>
- Nielsen, J., & Tahir, M. (2006). *Homepage usability: 50 websites deconstructed* (Nachdr.). New Riders.
- Norman, D. A. (2010). *The psychology of everyday things* (Nachdr.). Basic Books.
- Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things* (Rev. and expanded edition). MIT press.
- Rubin, J. (with Chisnell, D.). (2008). *Handbook of usability testing: How to plan, design, and conduct effective tests* (2nd ed). Wiley Pub.

- Schumacher, R. M., & Czerwinski, M. P. (1992). Mental Models and the Acquisition of Expert Knowledge. İçinde R. R. Hoffman (Ed.), *The Psychology of Expertise* (ss. 61-79). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9733-5_4
- Shneiderman, B., & Plaisant, C. (2010). *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction* (5th ed). Addison-Wesley.
- Standardization, E. C. (2018). for: Ergonomics of human-system interaction–Part 11: Usability: Definitions and Concepts. *European Committee for Standardization*.
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 449-455. <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- Zhang, J., & Walji, M. F. (2011). TURF: Toward a unified framework of EHR usability. *Journal of Biomedical Informatics*, 44(6), 1056-1067. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2011.08.005>

BÖLÜM 6

BLOK ZİNCİR TEKNOLOJİSİ: TEMELLER, UYGULAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Dr. Burak AĞGÜL¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17980395>

¹ İstanbul Topkapı Üniversitesi, Plato Meslek Yüksekokulu, Veri Tabanı, Ağ Tasarımı ve Yönetimi Bölümü, İstanbul, Türkiye. burakaggul@topkapi.edu.tr, orcid id: 0000-0002-9183-1568

1. GİRİŞ

Blokzincir teknolojisi, son yıllarda yalnızca kripto paralarla sınırlı olmayan çok geniş bir dijital dönüşümün temel taşlarından biri hâline gelmiştir. Bu teknoloji, merkezi bir otoriteye gerek duymadan dijital ortamda güvenli, şeffaf ve değiştirilemez veri kaydı yapılmasını mümkün kılar. İlk olarak 2008 yılında Satoshi Nakamoto isimli anonim bir kişi ya da grup tarafından yayımlanan "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System" adlı makale ile gündeme gelen blokzincir yapısı, temelinde bir veri kayıt defteri olarak işlev görür (Nakamoto, 2008).

Geleneksel dijital sistemlerde işlemler genellikle merkezi sunucular aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu durum veri güvenliği, manipülasyon riski ve güven problemi gibi birçok sorunu beraberinde getirir. Blokzincir ise dağıtık defter teknolojisi ile bu sorunlara alternatif bir çözüm sunar. Sistemdeki her katılımcı (node), zincirin bir kopyasını tutar ve yeni işlemler bu katılımcıların çoğunluğu tarafından doğrulanarak ağa eklenir. Böylece güven tek bir merkez yerine tüm ağ üzerinden sağlanır (Tapscott ve Tapscott, 2016).

Blok zincir teknolojisinin yalnızca dijital para transferlerini değil; dijital kimlik, tedarik zinciri, oylama sistemleri ve akıllı sözleşmeler gibi birçok farklı alanda kullanım potansiyeli vardır. Bu durum, teknolojiyi hem teknik hem de toplumsal dönüşüm açısından önemli bir konuma taşımaktadır (Zwitter ve Boisse-Despiaux, 2018).

Bu bölümden itibaren, blok zincir teknolojisinin temel yapı taşları, kriptografik işleyişi, türleri ve gerçek dünyadaki uygulama senaryoları sade ve anlaşılır bir dille açıklanacaktır. Ayrıca her bölümde grafikler ve tablolarla konu desteklenecek, referanslarla bilimsel temeller sağlanacaktır.

1.1. Blok Zincir Teknolojisinin Temelleri

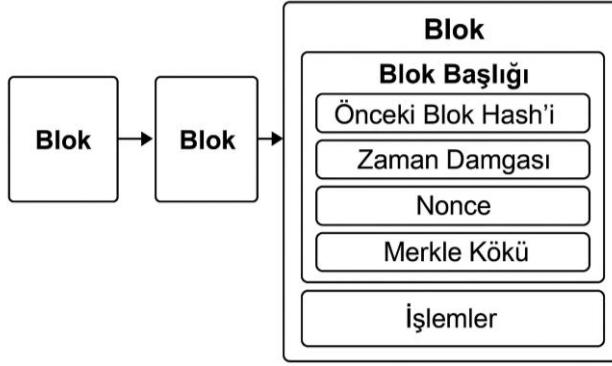
Blok zincir teknolojisinin temelini, birbirine sıralı biçimde bağlı dijital veri blokları oluşturur. Her bir blok, bir dizi işlemi, bu işlemlere ait zaman bilgisini ve bir önceki bloğun özetini (hash) içerir. Bu yapı, bloklar arasında güçlü bir bağ oluşturarak, verilerin izinsiz değiştirilmesini neredeyse imkânsız hâle getirir (Narayanan ve ark., 2016).

Blok zincirde her blok, şu ana bileşenleri içerir:

- **İşlemler:** Sistemdeki dijital işlemleri temsil eder.
- **Zaman Damgası:** Blok oluşturulma zamanını belirtir.

- **Önceki Blok Hash Değeri:** Zincirin bir bütün olarak korunmasını sağlar.
- **Merkle Ağacı Kökü:** Blok içindeki işlemlerin hashlenmiş birleşimidir.
- **Nonce:** Konsensüs algoritmalarında (özellikle PoW) kullanılan rastgele sayılar.

Blok bileşenleri detaylı olarak Şekil 1’de sunulmuştur. Bu yapılar sayesinde, zincire sonradan eklenen bir blok geriye dönük olarak değiştirilemez. Bir bloğun içeriğinde yapılan en küçük değişiklik, hash değerini tamamen değiştirdiği için zincirin geri kalanı da geçersiz hâle gelir.



Şekil 1. Blok zincir yapısında bir blokun bileşenleri.

Blok başlığı içinde önceki bloğa ait hash, zaman damgası, nonce, Merkle kökü ve işlem listesi yer alır. Zincirin bütünlüğü, blokların bu sıralı yapısıyla sağlanır.

Blok zincirin bu yapısı, yalnızca veri depolama açısından değil, aynı zamanda sistem içi güvenlik açısından da önemlidir. Dağıtık defter yapısında tüm düğümler aynı zinciri sakladığı için, kötü niyetli bir kullanıcının tüm ağı manipüle etmesi için ağın çoğunluğunu ele geçirmesi gerekir (bkz. %51 saldırısı) (Bonneau ve ark., 2015).

Veriler, SHA-256 gibi tek yönlü özetleme algoritmaları ile hashlenir. Bu algoritmalar sayesinde blok içeriğinin bütünlüğü her aşamada korunur. Ayrıca işlemler, dijital imzalarla doğrulanır; böylece kimlik ve işlem güvenliği sağlanır (Antonopoulos, 2017).

1.2. Dağıtık Defter Yapısı Ve Mutabakat Algoritmaları

Blok zincir teknolojisinin en ayırt edici özelliği, dağıtık defter yapısıdır. Dağıtık defter teknolojisi (DLT), verilerin tek bir merkezi sunucuda değil; ağdaki birçok farklı noktada kopyalı şekilde tutulduğu bir sistem mimarisidir (Casino, Dasaklis ve Patsakis, 2019). Bu yapı sayesinde, herhangi bir katılımcı (node), tüm işlem geçmişine erişebilir ve yeni işlemleri doğrulama sürecine katkı sağlayabilir.

Bu sistemdeki tüm veriler, ağdaki düğümler arasında eş zamanlı olarak paylaşılır. Böylece sistem üzerinde yapılacak herhangi bir değişiklik, yalnızca ağdaki çoğunluk tarafından onaylandığında geçerli hâle gelir. Bu yapının merkezi sistemlere göre sağladığı avantajlar şunlardır:

- Tekil hata noktası riski ortadan kalkar.
- Sansür veya merkezi manipülasyon ihtimali azalır. Merkezi, dağıtık ve merkeziyetsiz sistemlerin özelliklerini karşılaştıran Şekil 2, blok zincirin sağladığı avantajları açıkça göstermektedir.
- Ağın güvenliği katılımcı sayısı arttıkça güçlenir.



Şekil 2. Dağıtık, merkeziyetsiz ve merkezi sistemlerin karşılaştırması.

1.2.1. Mutabakat algoritmaları

Dağıtık sistemlerde verilerin güvenli ve doğru biçimde güncellenebilmesi için mutabakat algoritmaları kullanılır. Mutabakat, ağdaki düğümlerin belirli bir işlem hakkında ortak karar almasını sağlayan mekanizmadır. Farklı blokzincir sistemlerinde kullanılan bazı yaygın mutabakat yöntemleri şunlardır:

- **Proof of Work (PoW):** İşlem doğrulamak için zorlu matematiksel problemler çözülmesini gerektirir. Bitcoin gibi ilk nesil blokzincirlerde kullanılır (Nakamoto, 2008). Enerji tüketimi yüksektir.
- **Proof of Stake (PoS):** Katılımcılar ellerindeki coin miktarına göre blok oluşturma hakkı kazanır. Daha az enerji tüketir.

- **Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT):** Özel izinli ağlarda tercih edilen, hızlı ve enerji verimli bir yapıdır. Daha çok kurum içi sistemlerde kullanılır (Castro ve Liskov, 2002). Mutabakat algoritmalarının enerji tüketimi, hız ve kullanım alanları açısından karşılaştırılması Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Başlıca konsensüs algoritmalarının karşılaştırması.

Algoritma	Enerji Tüketimi	Hız	Kullanım Alanı
PoW	Yüksek	Düşük	Bitcoin, Litecoin
PoS	Düşük	Orta	Ethereum 2.0
PBFT	Çok Düşük	Yüksek	Hyperledger, özel ağlar

1.2.2. %51 Saldırısı

Dağıtık yapılar teorik olarak güvenli olsa da, bazı saldırı senaryoları söz konusudur. En çok bilinen tehdit, %51 saldırısıdır. Bu saldırıda kötü niyetli bir grup, ağır işlem gücünün %51’inden fazlasını ele geçirerek işlemleri manipüle edebilir (Eyal ve Sirer, 2018). Bu tür saldırılardan korunmak için güçlü mutabakat algoritmaları ve yüksek node katılımı gereklidir.

1.3. Blok Zincir Türleri: Genel, Özel ve Konsorsiyum Yapılar

Blok zincir sistemleri, erişim düzeyine ve katılımcı yapılarına göre üç temel gruba ayrılır. Genel, özel ve konsorsiyum blok zincirlerin erişim ve kontrol yapısı açısından farklarını daha net görmek için Şekil 3 incelenebilir. Bu ayırım, sistemlerin güvenlik modeli, işlem doğrulama yapısı ve şeffaflık derecesi gibi yönlerini doğrudan etkiler (Zheng ve ark., 2018).

1.3.1. Genel blok zincirler

Genel blok zincirler, herkesin katılımına açık olan sistemlerdir. Bitcoin ve Ethereum gibi kripto para platformları bu kategoriye girer. Bu ağlara dileyen herkes node olarak katılabilir, işlem yapabilir ve blok doğrulama sürecine katkıda bulunabilir.

Özellikleri:

- Yüksek şeffaflık
- Tam merkeziyetsizlik
- Yavaş işlem süreleri ve yüksek enerji tüketimi (özellikle PoW sistemlerinde)

Kullanım alanları:

- Kripto para transferleri
- Açık kaynak projeler
- Kamuya açık veri kayıtları

1.3.2. Özel blok zincirler

Özel blok zincir sistemleri, yalnızca belirli bir kuruluş veya kuruluş grubu tarafından yönetilir. Katılım izne bağlıdır ve genellikle iç kurumsal veri akışını yönetmek için kullanılır.

Özellikleri:

- Yüksek işlem hızı
- Düşük enerji tüketimi
- Katılımcılar kontrollüdür, tam merkeziyetsizlik sağlanmaz

Kullanım alanları:

- Kurumsal veri yönetimi
- İç denetim süreçleri
- Sağlık veya finans verisi işleme

1.3.3. Konsorsiyum blok zincirler

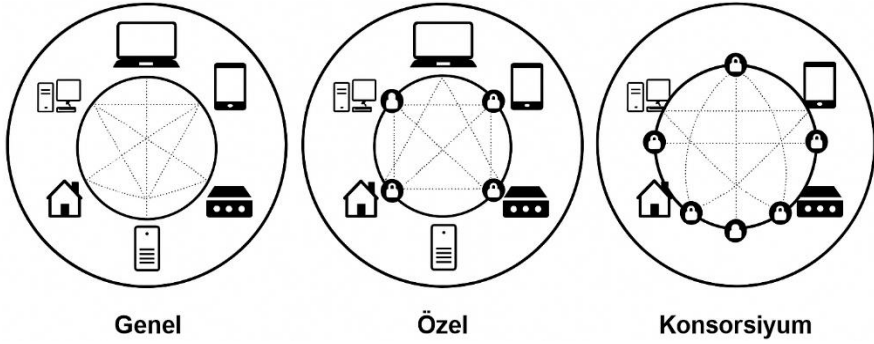
Konsorsiyum blok zincirler, birden fazla kurumun ortaklaşa yönettiği yarı özel yapılardır. Her kurumun ağı kontrol etme yetkisi vardır, böylece tekil kontrol riski azaltılır. Hyperledger Fabric gibi platformlar bu yapıya örnektir.

Özellikleri:

- Dengeli kontrol yapısı
- Kurumsal iş birlikleri için uygunluk
- Yüksek işlem doğrulama güvenliği

Kullanım alanları:

- Tedarik zinciri
- Uluslararası bankalar arası transfer sistemleri
- Lojistik ve gıda güvenliği takibi



Şekil 3. Üç tür blok zincir yapısının erişim ve kontrol yapısı açısından karşılaştırılması.

1.3.4. Karşılaştırmalı özet

Bu blok zincir türlerinin temel özelliklerinin karşılaştırmalı özeti Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Blok zincir türlerinin temel özellik karşılaştırması.

Özellik	Genel	Özel	Konsorsiyum
Katılım	Herkese açık	İzne dayalı	İzne dayalı
Merkeziyetsizlik	Yüksek	Düşük	Orta
İşlem Hızı	Düşük	Yüksek	Orta-Yüksek
Enerji Verimliliği	Düşük	Yüksek	Yüksek
Örnek Platform	Bitcoin	Corda	Hyperledger

1.4. Uygulama Alanları ve Örnek Senaryolar

Blok zincir teknolojisi başlangıçta yalnızca kripto para işlemlerini desteklemek için geliştirilmiş olsa da günümüzde birçok sektör tarafından benimsenmiş ve farklı alanlara uyarlanmıştır. Bu geniş kapsama sahip olmasında, blok zincirin sunduğu güvenlik, şeffaflık, değişmezlik ve aracısız işlem yapabilme avantajları etkili olmuştur (Yaga ve ark., 2018).

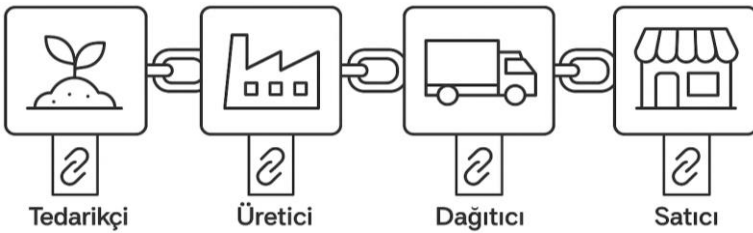
1.4.1. Finans ve bankacılık

Blok zincirin en bilinen kullanım alanı şüphesiz kripto paralardır. Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH) ve benzeri dijital para birimleri, merkeziyetsiz transferlerin mümkün olduğunu göstermiştir. Geleneksel finans sistemlerinde günler süren para transferleri, blok zincir ile dakikalar içinde güvenli biçimde gerçekleştirilebilmektedir (Catalini ve Gans, 2016).

Örnek: Ripple ağı üzerinden uluslararası para transferi yapan bir banka, işlem masraflarını %60 oranında azaltabilmektedir.

1.4.2. Tedarik zinciri yönetimi

Tedarik zincirinde ürünlerin hangi aşamalardan geçtiği, hangi koşullarda üretildiği veya taşıma süresince hangi sıcaklıkta tutulduğu gibi veriler blokzincir üzerinde kayıt altına alınabilir. Böylece hem izlenebilirlik hem de sahtecilik önlenmiş olur (Tian, 2017). Blok zincirin tedarik zinciri yönetimindeki izlenebilirlik sağlayan yapısı, Şekil 4’de somutlaştırılmıştır



Şekil 4. Blokzincir destekli tedarik zinciri örneği.

Her aşama blok olarak sisteme kaydedilir.

1.4.3. Sağlık sektörü

Hastaların tıbbi geçmişlerinin tek bir dijital cüzdanda, güvenli ve erişilebilir şekilde saklanması mümkündür. Hasta verileri yalnızca izin verilen doktorlar tarafından görüntülenebilir. Bu sayede veri ihlalleri ve tekrar test ihtiyacı azalır (Azaria ve ark., 2016).

1.4.4. Oylama ve e-devlet sistemleri

Blok zincir ile gerçekleştirilen dijital oylama sistemleri, seçim güvenliğini artırabilir. Her oy bir işlem olarak bloklara kaydedilir ve sonradan değiştirilemez. Ayrıca sistemin şeffaflığı sayesinde seçmenler oylarının sayıldığından emin olabilir.

1.4.5. Dijital kimlik ve kimlik doğrulama

Kişisel kimlik bilgileri, blok zincir üzerinde saklanarak kullanıcıların dijital ortamlarda kimliklerini hızlı ve güvenli bir şekilde doğrulamalarına imkân sağlar (Zyskind, Nathan ve Pentland, 2015). Bu sistemler özellikle göçmenler, dijital hizmetlere erişimi olmayan bireyler için fayda sağlar. Farklı sektörlerde blok zincir kullanımının kazanımları Tablo 3’de özetlenmiştir.

Tablo 3. Blok zincir uygulama alanları ve kazanımları.

Uygulama Alanı	Blok zincir Katkısı
Finans	Hızlı, düşük maliyetli transfer, şeffaflık
Tedarik Zinciri	İzlenebilirlik, sahtecilik önleme
Sağlık	Veri güvenliği, hızlı erişim
Oylama Sistemleri	Saydamlık, değişmezlik
Dijital Kimlik	Güvenli kimlik doğrulama

1.5. Akıllı Sözleşmeler

Blok zincir teknolojisinin kripto para sistemlerinin ötesine geçmesini sağlayan en önemli unsurlardan biri akıllı sözleşmelerdir. İlk olarak 1990’larda bilgisayar bilimcisi Nick Szabo tarafından kavramsallaştırılan bu yapı, Ethereum gibi programlanabilir blok zincir platformlarıyla birlikte yaygınlık kazanmıştır (Szabo, 1997).

Akıllı sözleşmeler, önceden tanımlanmış kuralların otomatik olarak yürütüldüğü yazılımsal protokollerdir. Geleneksel sözleşmelerde olduğu gibi bir koşul gerçekleştiğinde, taraflar arasındaki yükümlülük otomatik biçimde yerine getirilir. Bu sözleşmeler, blok zincir ağına yüklendikten sonra değiştirilemez ve her işlemi herkes doğrulayabilir (Buterin, 2014).

1.5.1. Nasıl çalışır?

Bir akıllı sözleşme, “Eğer şu koşul gerçekleşirse, bu işlem otomatik olarak yürütülsün” mantığıyla çalışır. Örneğin; bir e-ticaret sisteminde ödeme yapıldığında ürün otomatik olarak kargoya verilir. Bu süreç tamamen kodla tanımlanır. Akıllı sözleşmelerin temel işleyiş mantığını Şekil 5 açıkça göstermektedir.

**Şekil 5.** Basit bir akıllı sözleşme işleyiş şeması.

1.5.2. Ethereum ve Akıllı Sözleşme Platformları

Ethereum, akıllı sözleşmelerin yaygınlaştığı ilk büyük platformdur. Solidity isimli özel bir programlama dili ile yazılan bu sözleşmeler, Ethereum Sanal Makinesi (EVM) üzerinde çalıştırılır. Bunun dışında Hyperledger Fabric,

EOS, Tezos gibi farklı platformlar da mevcuttur (Christidis ve Devetsikiotis, 2016).

1.5.3. Kullanım Alanları

Akıllı sözleşmelerin çeşitli kullanım alanları Tablo 4’de özetlenmiştir.

Tablo 4. Akıllı sözleşmelerin Örnek kullanım alanları.

Alan	Örnek Kullanım
Finans ve Sigorta	Otomatik tazminat ödeme sistemleri
Oylama Sistemleri	Şeffaf ve değiştirilemez oy sayım işlemleri
Tedarik Zinciri	Belirli teslimat noktalarına ulaşıldığında otomatik kayıt
Gayrimenkul	Tapu devri ve satış işlemleri
Telif Hakları	Dijital içerik üreticilerine otomatik ödeme sistemleri

1.5.4. Avantajlar ve Zorluklar

Avantajlar:

- Aracı ihtiyacını ortadan kaldırır
- Hız ve maliyet avantajı
- Değiştirilemezlik ve güvenlik

Zorluklar:

- Kod hataları geri döndürülemez zararlar doğurabilir
- Yasal düzenlemeler net değildir
- Geniş halk kitlesince anlaşılabilirliği sınırlıdır

1.6. Zorluklar ve Sınırlılıklar

Blok zincir teknolojisi, sunduğu potansiyel fırsatlarla birçok sektörde dönüşüm yaratmasına rağmen; teknik, hukuki ve toplumsal açılardan çeşitli zorluklar ve sınırlamalar da barındırmaktadır. Bu bölümde, teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki başlıca engeller ele alınmaktadır.

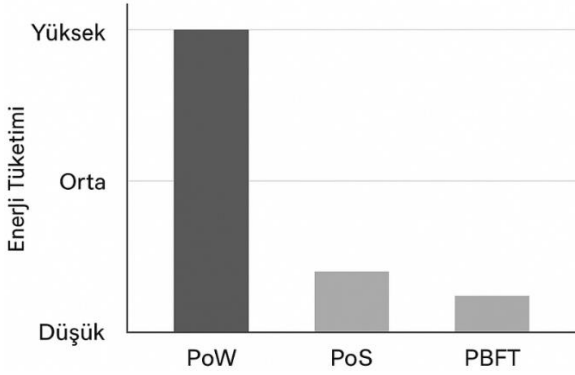
1.6.1. Ölçeklenebilirlik problemi

Blok zincir sistemleri, özellikle genel blok zincirlerde (örneğin Bitcoin, Ethereum) ölçeklenebilirlik sorunu ile karşı karşıyadır. İşlem hacmi arttıkça, tüm işlemlerin tüm düğümler tarafından doğrulanması gerekliliği sistemde darboğazlara neden olur (Croman ve ark., 2016). Bu durum, işlem başına gecikme süresini artırır ve kullanıcı deneyimini olumsuz etkiler.

Örnek: Bitcoin ağı saniyede ortalama 7 işlem gerçekleştirebilirken, geleneksel kredi kartı ağları saniyede 1500'ün üzerinde işlem gerçekleştirebilir.

1.6.2. Enerji Tüketimi

Özellikle Proof of Work (PoW) temelli sistemlerde yüksek enerji tüketimi ciddi bir sorundur. Bitcoin madenciliği için gereken enerji miktarı, bazı ülkelerin yıllık enerji tüketimini geçmektedir (de Vries, 2018). Bu durum hem çevresel etkiler hem de sürdürülebilirlik açısından tartışma konusudur. Farklı blok zincir mutabakat algoritmalarının enerji tüketimi açısından karşılaştırılması Şekil 6'da sunulmuştur



Şekil 6. Farklı blok zincir mutabakat algoritmalarının enerji tüketim karşılaştırması.

1.6.3. Hukuki ve düzenleyici belirsizlikler

Blok zincir, mevcut yasal düzenlemelerle tam olarak örtüşmeyen bir teknolojidir. Akıllı sözleşmelerin hukuki geçerliliği, blok zincir tabanlı dijital kimliklerin tanınması gibi konular hâlâ birçok ülkede netlik kazanmamıştır (Finck, 2018). Bu durum, teknolojinin özellikle kamu kurumları ve regüle sektörlerde benimsenmesini yavaşlatmaktadır.

1.6.4. Geri dönülemezlik ve hatalı kod

Blok zincir yapısı değiştirilemezlik ilkesine dayanır. Bu, bir avantaj olduğu kadar, hatalı yazılan akıllı sözleşmelerin geri döndürülemez sonuçlar doğurabileceği anlamına gelir. 2016 yılında yaşanan DAO saldırısında, Ethereum ağı üzerinden 50 milyon doların üzerinde kripto para sistemden çekilmiştir (Siegel, 2016). Bu olay, Ethereum'un çatallanmasına (hard fork) neden olmuştur.

1.6.5. Kullanıcı eğitimi ve farkındalık

Blok zincir sistemlerinin genel kullanıcılar için teknik karmaşıklığı yüksek olabilir. Cüzdan güvenliği, özel anahtarların yönetimi, işlem onay süreçleri gibi temel konular kullanıcı eğitimi gerektirir. Bu da teknolojinin kitlesel benimsenmesini geciktirebilir. Blok zincirin karşılaştığı başlıca zorluklar, Tablo 5’de genel bir bakışla özetlenmiştir.

Tablo 5. Blok zincir teknolojisinin karşılaştığı başlıca zorluklar

Zorluk Alanı	Açıklama
Ölçeklenebilirlik	İşlem sayısı artınca doğrulama gecikmeleri yaşanır
Enerji Tüketimi	PoW sistemleri ciddi çevresel maliyetler doğurur
Hukuki Belirsizlik	Regülasyon eksikliği kullanımda risk oluşturur
Geri Dönülemezlik	Hatalı kodlar geri alınamaz sonuçlar doğurur
Kullanıcı Bilinci	Sistemlerin anlaşılması ve doğru kullanımı zordur

1.7. Gelecekte Blok Zincir: Yükselen Trendler Ve Yeni Nesil Yapılar

Blok zincir teknolojisi, ilk nesil kullanım alanları olan dijital para sistemlerinden çok daha öteye geçerek Web3, DAO (Decentralized Autonomous Organization), NFT’ler ve sıfır bilgi ispatları (zk-proofs) gibi birçok yeni nesil yapının temelini oluşturmaktadır. Bu bölümde, blok zincirin evrimsel sürecinde ön plana çıkan yükselen trendler incelenmektedir.

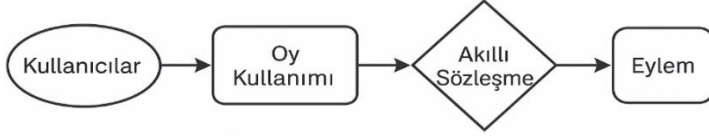
1.7.1. Web3: internetin merkeziyetsiz hâli

Web3, merkezi platformlar yerine kullanıcıların verilerini kontrol ettiği, blok zincir teknolojisiyle çalışan yeni nesil internet yapısını ifade eder. Web1 bilgi sunma; Web2 ise kullanıcı etkileşimi üzerine kuruluyken, Web3 veri mülkiyeti ve açık protokolleri ön planda tutar (Buterin, 2020).

Örnek: Bir sosyal medya platformunda kullanıcı, içeriklerini merkezi sunucular yerine IPFS ve blok zincir üzerinde saklayabilir.

1.7.2. DAO’lar: merkeziyetsiz otonom organizasyonlar

DAO’lar, kodla yönetilen, insan müdahalesi olmaksızın kendi kurallarına göre işlem yapan yapılar olarak tanımlanır. Yönetim kararları, token sahipleri tarafından alınır ve akıllı sözleşmeler üzerinden uygulanır (Hassan ve De Filippi, 2021). Merkeziyetsiz otonom organizasyonların (DAO) temel yapısı Şekil 7’de açık bir biçimde gösterilmiştir.



Şekil 7. DAO temel yapısı.

1.7.3. NFT ve dijital mülkiyet

NFT'ler (Non-Fungible Token), sanat, müzik, koleksiyon ve dijital kimlik gibi alanlarda eşsiz dijital varlıkların temsili olarak kullanılır. Blok zincir üzerinde saklanan bu token'lar, mülkiyetin doğrulanmasını sağlar.

Örnek: Bir dijital sanat eserinin NFT'si, sadece bir kişiye ait olabilir ve blok zincirde açıkça görülebilir.

1.7.4. zk-Rollup ve Katman-2 Çözümleri

Ölçeklenebilirlik sorununa çözüm olarak geliştirilen katman-2 çözümleri, işlemleri ana blokzincirin dışında işler ve sonrasında özet veriyi zincire kaydeder. zk-Rollup, bu çözümlerin en verimlilerindendir. Sıfır bilgi ispatları sayesinde hem güvenlik korunur hem de işlem kapasitesi artar (Ben-Sasson ve ark., 2014).

1.7.5. Kurumsal blok zincir ekosistemleri

Kurumsal yapılar artık blok zincir temelli çözümleri daha ciddi şekilde uygulamaya koymaktadır. Özellikle tedarik zinciri, sigorta, sağlık ve enerji sektörlerinde özel izinli blokzincir projeleri yaygınlaşmaktadır. Hyperledger, R3 Corda, ConsenSys Quorum gibi platformlar bu alanda öne çıkar. Geleceğe yön veren blok zincir teknolojileri ve trendlerinin genel bir değerlendirmesi Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Geleceğe yön veren blok zincir trendleri

Teknoloji/Trend	Açıklama
Web3	Kullanıcıya ait veri ve merkeziyetsiz uygulamalar
DAO	Oylama ve karar alma süreci otomatik sistemlerle
NFT	Benzersiz dijital varlıkların sahiplik doğrulanması
zk-Rollup	Hızlı ve ölçeklenebilir işlemler, sıfır bilgi kanıtları
Kurumsal Çözümler	Özel blok zincir sistemleriyle iç süreç optimizasyonu

1.8. Sonuç: Blok Zincir Teknolojisinin Etkisi Ve Gelecek Perspektifi

Blok zincir teknolojisi, dijital güveni yeniden tanımlayan, merkezi yapılardan bağımsız olarak işlemlerin doğrulanmasını ve kayıt altına alınmasını mümkün kılan devrim niteliğinde bir gelişmedir. Bitcoin'in doğuşuyla başlayan bu serüven, bugün artık yalnızca kripto para değil; sağlık, eğitim, hukuk, tedarik zinciri ve daha birçok sektörde benimsenen bir altyapı hâline gelmiştir.

Teknolojinin sunduğu şeffaflık, değiştirilemezlik, merkeziyetsizlik ve otomasyon gibi özellikler; özellikle güven ihtiyacının yüksek olduğu sektörlerde büyük bir dönüşüm potansiyeli yaratmaktadır. Aynı zamanda akıllı sözleşmeler, DAO'lar ve Web3 gibi yeniliklerle birlikte, bireylerin sistemdeki kontrolünü artıran yeni yapılar da ortaya çıkmaktadır (Tapscott ve Tapscott, 2016; Hassan ve De Filippi, 2021).

Ancak her teknolojide olduğu gibi, blok zincir için de bazı temel zorluklar mevcuttur. Ölçeklenebilirlik, yüksek enerji tüketimi, yasal düzenleme eksikliği ve kullanıcı farkındalığı bu alandaki ilerlemenin önünde engel teşkil etmektedir. Fakat geliştirilen yeni nesil çözümler özellikle Layer-2 teknolojileri ve çevre dostu mutabakat algoritmaları bu zorlukların zamanla aşılabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, blok zincir yalnızca bir veri kayıt sistemi değil, aynı zamanda toplumsal yapıları yeniden kurgulama potansiyeline sahip bir teknoloji olarak değerlendirilebilir. Önümüzdeki yıllarda daha fazla alanda uygulanabilir hâle gelmesi, bu teknolojinin geleceğin dijital omurgası olabileceğine işaret etmektedir.

KAYNAKÇA

- Antonopoulos, A. M. (2017). *Mastering Bitcoin: Programming the open blockchain*. O'Reilly Media, Inc.
- Azaria, A., Ekblaw, A., Vieira, T., & Lippman, A. (2016, August). MedRec: Using blockchain for medical data access and permission management. In *2016 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD)* (pp. 25-30). IEEE.
- Ben-Sasson, E., Bentov, Y., Horesh, Y., & Riabzev, M. (2014, October). Zerocash: Decentralized anonymous payments from Bitcoin. In *2014 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)* (pp. 459-474). IEEE.
- Bonneau, J., Miller, A., Clark, J., Narayanan, A., Kroll, J., & Felten, E. W. (2015, May). SoK: Research perspectives and challenges for Bitcoin and cryptocurrencies. In *2015 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)* (pp. 104-121). IEEE.
- Buterin, V. (2014). A next-generation smart contract and decentralized application platform. *Ethereum White Paper*, 3(37).
- Buterin, V. (2020). The future of blockchain scaling. *Ethereum Blog*.
- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, gaps and future directions. *Telematics and Informatics*, 36, 55-81.
- Castro, M., & Liskov, B. (2002). Practical Byzantine fault tolerance and proactive recovery. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, 20(4), 398-461.
- Catalini, C., & Gans, J. S. (2016). *Some simple economics of the blockchain* (No. w22952). National Bureau of Economic Research.
- Christidis, K., & Devetsikiotis, M. (2016). Blockchains and smart contracts for the internet of things. *IEEE Access*, 4, 2292-2303.
- Croman, K., Decker, C., Eyal, I., Gencer, A. E., Juels, A., Kosba, A., ... & Sirer, E. G. (2016). On scaling decentralized blockchains. In *International Conference on Financial Cryptography and Data Security* (pp. 106-125). Springer, Berlin, Heidelberg.
- De Vries, A. (2018). Bitcoin's growing energy problem. *Joule*, 2(5), 801-805.
- Eyal, I., & Sirer, E. G. (2018). Majority is not enough: Bitcoin mining is vulnerable. *Communications of the ACM*, 61(7), 95-102.

- Finck, M. (2018). Blockchain and the future of EU law. *EUI Working Papers*, Max Planck Institute for Innovation and Competition Research Paper No. 18-01, (2018/16).
- Hassan, S., & De Filippi, P. (2021). Decentralized autonomous organizations (DAOs). *Internet Policy Review*, 10(2).
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. [White paper].
- Narayanan, A., Clark, J., Kroll, J. A., & Princeton University. (2016). *Bitcoin and cryptocurrency technologies: a comprehensive introduction*. Princeton University Press.
- Siegel, D. (2016). The DAO hack: a timeline. *Coindesk*.
- Szabo, N. (1997). The idea of smart contracts. *Nick Szabo's Essays, Papers, and Thoughts*.
- Tapscott, D., & Tapscott, A. (2016). *Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World*. Penguin, New York.
- Tian, F. (2017). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things. 2017 International Conference on Service Systems and Service Management, 1-6.
- Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2018). Blockchain technology overview. *National Institute of Standards and Technology (NIST) Interagency/Internal Report (NISTIR) 8202*.
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2018). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International Journal of Web and Grid Services*, 14(4), 352-375.
- Zwitter, A., & Boisse-Despiaux, M. (2018). Blockchain for humanitarian action and development. *Journal of International Humanitarian Action*, 3(16).
- Zyskind, G., Nathan, O., & Pentland, A. (2015, May). Decentralizing privacy: Using blockchain to protect personal data. In *2015 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW)* (pp. 180-184). IEEE.

BÖLÜM 7

ENDÜSTRİ 4.0 VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: AKILLI FABRİKALAR VE TOPLUM 5.0

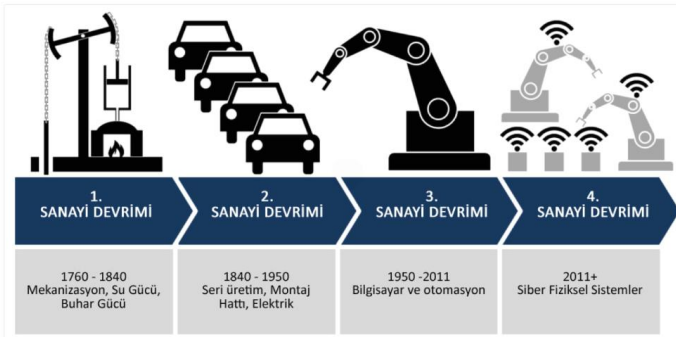
Dr. Öğr. Üyesi Ece CANTEMİR¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17980493>

¹ İstanbul Gelişim Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, İstanbul, Türkiye. ecantemir@gelisim.edu.tr, orcid id: 0000-0001-6215-568X

1. GİRİŞ

Teknolojide yaşanan gelişmeler doğrultusunda, 18. yüzyıldan günümüze kadar dört ayrı sanayi devrimi gerçekleşmiş ve bu devrimler toplumsal yaşamda önemli değişikliklere yol açmıştır (Karaca & Yamaçlı, 2022). Bu devrimlerin ilki, buhar gücüyle çalışan makinelerin icadıyla ortaya çıkan 1. Sanayi Devrimidir. Ardından, elektriğin üretim süreçlerinde kullanılmasıyla 2. Sanayi Devrimi yaşanmıştır. Üçüncü devrim, üretim hatlarında bilgisayarların ve robotik otomasyon sistemlerinin kullanılmasıyla gerçekleşen 3. Sanayi Devrimidir. Son olarak, 2011 yılında Almanya’da ortaya çıkan ve siber-fiziksel sistemlerin üretim süreçlerine entegre edilmesini esas alan 4. Sanayi Devrimi gündeme gelmiştir (Sağbaş & Gülseren, 2019). Şekil 1’de sanayi devrimlerinin tarihsel sıralaması ve ortaya çıkan özellikleri yer almaktadır.



Şekil 1. Sanayi devrimlerinin tarihsel gelişimi (Sarıcıoğlu et al., 2021)

4. Endüstri devrimi, sanayide makinelerin insan gücüne gerek kalmaksızın üretim ve yönetim süreçlerinde yer alması ile ortaya çıkmıştır (Ege Bölgesi Sanayi Odası Araştırma Müdürlüğü, 2015). Endüstri 4.0; nesnelerin interneti, siber fiziksel sistemler, robotik sistemler, 3d yazıcılar gibi pek çok sistemin entegrasyonu ile gerçekleşmekte ve yapı sektörü, sağlık, ulaşım, eğitim gibi pek çok sektörde dijital dönüşümün gerçekleşmesine yardımcı olmuştur. Bu bilgiler ışığında, dijital dönüşümün sadece teknolojik bir gelişme olmadığı, aynı zamanda ekonomik rekabet gücünün, toplumsal refahın ve sürdürülebilir kalkınmanın belirleyici noktalarından biri haline geldiği görülmektedir. Bu durum da Endüstri 4.0’ın yalnızca üretim sürecinde değil, yaşamın her alanında bir dönüşüm ve değişim yarattığı görülmektedir.

Bu bağlamda çalışma kapsamında, dijital dönüşüm ve endüstri 4.0'ın temel bileşenleri incelenerek, akıllı fabrikalara geçiş süreci değerlendirilmiş, süreçteki fırsatlar ve zorluklar irdelenerek, gelecekteki üretim modellerine ilişkin öngörüler incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde endüstri devriminin tarihsel gelişimi ele alınmış daha sonra ise dijital dönüşümün bileşenler açıklanmıştır. Bu bilgiler ışığında akıllı fabrikalar ve endüstri 4.0 ile ilişkili olan Toplum 5.0 detaylı bir biçimde incelenmiştir. Sonuç bölümünde ise, dijitalleşmenin geleceği tartışılmış ve gelecekte atılabilecek adımlara dair öneriler sunulmuştur.

2.ENDÜSTRİ DEVRİMLERİNDEN ENDÜSTRİ 4.0'A

2.1. Endüstri 1.0

1760'dan 1840'a kadar devam eden Endüstri 1.0, buhar gücünün kullanılması ve üretimin makineleşmesiyle başlayan süreci kapsamaktadır. Endüstriyel makineleri çalıştırmak için buhar ve su gücünden yararlanılması bu devrimin en önemli özelliklerindendir (Vinitha et al., 2020). Bu gelişmelerle birlikte tarımdan sanayiye yönelim başlamıştır.

Endüstri 1.0 süreci, Adam Smith'in *Milletlerin Zenginliği* adlı eserinde ifade ettiği üzere, fiyat mekanizmasının piyasaya sunulan ürün miktarı ile talep arasındaki dengesizlikleri otomatik olarak düzenleyen bir sistem olarak işlediği anlayışına dayanmaktadır. Bu dönemde sanayi üretimi, talep düzeyinin gerisinde kalmış ve toplumun ihtiyaç ve beklentilerini karşılamada yetersiz kalmıştır (Yin et al., 2018).

2.2 Endüstri 2.0

1840 ile 1950 yıllarını kapsayan Endüstri 2.0 döneminde; elektrik, montaj hattı, kimya endüstrileri, alışımalar, telgraf, telefon ve radyo gibi yeni teknolojiler ortaya çıkmıştır. Henry Ford' un oluşturduğu montaj hattı sistemi, üretim sürecinde büyük bir değişime yol açmıştır. Montaj hattı sistemi ile üretilen Model T otomobili ise, arabaların daha ucuza satılmasını sağlamıştır. Bu durum daha fazla insanın araba sahibi olmasına yardımcı olmuş ve fabrikalarda daha yüksek ücretli işlerin oluşmasını sağlamıştır (Koç ve Teker, 2019; Türkeli ve Yeşilkuş, 2020).

Endüstri 2.0 süreci, yönetsel planlamaların da geliştiği bir dönem olarak karşımıza çıkmaktadır. Büyüyen piyasa yapısıyla başa çıkmak amacıyla üretim faktörlerinin verimli kullanılması ve iş gücü motivasyonu için belirli

yapılar oluşturulmaya başlanılmıştır (Coluccia, 2012). Bu da Endüstri 2.0'ın yalnızca üretim teknolojileri değil aynı zamanda yönetsel yapıların da gelişmeye başladığını göstermektedir.

2.3. Endüstri 3.0

Endüstri 3.0 dönemi bilgisayar teknolojilerinin arayüz olarak kullanıldığı ve insan gücünün azaldığı bir dönemi işaret etmektedir. İnternetin büyük bir rol oynadığı bu dönemde, insanların birbiriyle iletişim kurma biçimleri, şirketlerin ve bireylerin çalışma biçimleri de şekillenmeye başlamıştır (Smith, 2001). Endüstri 3.0 dönemiyle birlikte mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olduğu anlaşılmış ve sürdürülebilirlik kavramı sanayi politikalarında yerini almaya başlamıştır. Yaşanan bir başka gelişme ise, 20.yy ikinci çeyreğinde geliştirilen ve çevreden gelen verileri algılayıp, kendisine tanımlanan komut dizilerine göre işleyen ve sonuç bildiren mikroişlemciler üretim süreçlerinde yer almıştır (Yetkin ve Coşkun, 2021).

Bu gelişmeler ışığında, otomasyon temelli sistemlerin yaygınlaşması ve üretim süreçlerinin dijitalleşmesi hızlanmış, sanayide esnek, verimli ve sürdürülebilir bir sürece girilmiştir.

2.4. Endüstri 4.0

Endüstri 4.0 dönemi ise, dijital dönüşümün üretim sistemlerine entegre edildiği bir dönemi kapsamaktadır. Nesnelerin interneti (IoT), yapay zekâ, büyük veri, bulut bilişim gibi yeni teknolojiler bu dönemin öne çıkan temel bileşenleri arasında yer almaktadır.

Endüstri 4.0, önceki üç sanayi devriminde yaşanan mekanizasyon, elektrifikasyon ve dijitalleşme süreçlerinin devamı niteliğinde olup; üretim süreçlerinde otomasyonun daha da ileri düzeye taşındığı, makinelerin yalnızca iş gücü destekleyicisi değil, aynı zamanda veri toplayan, analiz eden ve karar verebilen akıllı sistemler olarak işlev gördüğü bir dönüşüm evresini ifade etmektedir. Bu bağlamda Endüstri 4.0, insan-makine etkileşiminin üst düzeye çıktığı, üretim ağlarının siber-fiziksel sistemlerle entegre olduğu ve akıllı fabrikalar kavramının sanayi literatüründe yer edinmeye başladığı bir dönemi temsil etmektedir (Gülseren ve Sağbaş, 2019). Yapılan incelemeler ışığında Tablo 2.1'de 4 Endüstri devrimi tablo özeti şeklinde verilmiştir.

Tablo 2.1 4 Endüstri devrimi, temel gelişmeler ve toplumsal, ekonomik etki

Sanayi Devrimi	Tarihsel Dönem	Temel Teknolojiler / Gelişmeler	Toplumsal ve Ekonomik Etki
Endüstri 1.0	1760–1840	Buhar gücü, makineleşme, su gücü	Tarımdan sanayiye geçiş, üretimin makineleşmesi, üretim talebin gerisinde
Endüstri 2.0	1840–1950	Elektrik, montaj hattı, kimya, telgraf, telefon	Seri üretim, iş bölümünün artması, yönetsel yapılar gelişti
Endüstri 3.0	1950–2000	Bilgisayarlar, mikroişlemciler, internet	Otomasyon, dijitalleşme, sürdürülebilirlik kavramının yükselişi
Endüstri 4.0	2000–Günümüz	IoT, yapay zekâ, büyük veri, siber-fiziksel sistemler	Akıllı fabrikalar, insan-makine etkileşimi, veri temelli üretim süreçleri

3. DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN BİLEŞENLERİ

Dijital dönüşüm, geleneksel iş yapma biçimlerine dijital teknolojilerin eklenmesiyle yeni fırsatlar ve değerlerin yaratılması, geleneksel süreçlerin yeniden yapılandırılması sürecidir. Bu dijital dönüşüm geleneksel süreci tamamen bırakma değil, sistemin değişim sürecine ayak uydurması ve mevcut sistemin yükseltilmesini amaçlamaktadır (Bozkurt et al., 2021). Tutkunca (2020), yaptığı çalışmada dijital dönüşüm kavramını ele almış ve dijital dönüşüm bileşenleri incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda en çok karşılaşılan kavramların; büyük veri, yapay zekâ ve makine öğrenmesi, nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim, blok zincir teknolojisi ve dijital ikiz gibi kavramların öne çıktığı görülmüştür (Tutkunca, 2020). Dijital dönüşüm çoğu sektörde değişimlere neden olmuştur. Örneğin; nesnelerin interneti, yapay zekâ gibi teknolojiler yapıları dönüştürerek kullanıcısıyla iletişime geçen etkileşimli, kinetik ve esnek mekânlara dönüşebilmektedir. Akıllı bir bina iç mekânda sıcaklık, nem, ışık seviyesi ve kullanıcıların hareketlerini izleyerek, enerji verimliliğini artırabilir, kullanıcı konforunu sağlayabilir. Bu da daha sürdürülebilir, kullanıcısıyla etkileşime geçen yapıların tasarlanmasına yardımcı olmaktadır.

Bu bağlamda çalışmada sırasıyla büyük veri, yapay zekâ ve makine öğrenmesi, nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim, blok zinciri teknolojisi ve dijital ikiz kavramları anlatılacaktır.

3.1. Büyük Veri

Büyük veri kavramı, geleneksel veri tabanı yazılımlarıyla depolanması, işlenmesi ya da yönetilmesi mümkün olmayan, çok büyük ve karmaşık veri kümeleri olarak tanımlanmaktadır (Böğrekci, 2019). Büyük verinin toplayanlar, kullananlar ve üretenler olmak üzere üç temel paydaşı bulunmaktadır. Ayrıca bu veriler; yapılandırılmış, yapılandırılmamış ve yarı yapılandırılmış olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Yapılandırılmış veriler, belirli bir şemaya göre düzenlendikleri için geleneksel veri tabanlarında kolaylıkla saklanabilen ve üzerinde sorgulama ile analiz işlemleri yapılabilen veri türleridir; yapılandırılmamış veriler ise önceden tanımlı bir şemaya sahip olmadıkları için doğrudan işlenmesi güç, ek ön işleme gerektiren veri türleridir. Belli bir düzen taşıyan veriler ise yarı yapılandırılmış verilerdir (Holmes, 2017).

3.2. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi

Yapay zekâ, insana özgü olan problem çözme, anlama, genelleme yapma ve geçmiş deneyimlerden öğrenme gibi süreçleri bir bilgisayarın ya da makinenin yerine getirme yeteneği olarak tanımlanabilir (Nabiyev, 2012). Bu kavram “makinelere düşünebilir mi?” sorusuna cevap ararken ortaya çıkmış ve 1950’li yıllardan sonra gelişmeye başlamıştır. 1950’li yılında Alan Turing’in yayınlamış olduğu Bilgi İşlem Makineleri ve Zekâ (Computing Machinery and Intelligence) isimli makalesinde makinelerin düşünme yetisine sahip olup olamayacağı sorusu tartışılmıştır. Ayrıca önermiş olduğu Turing Testi ile makinenin insan ile etkileşimi sonucunda makinenin zeki olup olmadığını ortaya koyabilmektedir (Powell, 2019). 1956 yılında ise yapay zekânın isim babası John McCarthy, konu ile alakalı olarak “Dartmouth Konferansı” düzenlemiştir (Nilsson, 2009). 1959 yılında ise Arthur Samuel, kendi hatalarından ders çıkartan dama oyunu geliştirmiştir (Samuel, 1959). Yann LeCun 1989 yılında evrimsel sinir ağlarını kullanarak el ile yazılmış rakamları tanıyabilen LeNet isimli bir sistem geliştirmiştir. LeNet ABD posta servisi tarafından posta kodlarının zarflardan otomatik olarak okunmasını

sağlamıştır (LeCun, 1989). 2006 yılına gelindiğinde ise Geoffret Hinton derin öğrenme konusunda bilgilendirme yapmıştır (Hinton ve Salakhutdinov, 2006).

Makine öğrenmesi, genellikle yapay zekâ alanı içinde değerlendirilen bir çalışma alanıdır. Samuel (1959), makine öğrenmesini bilgisayarlara açıkça programlanmaksızın öğrenme yetisi kazandırmayı amaçlayan bir çalışma alanı olarak tanımlamıştır. Makine öğrenmesi, veri setleri aracılığıyla olayların girdileri ile çıktıları arasındaki ilişkilerin makineler tarafından öğrenilmesini ve bu öğrenilen bilgiler doğrultusunda benzer durumlara ilişkin kararların otomatik olarak verilmesini sağlayan bir süreçtir (Öztemel, 2016).

3.3. Nesnelerin İnterneti (IoT)

Nesnelerin interneti (IoT), ilk olarak 1999 yılında Kevin Ashton tarafından Procter & Gamble şirketi için hazırladığı sunumda ortaya atılmıştır. Nesnelerin interneti, internete bağlı olan cihazların birbirleriyle belirli bir iletişim protokolleri aracılığıyla veri alışverişi sağlayarak oluşturdukları akıllı ağ sistemi olarak tanımlanmaktadır (Karel, t.y.).

Endüstri 4.0 ile birlikte IoT kritik bir rol kazanmıştır. Fabrikalarda veya iş yerlerinde farklı kaynaklardan gelen verilerin toplanması ve bu verilerin organizasyonu IoT ile sağlanmaktadır. Bu sistemde, sensör teknolojisi sayesinde cihazlar internet ağına kablolu veya kablosuz olarak bağlanabilir (EBSO, 2017). Örneğin; Mitsubishi firması makineden makineye (M2M) platformu üzerinden makineler arasında doğrudan iletişim kurmaktadır. Kısaca IoT teknolojisi sayesinde nesneler sürekli etkileşim halinde olup, bazı faaliyetleri kendi kendilerine yönetebilirler. Nesnelerin internetinin aktif bir şekilde uygulandığı bir fabrikada, EBSO'nun (2017) raporuna göre;

- Üretim ve üretim süreci yönetimi pratikleşmesi,
- Tedarik zincirinin daha akıllı hale gelmesi,
- Enerji ve altyapı maliyetlerinin azalması
- Akıl ve bilgi gücünün öneminin artması,
- Gelir ve kar düzeyinde artışın sağlanması beklenmektedir.

Nesnelerin interneti teknolojisini görebildiğimiz bir diğer örnek ise Bosch firmasıdır. Almanya'nın ve dünyanın en köklü firmalarından biri olan Bosch, küresel ölçekte 250'den fazla tesisinde 100'ün üzerinde projeyi tamamlayarak Sanayi 4.0'ı uygulamaktadır (EBSO, 2017).

3.4. Bulut Bilişim

Çevrimiçi bilgi dağıtımı olarak adlandırılan bu sistem, ortak bilgi paylaşımı hizmetlerini bilişim aygıtları arasında sağlamaktadır. Sistemin ana amaçları arasında mevcut bilişim sistemlerinin bilgisayarlara ve diğer cihazlara ana kaynaktaki veri ve yazılımları sağlaması ve bu verilerin bilişim ağı üzerinde istenildiğinde kullanılabilir halde olması sayılabilir (Böğrekci, 2019).

Bulut bilişimin üretim süreçlerine dâhil edilmesiyle ortaya çıkan bulut tabanlı imalat ise, üretim kaynaklarını ve yeteneklerini bulut bilişim altyapısı üzerinden hizmet olarak sunan, esnek, ölçeklenebilir ve talep odaklı bir üretim modelidir. İki ana düzlemden oluşan bu sistem, donanım düzlemi ve yazılım düzlemini kapsamaktadır. Donanım düzlemi fiziksel üretim elemanlarını içerirken, yazılım düzlemi ise, üretim sürecinin kontrolünü sağlayan kontrol katmanı ile sanal katmandan oluşmaktadır (Yıldız, 2018).

3.5. Blok Zinciri Teknolojisi

Blok zincir teknolojisi, paylaşımı yapılan tüm işlemlerin veya dijital olayların zincirleme bir sistem yapısı olan, merkezi bir otoriteye bağlı olmayan, bütün kullanıcılar arasında gerçekleşen bir veri tabanıdır (Berberoğlu, 2021). Kısaca blok zincir, merkezi kontrolün olmadığı ve verilere bütün kullanıcıların erişebildiği bir sistemdir.

Blok zinciri sisteminde, işlemler belirli kurallar çerçevesinde bloklar haline gelir ve birbirlerine bağlanarak zincir meydana getirir. Yeni blok oluşturulurken, bir önceki bloğun özeti alınır ve ikinci blok elde edilerek zincire eklenir. Blok zincir teknolojisi; dağıtık, şeffaf, bağımsız, değiştirilemez ve kimlik gizliliğine sahiptir (Ünal & Uluyol, 2020).

3.6. Dijital İkiz Kavramı

Dijital ikiz kavramı, Endüstri 4.0'ın önemli bileşenlerinden biridir. Bu teknoloji; fiziksel bir nesnenin veya sürecin geçmiş ya da mevcut durumunu dijital bir profil olarak ortaya koymakta ve iş performansının optimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Dijital ikizler, gerçek zamanlı, büyük ve kümülatif veri ölçümlerine dayalı olarak çalışmaktadır (Zhuang et al., 2018). Dijital ikiz teknolojisi 2002 yılında ilk olarak Michigan Üniversitesindeki ilk üst düzey Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) kurslarında kullanılmış, ve o dönemde “Aynalanmış Mekanlar Modeli” (Mirrored Spaces Model) olarak adlandırılmıştır (Grieves, 2006).

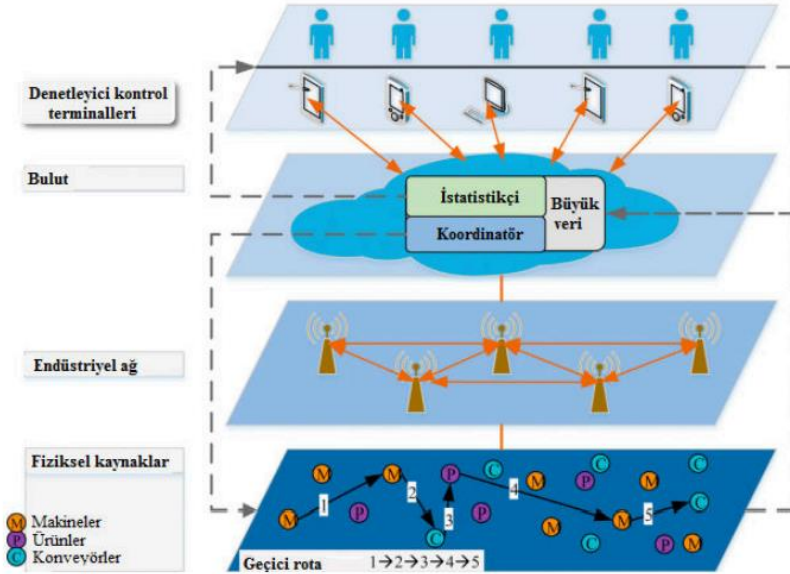
Dijital ikiz, geleceğin akıllı şehirlerinin kurgulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Sağlamış olduğu deneysel ortam ile şehirlerin daha sürdürülebilir olmasına ve şehir yönetiminin daha etkili şekilde yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca dijital ikiz kavramının Endüstri 4.0'da kullanımıyla akıllı fabrikalar sadece üretim hatlarının otomasyonu değil, aynı zamanda bilginin aynalanması süreçlerinin dinamik olarak izlenmesi ve optimizasyonu gerçekleşebilmektedir.

Dijital ikiz teknolojisini kullanan General Electric (GE) Brilliant Factory modelinde, üretim makinelerinin performanslarını değerlendirmekte ve tahmine dayalı bakım stratejileri oluşturmaktadır (GE Vernova, t.y.).

4. AKILLI FABRİKALAR VE OTOMASYON SİSTEMLERİ

Endüstri 4.0 ile birlikte hayatımıza giren diğer bir kavram ise akıllı fabrikalardır. Akıllı fabrikalar yalnızca üretim süreçlerinde değil, aynı zamanda üretim mekânlarının tasarımı, organizasyon biçimi ve mekânsal altyapıyı da değiştirmiş ve dönüştürmüştür. Dijital dönüşümün bileşenlerinden büyük veri, yapay zekâ ve makine öğrenmesi, nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim, blok zinciri teknolojisi ve dijital ikiz gibi teknolojiler akıllı fabrikalara entegre olarak, kendi kendini izleyen ve karar veren sistemlere dönüşmüştür. Şekil 4.1'de akıllı fabrikaların çok katmanlı mimarisi ve sistemlerin işleyiş mekanizması yer almaktadır. En alt katman olan fiziksel kaynaklarda, makineler (M), ürünler (P) ve konveyörler (C) bulunur. Bu fiziksel kaynaklar, sensörler aracılığıyla veri üretir. Ürünlerin geçici rotaları hesaplanarak, üretim hattındaki dinamik yönlendirmeler gerçekleşmektedir. Fiziksel kaynaklar bir üst katmanda yer alan endüstriyel ağ altyapısı sayesinde birbirine bağlanmaktadır. Bu katman nesnelerin interneti (IoT) sisteminin olduğu katmandır. Üçüncü katman bulut bilişim katmanıdır. Bu katmanda toplanan veriler büyük veri altyapısında depolanır ve analiz edilir. Üretim süreçlerinin optimizasyonu ve kaynak planlaması gibi konular karar destek mekanizmaları sayesinde gerçekleşir. Bu sistem, gerçek zamanlı geri besleme ve kendi kendini organize etmeyi sağlamaktadır. Denetleyici kontrol terminallerinin olduğu katman dördüncü katmandır. Bu katmanda insan operatörlerin sisteme müdahale edebildiği arayüzler bulunmaktadır. İnsan operatörler bu arayüzler sayesinde gerekirse manuel dokunuşlar yapabilir. En üst katman ise kullanıcılar ve operatörlerin yer aldığı katmandır. Bu katmandaki kişiler işleyişi izler ve

karar süreçlerine katılır. Bu sistem sayesinde üretim sistemleri; verimli, esnek, ön görülü ve sürdürülebilir bir boyuta gelmektedir.



Şekil 4.1 Endüstri 4.0 akıllı fabrika çerçevesi (Wang et. al., 2016)(Yıldız, 2018)

Akıllı fabrikalar insan gücünün azalıp, makinelerin kullanılması nedeniyle karanlık fabrikalar olarak da adlandırılmaktadır. Çin’de cep telefonu modülü üreten ilk karanlık fabrikada robotların kullanılmasıyla işçi sayısı %90 azalırken, kusurlu ürün oluşumu ise %25’ten %5’e kadar inmiştir (Aksoy, 2017). Akıllı fabrikalarda üretilen ürünler üretim süreci boyunca kendi yollarını bulur ve kolaylıkla tanımlanabilir niteliktedir. Bu durum üretim süreçlerinin karmaşıklığını azaltmaktadır. Ayrıca akıllı fabrikalar, üretimin kentsel çevre için sürdürülebilir ve karlı olmasına da yardımcı olmaktadır (Hofmann & Rüsch, 2017).

Akıllı fabrikaları mimari açıdan incelediğimizde ise, üretim sistemlerinin sürekli değişiklik göstermesi mekânların daha esnek şekilde tasarlanması gerekliliğine dönüşmüştür. Hareketli sistemler, modüler yapılar ve farklı işlevlere dönüşen mekânlar akıllı fabrikaların tasarımında önemli hale gelmektedir. Akıllı fabrikaların yalnızca üretim merkezi olmamasından dolayı, ısı, nem ve hava kalitesindeki değişimleri algılayan sensör teknolojisi sayesinde kullanıcısıyla etkileşime geçen mekânlar haline gelmiştir. Bu durum akıllı

fabrikaların daha sürdürülebilir, insan odaklı, etkileşimli mekânlar haline gelmesini sağlamaktadır.

European Parliament (2015) yayınlamış olduğu raporunda akıllı fabrikaları da inceleyerek SWOT analizi yapmış, Endüstri 4.0'ın güçlü ve zayıf yönlerine, fırsat ve tehditlerine yer verilmiştir. Tablo 4.1'de SWOT analizi tablosu yer almaktadır.

Tablo 4.1. Endüstri 4.0'ın güçlü ve zayıf yönlerine, fırsat ve tehditleri (European Parliament, t.y.).

Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
- Kaynak verimliliğinde, kârlılıkta ve küresel rekabet gücünde artış - Nitelikli istihdamın gelişmesi - Üretim süreçlerinde esnekliğin, verimliliğin, kalitenin artması - Ürün esnekliğinin gelişmesi ve müşteri tatmininin yükselmesi	- Teknolojiye ve internete yüksek bağımlılıktan dolayı en küçük bir dijital açığın yüksek sorunlara ve maliyetlere yol açabilmesi - Yüksek maliyetli teknoloji, Ar-Ge ve istihdam yatırımları - Makinelerin kontrolindeki bir ortamda muhtemel güvenlik açıkları - Ara eleman istihdamında yaşanan sıkıntılar - Durmaksızın gelişen bir alanda eğitim ihtiyacının da sürekli olması
Fırsatlar	Tehditler
- Avrupa ekonomisinin, imalat sanayide küresel ölçekte lider bir konuma yükselmesi - Yeni ürün ve hizmetler için yeni pazarların oluşması - Avrupa'nın azalan nüfus eğiliminin tersine dönmesi - Piyasa giriş şartlarının esnemesi ve kolaylaşması	- Siber güvenlik ve veri mahremiyetine ilişkin duyulan endişeler - Bazı ülkelerin, kurumların ve firmaların Sanayi 4.0'a uyum sağlamakta çok zorlanması - Ekonomideki kırılganlıkların küresel ölçekte artması

Tablo 4.1'de de görüldüğü gibi, Endüstri 4.0'ın üretime entegre edilmesiyle birlikte pek çok güçlü yön ve fırsat oluşmuş, bununla birlikte zayıf yönler ve tehditleri de beraberinde getirmiştir. SWOT analizi sonucunda, akıllı fabrikaların sadece teknolojik değil, sosyo ekonomik ve stratejik olarak da düşünülmesi gereken kapsamlı bir konu olduğu söylenebilir. Yapılan SWOT analizi, politikacılar, endüstri temsilcileri ve akademisyenler için önem arz etmektedir.

Endüstri 4.0'ın Türkiye'deki konumu incelendiğinde ise, bu sanayi dönüşümünün yakından takip edildiği ancak uygulama sürecinde çeşitli

eksikliklerin bulunduğu görülmektedir. Özellikle büyük ölçekli sanayi kuruluşlarının dijital dönüşüm süreçlerine uyum sağlaması daha kolayken, bu süreçlerin yüksek maliyetli olması nedeniyle KOBİ'ler dönüşümün gerisinde kalabilmektedir (Binici & Can, 2023). T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023 yılında yayımladığı “Sanayi ve Teknoloji Stratejisi” belgesinde dijital dönüşümün önemine vurgu yapmıştır. Belgede, sanayinin yüksek katma değerli bir yapıya evrilmesinde dijital dönüşümün belirleyici rol oynadığı ifade edilmiştir. Strateji, beş ana başlık altında toplanan 23 alt politikadan oluşmaktadır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023). Bu stratejik yaklaşım, Türkiye'nin Endüstri 4.0 ve Toplum 5.0 vizyonlarına entegre bir şekilde ilerlemesi için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

4.1. Toplum 5.0 ve Endüstri 4.0 Arasındaki İlişki

Teknoloji ve dijital dönüşümlerden beslenen Toplum 5.0, Japonya'da ortaya çıkarak yaşam kalitesi, sosyal sorumluluk ve sürdürülebilirlik kavramlarına odaklanmakta ve toplum refahını arttırmayı amaçlamaktadır. Toplum 5.0'ın ilkeleriyle üretim süreçleri, çevre ve insan ihtiyaçlarına karşılık veren sistemler olarak kurgulanmaktadır.

Fukuyama'nın (2018) yılında yapmış olduğu çalışma kapsamında toplum 5.0'ın hedefleri incelendiğinde; insan merkezli toplum, toplumsal sorunların teknoloji ile çözülmesi, fiziksel ve dijital alanların entegrasyonu, kişiselleştirilmiş hizmet ve üretim, veriye dayalı karar alma, kapsayıcılık (inclusiveness), yüksek katma değerli ekonomi, sürdürülebilirlik, yeni değerlerin yaratılması gibi ilkelerin akıllı fabrikalarla bağdaştığı görülmektedir. Tablo 4.2' de Toplum 5.0'ın akıllı fabrikalarla ilişkisini içeren ilkeler ve akıllı fabrikalarla ilişkisi yer almaktadır.

Tablo 4.2. Toplum 5.0’ın akıllı fabrikalarla ilişkisi

Toplum 5.0 İlkesi	Akıllı Fabrikalarla İlişkisi
İnsan Merkezli Toplum	Çalışanların sağlığı, güvenliği ve ergonomik tasarım önemlidir. Mekân kullanıcısıyla etkileşim halindedir.
Toplumsal Sorunların Teknoloji ile Çözülmesi	Mobil üretim alanları ile kırsal alanlardaki boşluk kapatılır.
Fiziksel ve Dijital Alanların Entegrasyonu	Dijital dönüşüm bileşenleri ile fiziksel üretim, dijital verilerle işlenir. Mekân tasarımında bilişim teknolojileri kullanılır.
Kişiselleştirilmiş Hizmet ve Üretim	Etkileşimli ve esnek yapısı nedeniyle kullanıcı isteklerine cevap veren özelleştirilmiş ürünler tasarlanabilir.
Veriye Dayalı Karar Alma	Üretimde hataların önlenmesi, kaynak optimizasyonu büyük veri analizleriyle sağlanır.
Kapsayıcılık (Inclusiveness)	Engellilere, uygun kontrol arayüzleri, uzaktan çalışma imkânları geliştirilebilir.
Yüksek Katma Değerli Ekonomi	Akıllı fabrikalar yüksek teknolojiyle üretim yaparak ihracat ve rekabette avantaj sağlar.
Sürdürülebilirlik	Akıllı fabrikalar enerji verimliliği, atık azaltma, döngüsel üretim gibi uygulamalara sahiptir.
Yeni Değerlerin Yaratılması	Yalnızca ürün değil, yeni deneyim ve yaşam biçimi oluşturulabilir.

Bu bilgiler ışığında, Endüstri 4.0’ın teknoloji ve üretime odaklı yapısının, Toplum 5.0 ile insan yararına odaklanan teknoloji ve toplum entegrasyonuna evrildiği söylenebilir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, 18. Yüzyıldan günümüze kadar uzanan sanayi devrimlerini incelemekte, dijital dönüşüm ve bileşenleri kapsamlı şekilde açıklanmaktadır. Dijital dönüşümün temel bileşenleri olan büyük veri, yapay zekâ, makine öğrenmesi, nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim, blok zinciri ve dijital ikiz teknolojisi; akıllı fabrikalarda yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda üretim mekânlarının tasarımı, organizasyonu ve insan-makine etkileşimini de köklü biçimde dönüştürmüştür. Bu durum akıllı fabrikaların geleneksel üretim biçimlerine nazaran esnek, kendi kendini organize eden, karar veren ve veriye dayalı merkezler haline getirmiştir.

Endüstri devrimleri ve geleneksel üretim tekniklerinde yaşanan bu dönüşümler yalnızca endüstriyel verimlilik hedefiyle sınırlı olmamalı, Toplum 5.0 vizyonu ışığında yaşam kalitesi, sosyal sorumluluk ve sürdürülebilirlik ilkeleriyle de beslenmelidir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, Endüstri 4.0'ın Toplum 5.0 ilkeleriyle birlikte bütüncül ve disiplinler arası bir yaklaşımla ele alınması önemlidir. Sosyal bilimler, etik, politika ve çevre gibi farklı disiplinlerin katkısıyla Endüstri 4.0'ın teknolojik altyapısı yeniden tasarlanabilir. Böylece insan merkezli, etik değerlere dayanan ve sürdürülebilir bir toplumsal dönüşümün temelleri atılabilir.

Dijital dönüşümün faydaları kadar olumsuz yanları da dikkate alınmalı, otomasyon ve yapay zekâ temelli sistemlerin gelişmesi ile işsizlik sorunun oluşması engellenmelidir. Ayrıca nitelikli iş gücüne olan ihtiyacın artması da kaçınılmazdır. Öte yandan, yapay zekâ teknolojilerinin üretim süreçlerine olan bu entegrasyonu veri güvenliği ve bireysel mahremiyetin korunması açısından yeni tartışma soruları oluşturmaktadır. Yapay zekâ teknolojilerinin karar alma süreçlerindeki etik sorunlar ele alınmalı; gelecekteki çalışmalarda yalnızca teknolojik gelişmelere değil, aynı zamanda toplumsal, hukuksal ve etik ilkelere de odaklanılmalıdır. Sonuç olarak, dijital dönüşümün temel bileşenleri ile Endüstri devrimleri sürecinde edinilen bilgi birikimi, Toplum 5.0 vizyonu ekseninde entegre edilmelidir. Bu entegrasyon sürecinde, akıllı fabrikaların insansız ve kontrolsüz “karanlık fabrikalara” dönüşmesi önlenerek, teknolojinin insan merkezli ve sürdürülebilir kullanımını sağlayacak yeni perspektifler ve stratejiler geliştirilmelidir. Böylece, teknolojik ilerlemelerin sadece üretim verimliliği değil, aynı zamanda sosyal ve etik sorumluluklarla dengelenmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Aksoy, S. (2017). Değişen teknolojiler ve Endüstri 4.0: Endüstri 4.0'ı anlamaya dair bir giriş. *SAV Katkı*, 4, 34–44.
- Berberoğlu, B. M. (2021). Dijital dönüşüm ve geleceği. In *Endüstri 4.0'dan Toplum 5.0'a: Dijitalleşmenin gücü* (ss. 19–34).
- Binici, C. M., & Can, E. (2023). Türk KOBİ'lerinin Endüstri 4.0'a Verdiği Tepkinin Literatürde İş Modelindeki Yenilikler Perspektifinden İncelenmesi. *Yıldız Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 11-24.
- Bozkurt, A., Hamutoğlu, N. B., Kaban, A. L., Taşçı, G., & Aykul, M. (2021). Dijital bilgi çağı: Dijital toplum, dijital dönüşüm, dijital eğitim ve dijital yeterlilikler. *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 7(2), 35–63.
- Bögrekci, İ. (2019). Sanayi 4.0 ve sensör dünyası. In *4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry*.
- Coluccia, D. (2012). The second industrial revolution (late 1800s and early 1900s). In *Corporate management in a knowledge-based economy* (ss. 52–64). Palgrave Macmillan.
- EBSO. (2017). *Sanayi 4.0: Gözden geçirilmiş ikinci baskı* [Rapor]. https://static.ebso.org.tr/documents/yayinlar/sanayi-v4/sanayi-40--gozden-gecirilmis-ikinci-baski_95869497.pdf
- European Parliament. (t.y.). *Resmî web sitesi*. <https://www.europarl.europa.eu/> (Erişim tarihi: 13 Haziran 2025)
- Ege Bölgesi Sanayi Odası Araştırma Müdürlüğü. (2015, Ekim). *Sanayi 4.0: Uyum sağlayamayan kaybedecek*. EBSO.
- Fukuyama, M. (2018). Society 5.0: Aiming for a new human-centered society. *Japan SPOTLIGHT*, 47, 47–50.
- GE Vernova. (t.y.). *Electrification & Digital Decarbonization Software*. GE Vernova.
Erişim adresi: <https://www.gevernova.com/software/>
Erişim tarihi: (15 Haziran 2025).
- Grieves, M. (2006). *Product lifecycle management: Driving the next generation of lean thinking*. McGraw-Hill.

- Gülseren, A., & Sağbaş, A. (2019). Endüstri 4.0 perspektifinde sanayide dijital dönüşüm ve dijital olgunluk seviyesinin değerlendirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 1–5.
- Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R. (2006). Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*, 313(5786), 504–507. <https://doi.org/10.1126/science.1127647>
- Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Holmes, D. E. (2017). *Big data: A very short introduction*. Oxford University Press.
- Karaca, E., & Yamaçlı, R. (2022). Endüstri 4.0'dan Toplum 5.0'a sürdürülebilirliğin eğitime yansması. In *Eğitim ve Bilim 2022-III* (ss. 25–38). Efe Akademi Yayın Evi.
- Karel. (t.y.). *Internet of Things (Nesnelerin İnterneti) nedir? Cihazların etkileşimi ve trendleri*. Karel. Erişim adresi: <https://www.karel.com.tr/blog/internet-things-nesnelerin-interneti-nedir-cihazların-etkileşim-trendleri> (Erişim tarihi: 12 Haziran 2025)
- Koç, T. C., & Teker, S. (2019). Industrial revolutions and its effects on quality of life. *PressAcademia Procedia*, 9(1), 304–311.
- LeCun, Y. (1989). Generalization and network design strategies. In *Connectionism in perspective* (Vol. 19, pp. 143–155).
- Nabiyev, V. V. (2012). *Yapay zekâ: İnsan-bilgisayar etkileşimi*. Seçkin Yayıncılık.
- Nilsson, N. J. (2009). *The quest for artificial intelligence*. Cambridge University Press.
- Öztemel, E. (2016). *Yapay sinir ağları* (4. bs). Papatya Bilim.
- Powell, J. (2019). Trust me, I'm a chatbot: How artificial intelligence in health care fails the Turing test. *Journal of Medical Internet Research*, 21(10), e16222. <https://doi.org/10.2196/16222>
- Samuel, A. L. (1959). Some studies in machine learning using the game of checkers. *IBM Journal of Research and Development*, 3(3), 210–229.
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2019). *2023 Sanayi ve Teknoloji Stratejisi*. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. <https://www.sanayi.gov.tr/stratejiler/2023-sanayi-ve-teknoloji-stratejisi>

- Sarıcıoğlu, P., İlerisoy, Z. Y., & Soyluk, A. (2021). Mimarlık ve Endüstri 4.0 eşleşmesi. *Yapı*, 464, 12–17.
- Smith, B. L. (2001). The third industrial revolution: Policymaking for the Internet. *The Columbia Science and Technology Law Review*, 3, 1–45.
- Tutkunca, T. (2020). İşletmelerde dijital dönüşüm ve ilgili bileşenlerinin analiz edilmesi üzerine kavramsal bir araştırma. *Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 17(1), 65–75.
- Türkel, S., & Yeşilkuş, F. (2020). Dijital dönüşüm paradigması: Endüstri 4.0. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 7(5), 332–346.
- Vinitha, K., Prabhu, R. A., Bhaskar, R., & Hariharan, R. (2020). Review on industrial mathematics and materials at Industry 1.0 to Industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 33, 3956–3960. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.080>
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards smart factory for Industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>
- Yetkin, E. G., & Coşkun, K. (2021). Endüstri 5.0 (Toplum 5.0) ve mimarlık. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (27), 347–353.
- Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 546–556.
- Yin, Y., Stecke, K. E., & Li, D. (2018). The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 848–861. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1403664>
- Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 1149–1163. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1617-6>
- Ünal, G., & Uluyol, Ç. (2020). Blok zinciri teknolojisi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13(2), 167–175.

BÖLÜM 8

GELECEĞİN BİLİŞİM TRENDLERİ BİYOTEKNOLOJİ, ROBOTİK, İNSAN-MAKİNE BİRLEŞİMİ

Öğr. Gör. Dr. Hüseyin GÖKAL¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17980588>

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Sakarya, Türkiye. huseyingokal@subu.edu.tr, orcid id: 0000-0001-5687-7715

1. GİRİŞ

Biyoteknoloji, günümüzde yalnızca mikrobiyolojik düzeydeki genetik ve hücresel müdahalelerle sınırlı bir bilim dalı olmaktan çıkmış; insan bedeni ile ileri teknolojilerin doğrudan entegrasyonunu da kapsayan çok boyutlu bir disipline evrilmiştir. Bu dönüşüm, özellikle robotik sistemlerin biyolojik yapılarla etkileşimini mümkün kılarak, insan fizyolojisinin sınırlarını zorlayan yenilikçi uygulamaların önünü açmıştır.

İnsan-makine birleşimi, geleneksel biyoteknoloji yaklaşımlarının ötesine geçerek kendini sinir sistemine doğrudan bağlanan yapay uzuvlar, zihinle kontrol edilebilen makineler, dış iskelet destekli hareket sistemleri ve hatta beynin elektriksel aktivitesini okuyabilen çiplerle göstermektedir (Nicolelis, 2019; Musk & Neuralink Team, 2021). Bu çığır açıcı teknolojiler sayesinde, yalnızca hastalıkların tedavisi değil, aynı zamanda insan performansının artırılması, bilişsel kapasitenin genişletilmesi ve engellerin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir.

Bu gelişmelerin merkezinde, biyoteknolojinin şu üç temel alt disiplini yer almaktadır:

Biyorobotik: Canlı organizmalar ile robotik sistemlerin hibrit bir yapı oluşturacak şekilde bütünleştirilmesi. **Nöroteknoloji:** Beyin ve sinir sistemine doğrudan müdahale eden teknolojik çözümler; özellikle beyin-bilgisayar arayüzleri bu alandaki kilit uygulamalardandır. **İnsan-Makine Arayüzleri (HMI):** İnsanların kas, sinir veya beyin sinyalleri aracılığıyla makineleri doğrudan kontrol etmesini sağlayan platformlar. Bu disiplinler, biyoteknolojiyi yalnızca yaşamı onaran bir araç olmaktan çıkarıp, insan deneyimini yeniden tanımlayan bir teknolojiye dönüştürmektedir. Böylece biyoteknoloji, insan vücudunu adeta teknolojik bir platform haline getiren yeni bir çağın anahtarı konumuna gelmiştir.



Şekil 1 Bilişim Trendleri

1.1 İnsan-Makine Arayüzleri (HMI) ve Biyoteknoloji

İnsan-Makine Arayüzleri (HMI), bireylerin makinelerle doğrudan biyolojik, sinirsel veya elektriksel sinyaller aracılığıyla etkileşim kurmasını sağlayan sistemler bütünüdür. Bu arayüzler hem tıbbi rehabilitasyon süreçlerinde hem de insan yeteneklerinin artırılmasına yönelik uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Biyoteknoloji, HMI sistemlerinin geliştirilmesinde hem donanım tasarımı hem de biyolojik uyumluluk açısından vazgeçilmez bir temel sunar.

HMI sistemlerinin çoğu, beyin dalgalarını (örneğin Elektroensefalogram - EEG), kas elektrik sinyallerini (Elektromiyografi - EMG) veya nöral kodlamaları analiz ederek makineleri kontrol etmek üzere tasarlanmıştır. Bu teknolojiler, özellikle nörolojik engelleri bulunan bireylerin yaşam kalitesini artırmak amacıyla sağlık alanında hızla yaygınlaşmaktadır.

1.2. Beyin-Bilgisayar Arayüzleri (Brain-Computer Interfaces - BCI)

Beyin-Bilgisayar Arayüzleri (BCI), bireyin zihinsel faaliyetlerini doğrudan algılayarak dış dünyadaki dijital veya fiziksel sistemlere komut

verebilmesini sağlayan öncü teknolojilerdir. EEG tabanlı BCI sistemleri, felçli bireylerin yalnızca düşünce yoluyla robotik kolları hareket ettirmesi, bilgisayar kullanması veya tekerlekli sandalyeleri kontrol etmesi gibi uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Abiri ve diğerleri., 2019).

BCI teknolojileri, aynı zamanda Dikkat Eksikliği ve Hiperaktivite Bozukluğu (DEHB) gibi bilişsel bozuklukların tedavisinde de uygulanmaya başlanmıştır. Ek olarak, oyun ve eğitim teknolojilerinde performansı artırıcı bir araç olarak yoğun bir şekilde araştırılmaktadır.

1.3. Akıllı Protez Uzuvlar

Akıllı protezler, biyosensörler yardımıyla kullanıcının sinirsel veya kas sinyallerini algılayarak bu sinyalleri mekanik harekete dönüştüren ileri düzey sistemlerdir. Özellikle kol ve bacak protezlerinde kullanılan bu sistemler, kullanıcıya gerçek zamanlı kontrol imkânı sunar. Ayrıca, geri bildirim mekanizmaları sayesinde kullanıcıya dokunma, basınç veya denge hissi de aktarılabilir (Herr, 2014).

Bazı ileri düzey sistemler, kullanıcıya görsel veya sesli geri bildirim sağlamadan, doğrudan sinirsel bağlantılar üzerinden his iletimini mümkün kılmaktadır. Bu durum, protez uzuvların yalnızca işlevsel değil, aynı zamanda duyuşsal olarak da bireyin vücuduna entegre hale gelmesini sağlamaktadır.

1.4. Dış İskelet Sistemleri (Exoskeletons)

Dış İskelet Sistemleri (Exoskeletons), özellikle omurilik yaralanmaları, kas hastalıkları veya yaşlılığa bağlı hareket kaybı gibi durumlarda, bireyin fiziksel hareketlerini desteklemek amacıyla geliştirilmiş giyilebilir robotik sistemlerdir. Bu dış iskeletler, kullanıcıdan gelen kas veya sinirsel sinyalleri algılayarak uygun yönlendirmeler yapar ve hareketi destekler (Dollar & Herr, 2008).

Bu teknolojiler hem klinik rehabilitasyon süreçlerinde hem de sanayi ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır; ağır yük taşıma, dayanıklılık artırımı gibi alanlarda da insan performansını önemli ölçüde geliştirmektedir. Yeni nesil exoskeletonlar, yapay zekâ ile donatılarak kullanıcının hareket ve diğerler alışkanlıklarını öğrenebilmekte ve kişiselleştirilmiş destek sunabilmektedir.

1.5. Biyomekatronik ve Nöroteknoloji

Biyomekatronik, biyolojik sistemler ile mekanik, elektronik ve yazılım bileşenlerinin entegrasyonunu konu edinen, çok disiplinli bir bilim alanıdır. Bu alan, insan vücudu gibi biyolojik yapılarla mühendislik ürünü robotik sistemlerin uyumlu çalışmasını hedefler. Özellikle kaybedilmiş veya işlevini yitirmiş organ ve uzuvların yerine geçebilecek yapay çözümlerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar. Biyomekatroniğin temel amacı, sadece işlevsel replikalar oluşturmak değil, aynı zamanda doğal dokularla uyumlu, öğrenebilen ve hissedebilen sistemler geliştirmektir (Herr, 2014).

Biyomekatronik uygulamaları genellikle üç temel bileşeni içerir: Biyolojik Arayüz: Kas, sinir veya beyin dokusundan gelen biyosinyallerin algılanması. Mekanik Yapı: Hareketi sağlayan motorlar, sensörler ve yapısal elemanlar. Kontrol Sistemleri: Biyosinyalleri yorumlayan ve mekanik yapıyı yöneten mikroişlemciler veya yapay zekâ algoritmaları (Herr, 2014).

1.6. Nöroprotezler ve Motor Fonksiyonun Geri Kazanımı

Nöroprotezler, sinir sisteminden gelen elektriksel sinyalleri algılayarak bunları mekanik hareketlere çeviren ileri düzey sistemlerdir. Felçli bireylerde veya amputasyon sonrası protez kullanan kişilerde, bu cihazlar sinir uçlarından gelen sinyalleri veya beyin aktivitesini analiz ederek doğal kas hareketlerini taklit eder (Dollar & Herr, 2008).

Bu sayede, bireyler zihinsel komutlarla protez uzuvlarını yüksek hassasiyetle kontrol edebilir. Bazı nöroprotez sistemleri, yalnızca motor kontrol sağlamakla kalmaz; aynı zamanda geri bildirim mekanizmaları ile dokunma, sıcaklık veya basınç gibi duyuları da kullanıcıya iletmeyi amaçlar (Herr, 2014). Bu teknoloji, insan ve makine arasındaki etkileşimi yalnızca dışsal değil, aynı zamanda duyuşsal ve sinirsel düzeyde de bütünleştirmeyi hedeflemektedir (Herr, 2014).

1.7. Genetik Mühendisliği ile Biyomekatronik Entegrasyonu

Son yıllarda genetik mühendisliğinde yaşanan gelişmeler, özellikle CRISPR/Cas9 gibi hedefe yönelik gen düzenleme teknikleri sayesinde, biyomekatronik sistemlerin daha etkin ve kişiselleştirilebilir hale gelmesini sağlamaktadır (Gasiunas ve diğerleri., 2012). Örneğin, sinir hücrelerinin elektriksel iletiminde rol oynayan genlerin modifikasyonu ile daha keskin sinyal iletimi mümkün olabilir. Bu da nöroprotezlerin sinir sistemiyle olan

uyumluluğunu artırmakta, sistemin doğruluğunu ve tepki süresini iyileştirmektedir (Gasiunas ve diğerleri., 2012).

Buna ek olarak, hücresel düzeyde mühendislik ile yapay sinapsların geliştirilmesi, gelecekte yalnızca kas kontrolünü değil, bilişsel fonksiyonları destekleyen nöroteknolojik implantların da mümkün olabileceğine işaret etmektedir (Park ve diğerleri., 2023).

1.8. Nöroteknolojinin Diğer Uygulama Alanları

Nöroteknoloji, biyomekatronik alanını sadece fiziksel rehabilitasyonla sınırlamaz; aynı zamanda bilişsel ve sinirsel süreçleri düzenlemeye yönelik geniş bir yelpazede uygulama alanı bulur. Parkinson ve epilepsi tedavisinde kullanılan derin beyin stimülasyonu (DBS), nöronal aktivitenin ritmini düzenleyerek semptomların azaltılmasında oldukça etkilidir (Herr, 2014).

Ayrıca, beynin işlevsel haritalandırılması yoluyla bireylerin dikkat, stres veya öğrenme süreçleri optimize edilebilir. Yapay zekâ destekli sistemler, bireyin zihinsel aktivitesini analiz ederek özelleştirilmiş geri bildirimler sunabilir (Park ve diğerleri., 2023). Bu gelişmeler, yalnızca klinik tedavilerle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda insan performansını artırma, öğrenme hızını optimize etme ve duygusal tepkileri yönetme gibi alanlara da kapı aralamaktadır (Park ve diğerleri., 2023).

GELECEĞİN BİLİŞİM TRENDLERİ

 NEURALINK BEYİN ÇİPİ İnsan beynine yerleştirilen bu beyin-bilgisayar arayüzü, nöral sinyalleri algılayıp işleyerek dış donanımlarla (bilgisayarlar, robotik uzuvlar) doğrudan iletişim kurmayı sağlar. Özellikle felçli bireylerin, sadece düşünce gücüyle cihazlara komut vermesine olanak tanımayı hedefler.	 YAPAY SİNAPS İnsan beynindeki nöronlar arası bağlantıları taklit eden bu yapılar, "nöromorfik" (beyin benzeri) bilişim mimarisinin temelidir. Kendi kendine öğrenen protezler ve insan beyni gibi verimli çalışan yapay zeka sistemleri geliştirmek için kullanılmaktadır.	 BİYONİK BACAK VE AYAK Uzun kaybı yaşayan bireyler için geliştirilen bu gelişmiş protezler, kullanıcının kas ve sinir sinyallerini algılayarak doğal bir şekilde hareket eder. İleri teknoloji modeller, doğal yürüyüşü taklit etmenin yanı sıra kullanıcıya zemini hissettiren duyuşal geri bildirimler de sağlar.
 ARGUS II BİYONİK GÖZ İleri derecede görme kaybı olan bireyler için geliştirilmiş retinal implant sistemidir. Bir kamera aracılığıyla yakalanan görsel bilgi, elektrik sinyallerine dönüştürülür ve optik sinir üzerinden beyne iletilir (sınırlı da olsa) işlevsel bir görüş sağlanması amaçlanır.	 CRISPR-CAS9 GEN DÜZENLEME DNA üzerinde önceden belirlenmiş bölgelere hassas müdahale etmeyi sağlayan devrim niteliğinde bir "genetik makas" teknolojisidir. Kalıtsal hastalıkların tedavisi ve ileri genetik mühendisliği çalışmaları için kritik bir araçtır.	 BİYOELEKTRONİK İLAÇ İMLANTI Sinir sistemine entegre edilen bu mikro cihazlar, hedeflenen sinirlere hassas elektriksel uyarılar gönderir. Bu yöntem; diyabet, romatoid artrit gibi kronik ve inflamatuvar hastalıkların tedavisinde ilaçlara alternatif veya tamamlayıcı bir "elektrosötik" yaklaşım sunar.

Şekil 2 Akıllı Protezler

1.9. Cyborg Teknolojileri: İnsan 2.0

Cyborg (sibernetik organizma) kavramı, ilk kez 1960 yılında Manfred Clynes tarafından ortaya atılmış ve biyolojik organizmaların yapay teknolojik parçalarla desteklenmesini tanımlamak için kullanılmıştır (Have, 2021). Günümüzde bu kavram, yalnızca tıbbi rehabilitasyonla sınırlı kalmayıp, insan bedeninin sınırlarını aşarak performans, dayanıklılık ve bilişsel kapasiteyi artırmayı hedefleyen teknolojileri de kapsamaktadır (Gray, 2020). Biyoteknolojinin evrilen yüzü olan cyborg sistemler, biyolojik doku ile makinenin gerçek zamanlı etkileşimini mümkün kılarak insan vücudunu adeta bir teknolojik platform haline getirmektedir (Cang & Parthasarathy, 2022).

1.10. Beyin-Makine Entegrasyonu: Neuralink Örneği

Beyin-makine arayüzleri alanında en dikkat çekici gelişmelerden biri, Elon Musk tarafından kurulan Neuralink şirketinin geliştirdiği beyin implant çipleridir. Bu cihazlar, doğrudan beynin motor korteksine entegre edilerek sinirsel aktiviteyi kaydeder, analiz eder ve dijital sistemlere aktarır.

Neuralink'in 2023'te insan denemelerine başladığı bu teknoloji, felçli bireylerin yalnızca düşünce yoluyla bilgisayar ve robot sistemleri kontrol etmesini hedeflemektedir (Musk & Neuralink Team, 2021). Aynı zamanda, gelecekte hafıza artırımı, zihinsel iletişim (telepati) ve yapay zekâ ile bütünleşmiş bilinç aktarımı gibi transhümanist uygulamaların da zeminini oluşturabileceği öngörülmektedir (Goering ve diğerleri., 2021).

1.11. Biyoelektronik Tıp ve Akıllı İmplantlar

Biyoteknolojinin sağlık alanındaki en yenilikçi uzantılarından biri olan biyoelektronik ilaçlar, klasik kimyasal ilaçların yerini alabilecek nitelikte sinir sistemine doğrudan entegre edilen elektronik implantları içerir. Bu sistemler, örneğin vagus siniri gibi önemli nöral ağlara bağlanarak inflamasyon, insülin direnci ve depresyon gibi kronik hastalıkları nörolojik düzeyde tedavi etmeyi hedefler (Famm ve diğerleri., 2013). Günümüzde Galvani Bioelectronics gibi öncü şirketler, bu teknolojileri özellikle bağışıklık sisteminin nörolojik kontrolü üzerine yoğunlaştırmaktadır (Tracey, 2022).

Biyoelektronik sistemlerin temel avantajı, ilaçlara kıyasla yan etkilerin azalması ve vücut içi geri bildirimle dozajın gerçek zamanlı olarak ayarlanabilmesidir. Bu da sistemleri hem tedavi edici hem de düzenleyici (modülatör) araçlar haline getirmektedir (Birmingham ve diğerleri., 2021).

1.12. İnsan 2.0: Transhümanist Yaklaşım

Siborg teknolojileri, yalnızca kayıp uzuvların telafisi ya da hastalıkların tedavisi için değil, aynı zamanda insan doğasının dönüştürülmesi amacıyla da geliştirilmektedir. Transhümanizm, insanın bilişsel, duygusal ve fiziksel yeteneklerini teknolojiyle birleştirerek geliştirmesini savunan felsefi ve bilimsel bir yaklaşımdır (Bostrom, 2005). Bu çerçevede, biyonik gözlerden yapay sinapslara, zihinsel kapasite artırıcı çiplerden genetik zekâ modifikasyonuna kadar birçok proje, "İnsan 2.0" vizyonunun bileşenleri olarak görülmektedir.

Günümüzde bu tür teknolojiler yalnızca deneysel olmaktan çıkmış, aynı zamanda ticarileşme sürecine girmiştir. Örneğin, Musk'ın da vurguladığı gibi, gelecekte "insanlar ile yapay zekâ arasında bir sinirsel arabirim" olmadan rekabet etmek mümkün olmayabilir (Musk & Neuralink Team, 2021).

1.13. Etik, Güvenlik ve Toplumsal Etkiler

Biyoteknoloji ve insan-makine birleşimi alanındaki kayda değer gelişmeler, yalnızca teknik başarıları değil; aynı zamanda insanlık, toplum ve temel değerler açısından derin etik ve sosyolojik sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu sorunlar; bireysel haklar, toplumsal adalet, teknolojik eşitsizlikler ve insan kimliği gibi temel konular etrafında yoğunlaşmaktadır (Mecacci & Haselager, 2021). Bu bölümde, söz konusu endişeler detaylıca ele alınacaktır.

1.14. Veri Mahremiyeti ve Nöral Güvenlik

İnsan-makine arayüzleri ve nöroteknolojik implantlar aracılığıyla beyin sinyallerinin kaydedilmesi, analiz edilmesi ve sistemlere aktarılması, bireylerin içsel düşünce yapılarının dışa açılması anlamına gelmektedir. Bu durum, düşünce özgürlüğü, zihinsel mahremiyet ve bireysel güvenlik gibi kavramların yeniden tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır (Ienca & Andorno, 2017). Nöral veri, yalnızca tıbbi amaçlarla değil, pazarlama, gözetim veya politik yönlendirme gibi kötüye kullanımlara da açık bir potansiyel taşımaktadır. Bu riskler, özellikle "nöro-haklar" adı verilen yeni bir insan hakları çerçevesinin uluslararası düzeyde gündeme gelmesine neden olmuştur (Yuste ve diğerleri., 2021).



Şekil 3 Cyborg Teknolojileri

1.15. Sibernetik Ayrımcılık ve Erişim Eşitsizliği

Cyborg teknolojileri kapsamında geliştirilen biyonomik uzuvlar, yapay zekâ destekli beyin çipleri veya dış iskelet sistemleri gibi ileri uygulamalar, genellikle yüksek maliyetli olup çoğunlukla özel şirketlerin patentleri altında ticarileştirilmiştir. Bu durum, teknolojik olarak güçlendirilmiş bireyler ile klasik biyolojik yeteneklere sahip bireyler arasında yeni bir sosyal tabakalaşma ve biyolojik ayrıcalık yaratma potansiyeli taşır (Coeckelbergh, 2020). Böyle bir "sibernetik ayrımcılık", hem toplumsal dışlanmayı hem de iş gücü piyasasında yapay olarak üstünleştirilmiş bireylerin haksız avantajını beraberinde getirebilir (Bennett & Daly, 2023).

Bu tartışmalar, yalnızca sağlık hizmetlerine erişimi değil; aynı zamanda eğitim, iş bulma, hatta vatandaşlık hakları gibi konularda da derin yapısal eşitsizlikleri tetikleyebilir.

1.16. Transhümanizm ve İnsan Doğasının Sınırları

Transhümanizm, insan biyolojisinin ötesine geçmeyi hedefleyen teknolojik müdahaleleri felsefi ve etik bir çerçevede savunan bir akımdır. Ancak bu yaklaşım, "insan nedir?" sorusunu yeniden gündeme getirmekte; insan doğasının sınırlarının nereye kadar genişletilebileceği veya genişletilmesi gerektiği konusunda ciddi etik belirsizlikler yaratmaktadır (Bostrom, 2005).

Bazı etikçiler, yapay zekâ ile entegre nöroteknolojilerin, bireyin kimlik bütünlüğünü zedeleyebileceğini ve karar verme süreçlerinde dışsal etkilerin artabileceğini savunmaktadır (Gordijn & ten Have, 2021). Transhümanist uygulamaların sadece bireysel tercih değil, toplumun bütününe etki edecek köklü dönüşümler yaratma riski bulunmaktadır. Bu nedenle, kamu denetimi, etik kurullar ve insan hakları merkezli yasal düzenlemeler kritik bir önem kazanmaktadır.

1.17. Gelecek Perspektifi: Biyoteknoloji, Yapay Zekâ ve Robotik Entegrasyonu

Biyoteknolojinin geleceği, artık yalnızca genetik düzenleme veya tıbbi iyileştirmeye sınırlı kalmayıp; insan ve makine arasında gerçek zamanlı, öğrenebilen ve kendini uyarlayabilen simbiyotik bir ilişki kurmak üzerine inşa edilmektedir. Bu vizyon, yapay zekâ (AI), robotik ve nöroteknolojinin biyolojik sistemlerle birleşmesini temel alır (Mamo & Gonzalez-Esteban, 2021).

Günümüz bilim insanları, biyoteknolojiyi organizmaları dönüştüren bir araçtan ziyade, bilinçli ve öğrenen sistemler geliştiren bir platform olarak değerlendirmektedir.

1.18. Biyonik Gözler ve Nöral Görme Sistemleri

Görme engelli bireyler için geliştirilen biyonik gözler, ışık sinyallerini yakalayarak görsel kortekse iletebilen retinal implantlar kullanır. Bu sistemler, minyatür kameralar, kablosuz sinyal iletimi ve elektrot dizileri sayesinde optik sinir aracılığıyla beyinle doğrudan iletişim kurar (Lorach ve diğerleri., 2015). Örneğin, Second Sight tarafından geliştirilen Argus II sistemi, 60 elektrotla sınırlı olsa da görsel algıyı kısmen mümkün kılmıştır. Yeni nesil implantlar, çözünürlük ve renk algısı gibi parametrelerde hızlı ilerlemeler kaydetmektedir (Rizzo ve diğerleri., 2022).

Bu sistemlerin yapay zekâ ile desteklenmesi, hareketli nesnelerin tanınması, yüz tespiti ve ortam algısı gibi ileri görsel görevlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

1.19. Yapay Sinapslar ve Nöromorfik Protezler

Geleneksel protez sistemleri, kullanıcıdan gelen sinyalleri belirli şablonlara göre işlerken, yapay sinapslara sahip yeni nesil protezler, insan beyninin öğrenme mekanizmalarını taklit eden yapay sinir ağlarıyla çalışır. Bu nöromorfik sistemler, plastisite (öğrenme yeteneği) ve adaptasyon gibi özellikler sergileyerek kullanıcının alışkanlıklarına göre kendini yeniden programlayabilir (Park ve diğerleri., 2023).

Yapay sinaps teknolojisi hem motor kontrol hem de bilişsel destek açısından protezleri yalnızca mekanik yardımcıları olmaktan çıkarıp, zihinsel işlevleri destekleyen giyilebilir beyin uzantıları haline getirmeyi amaçlamaktadır (Sangwan & Hersam, 2020).

1.20. Kuantum Nöroteknoloji ve Bilinç Aktarımı

Son yıllarda, bilinç, hafıza, duygu ve benlik gibi karmaşık zihinsel süreçlerin dijital sistemlerle aktarımı ve işlenmesi üzerine çalışan yeni bir disiplin ortaya çıkmıştır: kuantum nöroteknoloji. Bu yaklaşım, sinir sistemindeki kuantum etkileşimleri ve nöral osilasyonların bilgi taşıma potansiyelini incelemektedir (Tarlaci & Pregnolato, 2021).

Bu teknoloji henüz erken aşamada olmakla birlikte; teorik olarak zihinsel içeriklerin yedeklenmesi, yapay zekâ ile kişilik paylaşımı ve bilinç durumlarının simülasyonu gibi konular, araştırma gündeminde önemli bir yer tutmaktadır (Hameroff & Penrose, 2014). Bu tür teknolojiler, yapay zekâyı yalnızca bir araç değil, potansiyel bir bilinç sahibi sistem olarak tanımlayan postbiyolojik tartışmalarla da doğrudan ilişkilidir.

2. SONUÇ

Günümüzde biyoteknoloji, artık yalnızca canlı organizmaları inceleyen veya iyileştirmeyi amaçlayan bir bilim dalı olmaktan çıkmış; canlı dokularla ileri teknolojiyi birleştirerek doğanın ve insanlığın yeniden inşasını mümkün kılan dönüştürücü bir disipline evrilmiştir. Bu köklü dönüşüm, özellikle insanın anatomik, fizyolojik ve bilişsel sınırlarını aşma yönündeki iddialı girişimlerde belirgin bir şekilde kendini göstermektedir (Gonzalez & Mamo, 2022). Genetik mühendisliği, sentetik biyoloji, biyonik uzuvlar, yapay sinapslar ve kuantum nöroteknoloji gibi çığır açıcı uygulamalar, biyoteknolojinin artık doğayı taklit etmenin ötesine geçip onu yeniden tanımlamaya başladığının en güçlü kanıtlarıdır.

Robotik sistemler, nöroteknolojik arayüzler ve yapay zekâ destekli biyomekatronik cihazlar aracılığıyla gerçekleşen insan-makine birleşimi, biyolojinin ve hatta insanlığın geleceğini şekillendiren baskın bir paradigma haline gelmiştir. Bu birleşim, sadece fiziksel engelleri aşmakla kalmamakta; aynı zamanda öğrenme, iletişim, duygulanım ve hatta bilinç gibi insana özgü karmaşık süreçlerin yeniden tasarlanmasını da mümkün kılmaktadır (Goering ve diğerleri., 2021). Böylece biyoteknoloji, günümüzde yalnızca tedavi edici değil; aynı zamanda geliştirici, dönüştürücü ve insan kapasitesini genişletici bir araç konumundadır.

Bu alandaki ilerlemelerin getirdiği sorumluluk ise yalnızca bilim insanlarına değil, aynı zamanda bu teknolojilerle iç içe büyüyecek ve onları şekillendirecek olan eğitim gören genç bireylere de aittir. Üniversite öğrencileri ve genel olarak genç kuşaklar, bu teknolojik gelişmeleri sadece bilimsel ilgiyle değil, aynı zamanda derin bir etik duyarlılık ve toplumsal sorumluluk bilinciyle değerlendirmek durumundadır (Sahakian ve diğerleri., 2022). Zira bu teknolojiler, bireyin yaşam kalitesinden çok daha öte; insanlık kavramının, kimliğinin ve geleceğinin yeniden belirlenmesinde kritik bir güce sahiptir. Bu

bağlamda, eğitim kurumlarının da bu alandaki öğretimi, yalnızca teknik bilgi aktarımıyla sınırlamayıp; etik, felsefi ve hukuki bağlamlarla bütünleşik bir şekilde desteklemesi büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Abiri, R., Borhani, S., Sellers, E. W., Jiang, Y., & Zhao, X. (2019). A comprehensive review of EEG-based brain–computer interface paradigms. *Journal of Neural Engineering*, 16(1), 011001. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaf12e>
- Bennett, C., & Daly, A. (2024). Algorithmic injustice and the ethics of neurotechnology. *AI & Society*, 39(1), 139–152. <https://doi.org/10.1007/s00146-022-01474-z>
- Birmingham, K., Gradinaru, V., Anikeeva, P., Grill, W. M., Pikov, V., McLaughlin, B., Pasricha, P. J., Weber, D., Ludwig, K., & Famm, K. (2021). Bioelectronic medicines: A research roadmap. *Nature Reviews Drug Discovery*, 20(7), 458–478. <https://doi.org/10.1038/s41573-021-00195-4>
- Bostrom, N. (2005). *In defense of posthuman dignity*. *Bioethics*, 19(3), 202–214. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8519.2005.00437.x>
- Coeckelbergh, M. (2020). *AI Ethics*. The MIT Press.
- Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 144–158. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.915453>
- Famm, K., Litt, B., Tracey, K. J., Boyden, E. S., & Slaoui, M. (2013). A jump-start for electroceuticals. *Nature*, 496(7444), 159–161. <https://doi.org/10.1038/496159a>
- Gasiunas, G., Barrangou, R., Horvath, P., & Siksny, V. (2012). Cas9–crRNA ribonucleoprotein complex mediates specific DNA cleavage for adaptive immunity in bacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(39), E2579–E2586. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208507109>
- Goering, S., Klein, E., Dougherty, D. D., & Widge, A. S. (2021). Neurotechnology and the ethical challenges ahead. *Nature*

- Biotechnology*, 39(2), 164–166. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-00763-8>
- Gonzalez, J. L., & Mamo, J. (2022). Biotechnology and the posthuman future: Reframing the boundaries of nature. *Futures*, 135, 102868. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102868>
- Gordijn, B., & ten Have, H. (2021). *Global bioethics*. Routledge.
- Gray, C. H. (2020). *Cyborg Citizen: Politics in the Posthuman Age* (2nd ed.). Routledge.
- Hameroff, S., & Penrose, R. (2014). Consciousness in the universe: A review of the ‘Orch OR’ theory. *Physics of Life Reviews*, 11(1), 39–78. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2013.08.002>
- Herr, H. (2014). Exoskeletons and orthoses: Classification, design challenges and future directions. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-1>
- Have, H., & Patrão Neves, M. (2021). Cyborg. In *Dictionary of Global Bioethics* (pp. 321–322). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54161-3_184
- Ienca, M., & Andorno, R. (2017). Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology. *Life Sciences, Society and Policy*, 13, Article 5. <https://doi.org/10.1186/s40504-017-0050-1>
- Lorach, H., Goetz, G., Mandel, Y., Lei, X., Kamins, T. I., Mathieson, K., Huie, P., Lavinsky, D., Wang, L., & Palanker, D. (2015). Retinal prostheses: Vision restoration with a wireless photovoltaic subretinal implant. *Nature Communications*, 6, Article 8504. <https://doi.org/10.1038/ncomms9504>
- Mamo, J., & Gonzalez-Esteban, J. L. (2021). Human–machine symbiosis: The future of biotechnology. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121110. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121110>

- Mecacci, G., & Haselager, P. (2021). Ethics and the challenges of brain–computer interfaces. *Journal of Neural Engineering*, 18(4), 041002. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/abf3d3>
- Musk, E., & Neuralink Team. (2021). An integrated brain–machine interface platform with thousands of channels. *Journal of Medical Internet Research*, 23(10), e16194. <https://doi.org/10.2196/16194>
- Nicolelis, M.A.L. (2019). *The True Creator of Everything: How the Human Brain Shaped the Universe As We Know It*. Yale University Press.
- Park, S., Kim, H., Cho, J., & Lee, K. (2023). Hardware neuromorphic computing for artificial intelligence and brain-like processing. *Nature Electronics*, 6, 58–70. <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00869-3>
- Rizzo, J. F., Ayton, L. N., & Yanai, D. (2022). Progress toward vision restoration using retinal implants. *Annual Review of Vision Science*, 8, 1–21. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-102921-111711>
- Sahakian, B. J., Mallucci, G. R., & Rose, S. P. R. (2022). Ethics and the future of neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 23(2), 71–82. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00539-6>
- Sangwan, V. K., & Hersam, M. C. (2020). Neuromorphic nanoelectronic materials. *Nature Nanotechnology*, 15(8), 517–528. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0683-3>
- Tarlaci, S., & Pregmolato, M. (2021). Quantum consciousness: A scientific hypothesis and its empirical implications. *NeuroQuantology*, 19(5), 49–65. <https://doi.org/10.14704/nq.2021.19.5.NQ21010>
- Tracey, K. J. (2022). The inflammatory reflex: Definitions, mechanisms and disease relevance. *Nature Reviews Immunology*, 22(7), 429–441. <https://doi.org/10.1038/s41577-022-00699-4>
- Yuste, R., Goering, S., Bi, G., Carmena, J. M., Carter, A., Fins, J. J., Hyman, S., Klein, E., Müller, S., Poo, M. M., & others. (2021). Four ethical

priorities for neurotechnologies and AI. *Nature*, 551(7679), 159–163.
<https://doi.org/10.1038/551159a>

BÖLÜM 9

TÜRKİYE METAL SANAYİİNDEKİ İŞ KAZALARININ ANALİTİK DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAPAY ZEKA DESTEKLİ YAKLAŞIMLAR

Ömer Faruk ÜTÜK¹

Doç. Dr. Ömer ASAL²

Prof. Dr. Yunus KAYIR³

Prof. Dr. Hakan DİLİPAK⁴

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17980707>

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması ABD, Ankara, Türkiye. ofaruk.utuk@gazi.edu.tr, orcid id: 0000-0003-4658-6652

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye. omerasal@gazi.edu.tr, orcid id: 0000-0002-6339-9202

³ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye. ykayir@gazi.edu.tr, orcid id: 0000-0001-6793-7103

⁴ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye. hdilipak@gazi.edu.tr, orcid id: 0000-0003-3796-8181

1. GİRİŞ

İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG), işletmelerde çalışanların güvenliklerini ve sağlıklarını korumak amacıyla tehlikelerin tanınması, değerlendirilmesi ve kontrol edilmesini amaçlayan bir bilim dalıdır (Alli, 2008). İSG, sosyal, ekonomik ve teknolojik değişimlerle sürekli genişleyen bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. İşverenler tarafından iş yerinde alınması zorunlu tedbirler 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu kapsamında açıkça belirtilmekte ve işletmelerin değişen koşullara uygun hale getirilmesi vurgulanmaktadır. Günümüzde artan tüketici talepleri, işletmeleri değişen üretim koşullarıyla karşı karşıya bırakmakta, bu da üretim miktarlarının ve çeşitliliğinin artmasına neden olmaktadır. Bu dinamik ortamda işletmeler, yeni üretim teknolojilerini benimsemek zorunda kalmakta ve bu süreçte İSG çalışmalarının önemi giderek artmaktadır. Ancak, temel İSG problemleri ve bunların yol açtığı iş kazaları ile meslek hastalıkları, halen yoğun bir şekilde devam etmektedir. Özellikle metal sektörü gibi piyasada kritik bir yere sahip olan sektörlerde yaşanan iş kazalarının sayısı diğer sektörlerle kıyasla daha fazladır. Bu durum, sektördeki işletmelerde önemsenmeyen tehlikelerin varlığına işaret etmektedir. Önleyici tedbirlerin alınmaması durumunda ise ciddi iş kazaları kaçınılmaz hale gelmektedir. İSG' nin temelini oluşturan risk analizi metotları, tehlikelerin derecelendirilmesi için kullanılan önemli araçlardır. Ancak, bu yöntemlerin uygulayıcıların öznel yorumlarına dayanması, bazı tehlikelerin göz ardı edilmesine ve risklerin yanlış derecelendirilmesine yol açabilmektedir. Bu noktada, kaza istatistik tahmin modelleri devreye girmekte; mevcut veriler doğrultusunda gelecekte meydana gelebilecek potansiyel kazalar için tahminlerde bulunmaktadır. Ancak, yapay zekâ tekniklerinin bu alanda yeterince kullanılmadığı görülmektedir. Metal sektöründeki iş yerlerinde oluşacak olan iş kazalarının önlenmesi için etkin ve objektif risk analizi yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Mevcut istatistikler doğrultusunda yapay zekâ tekniklerinin de dahil edildiği kaza tahmin modellerinin geliştirilmesi, İSG çalışmalarının etkinliğini artırabilir. Böylece, çalışanların sağlık ve güvenliğinin korunması sağlanabilir. Sonuç olarak, İSG alanında yapay zekâ tekniklerinin entegrasyonu ve objektif risk analizi yöntemlerinin kullanımı, iş kazalarının minimize edilmesinde elzem bir rol oynayacaktır. Bu yaklaşımlar, işletmelerin rekabetçi koşullarda faaliyetlerini sürdürebilmeleri için kritik öneme sahiptir. İşverenlerin bu

konuda bilinçlenmesi ve gerekli adımları atması hem çalışan sağlığını koruyacak hem de işletmelerin verimliliğini artıracaktır. Bu çalışmanın amacı, Sosyal Güvenlik Kurumu istatistiklerinden alınan verilerle metal sektöründe (NACE kodu 24 ve 25) 2014-2023 yılları arasındaki iş kazası istatistiklerini detaylı bir şekilde incelemektir. Literatür taraması ile yapay zekâ tekniklerinin sektörel bazda iş kazalarını önlemeye yönelik kullanımı belirlenmeye çalışılacaktır. Bu sayede, metal sektöründe iş kazalarının azaltılması yönünde farkındalık yaratılması hedeflenmektedir. Çalışmanın sonuçlarının, sektörel güvenlik stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Texpert, tasarım mühendislerine güvenlik bilgilerine hızlı erişim sağlayan web tabanlı bir uzman sistemdir (Winn vd., 2002). Küresel ontolojiye dayalı bir risk değerlendirme metodu, iki boyutlu matris modeliyle sistem yapısını analiz etmektedir (Draghici ve Draghici, 2013). Risk analizleri için endüktif ve tümdengelim metodolojilerini birleştiren bir uzman sistem tasarlanmıştır (Baron vd., 2012). LabVIEW programıyla insan faktörünü içeren esnek bir risk değerlendirme ara yüzü geliştirilmiştir (Aras vd., 2014). Bilgisayar tabanlı eğitim sistemleri, iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinde önemli rol oynamaktadır (Janicak, 1999). DsSafe, inşaat sektöründeki düşme kazalarını analiz eden kural tabanlı bir uzman sistemdir (Birgonul vd., 2016). İnşaatlardaki risk değerlendirmesi için bulanık tabanlı bir uzman sistem geliştirilmiştir (Amiri vd., 2017). FTES-FALL, zemindeki kazasız inşaat düşüşlerini inceleyen bir hata ağacı uzman sistemidir (Hadipriono, 1992). Hindistan'daki manganez madenlerinde meydana gelen kazalardan elde edilen verilerle bir kaza tahmin modeli geliştirilmiştir (Chaudhari, 2016). PROTECTOR, maden ocaklarının güvenlik analizlerinde sinir ağı ve uzman sistem teknolojilerini birleştiren hibrit bir sistemdir (Lilic vd., 2010). Gürültü kirliliğinin insan iş verimliliği üzerindeki etkilerini öngören bir nöro-bulanık model geliştirilmiştir (Ahmed ve Zulquernain, 2009). Metal işleme sıvılarının risklerini değerlendiren bir uzman sistem geliştirilmiştir (Meciarova, 2011). SONEX, işten kaynaklı iskelet-kas bozukluklarını önlemeye yönelik ergonomik risk değerlendirme sistemidir (Pavlovic-Veselinovic vd., 2016). Ergonomik değerlendirmeleri destekleyen bulanık mantık tabanlı bir analiz aracı geliştirilmiştir (Nunes, 2009). Bilgisayar kullanıcılarının çalışma

koşullarını analiz eden bir uzman sistem tasarlanmıştır (Shavarani ve Korhan, 2015). Gemi inşa sürecindeki riskleri değerlendiren web tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilmiştir (Cebi vd., 2017). Sırbistan'da elektrik enerjisi şirketinde insan güvenilirliğini değerlendiren bir sistem geliştirilmiştir (Stojiljkovic vd., 2016). RAMIRES, çalışma ortamlarında güvenliği artırmayı hedefleyen bir karar destek sistemidir (Teimourikia ve Fugini, 2017). Gürültü kaynaklı tehlikelerin önlenmesi için etkili bir karar destek sistemi geliştirilmiştir (Asawarungsaengkul vd., 2007). İnşaat sektöründeki iş kazası risklerini değerlendirmek için üçlü indeks modeli oluşturulmuştur (İmriyas vd., 2007). Prefabrikte duvar panellerinin kullanımında ergonomi ve verimliliği değerlendiren bir karar destek sistemi geliştirilmiştir (Nussbaum vd., 2009). Yapı güvenlik yönetim sistemleri için bulanık karar destek sistemi geliştirilmiştir (Tam vd., 2002). Wuhan Yangtze metro tüneline yol yüzeyi hasarını analiz eden Dinamik Bayes Ağına dayalı bir sistem geliştirilmiştir (Wu vd., 2015). İnşaat alanında emniyet konusunda acil karar desteği sunan ontoloji ve vaka tabanlı bir sistem tasarlanmıştır (Zhu, 2013). ToolSHeD™, inşaat tasarımcılarının İSG risklerini tasarım süreçlerine entegre etmelerini sağlayan bir araçtır (Cooke vd., 2008). Yer altı kömür madenciliğinde işçi güvenliğini artırmak için birleşik riske dayalı karar verme yöntemi geliştirilmiştir (Samantra vd., 2017). Nextcase/safety, güvenlik yöneticilerinin kaza önleme politikalarını değerlendirmelerine yardımcı olan bir platformdur (Virkki-Hatakka ve Reniers, 2009). Romanya'daki bir otomotiv imalat şirketinde İSG yönetimi için proaktif bir yazılım geliştirilmiştir (Mitea vd., 2012). Uzun süreli ayakta durmayla oluşan rahatsızlıkları minimize etmeye yönelik bir karar destek sistemi geliştirilmiştir (Halim vd., 2014). Omuz ve boyun ağrısı risk faktörlerini analiz eden bir karar destek sistemi geliştirilmiştir (Padma ve Balasubramanie, 2011). Bel ağrısı teşhisi için web tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilmiştir (Lin vd., 2006). Kas-iskelet bozukluklarını önlemeye yönelik ergonomik risk analizi yapan bir karar destek sistemi geliştirilmiştir (Womack ve Armstrong, 2005). İnşaat sahalarındaki mesleki risklerin analizinde Takagi-Sugeno tabanlı bulanık çıkarım modeli kullanılmıştır (Debnath vd., 2016). Rüzgâr türbinlerinin inşa sürecindeki İSG risklerini değerlendirmek için bulanık AHP α -cut analizi yöntemi uygulanmıştır (Adem vd., 2016). HSE performans değerlendirmesi için Bulanık Kapsamlı Değerlendirme yöntemi geliştirilmiştir (Li vd., 2015).

Gemi onarım sahalarındaki iş kazası verilerini analiz eden uyarlanabilir bir nöro-bulanık çıkarım sistemi geliştirilmiştir (Fragiadakis vd., 2014). FMEA yöntemine bulanık mantık eklenerek kaza olasılığını değerlendiren bir model geliştirilmiştir (Özfırat, 2014). Güvenlik göstergelerinin analizi için bulanık AHP yöntemi kullanılmıştır (Janackovic vd., 2013). Sağlık ve güvenlik yazılım paketlerinin seçimi için AHP tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir (Marciano vd., 2016). Metal sektöründeki kaza verileri kullanılarak yapay sinir ağı tabanlı bir kaza tahmin modeli geliştirilmiştir (Ayanoglu ve Kurt, 2019).

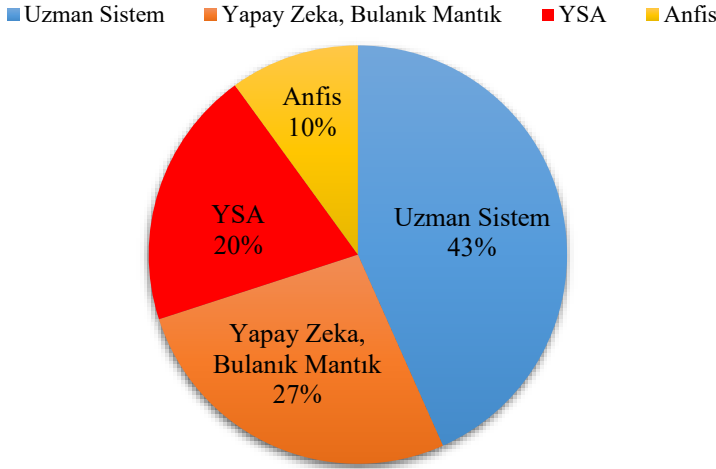
3. YÖNTEM

Metal sektörü, 26.12.2012 tarih ve 28509 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan tebliğde yer alan Ek-1 İş Yeri Sınıfları Listesi'ne göre tehlikeli ve çok tehlikeli sınıflarda sınıflandırılmıştır. Bu sektör, iş kazası sayılarının yüksekliği ile dikkat çekmekle birlikte, ölümlü iş kazalarının diğer sektörlere oranla daha düşük olması, iş sağlığı ve güvenliği risklerinin yeterince önemsenmemesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, metal sektöründe göz ardı edilen risklerin ciddi kazalara yol açabileceği gerçeği göz önünde bulundurularak yapılan bu araştırmada, Sosyal Güvenlik Kurumu'ndan (SGK) elde edilen istatistik verileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve nicel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, iş kazalarını önlemeye yönelik yapay zekâ yöntemleri üzerine kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, metal sektörünün alt kollarından biri olan ve 25.62.02 koduyla tanımlanan "Metallerin makinede işlenmesi" iş kolu üzerinde incelemeler yapılmış; torna tesviye, delme, frezeleme, kaynak yapma gibi faaliyetlerin riskleri ele alınarak sektörel güvenlik önlemleri değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR

Alan yazın incelemesi sonucunda, iş kazalarının engellenmesi amacıyla yürütülen araştırmalarda; yapay sinir ağları, uzman sistemler, bulanık mantık, hibrit (sinirsel-bulanık) modeller, karar destek mekanizmaları, veri madenciliği, ontoloji tabanlı yaklaşımlar, analitik hiyerarşi süreci ve mutlak olasılık yargısı gibi yapay zekâ tekniklerinin sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Çalışmalardan elde ettiğimiz bulgulara göre çalışma yapılan sektörler; inşaat, madencilik, imalat (otomotiv, metal işleme, gemi inşa ve onarım, metal sektörü işyerleri), enerji, petrokimya, perakende, denizcilik,

ulaşım sektörleri olarak sıralanmaktadır. Şekil 1'de sunulan bulgular, literatürde yer alan tüm sektörlerdeki uygulamalarda; uzman sistemler, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve ANFIS tekniklerinin en yaygın kullanılan araçlar olduğunu sırasıyla ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Literatürde kullanılan yapay zeka yöntemleri

Tablo 1. Farklı sektörlerdeki iş kazası istatistikleri (sayı ve oranlar) (SGK, İstatistik Yıllıkları, 2014-2023)

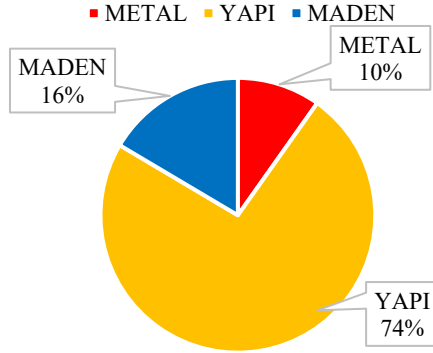
İstatistik Yılı	Tüm Sektörler Toplam İş Kazası	Metal		Yapı		Maden	
		İş Kazası	Oran	İş Kazası	Oran	İş Kazası	Oran
2014	74.301	12.793	17,22	9.166	12,34	6.511	8,76
2015	95.616	15.773	16,5	12.996	13,59	5.627	5,88
2016	100.519	15.646	15,57	14.998	14,92	5.635	5,61
2017	118.410	17.560	14,83	18.565	15,68	6.237	5,27
2018	56.975	8.533	14,98	9.130	16,02	2.736	4,8
2019	112.802	16.038	14,22	11.978	10,62	5.901	5,23
2020	125.346	15.878	12,67	12.850	10,25	5.785	4,62
2021	151.180	21.490	14,21	17.060	11,28	7.536	4,98
2022	162.842	22.242	13,66	17.929	11,01	8.032	4,93
2023	166.870	22.494	13,48	19.210	11,51	7.713	4,62
Toplam	1.164.861	168.447	14,46	143.882	12,35	61.713	5,30

2014-2023 yılları (10 yıllık süreç) SGK istatistik verilerine göre tüm sektörler baz alındığında en çok iş kazasının metal, yapı(inşaat), ve maden sektörlerinde olduğu görülmüştür. SGK istatistik yıllıklarından alınan verilerden oluşturulan tablo incelendiğinde metal sektöründe yaşanan iş kazalarının sayısı ve yıllık yüzdelik oranı yapı ve maden sektörlerinden fazladır.

Tablo 2. Sektörel bazda ölümlü iş kazalarının dağılımı ve oranları (SGK, İstatistik Yıllıkları, 2014-2023)

İstatistik yılı	Tüm Sektörler Ölümlü Sonuçlanan Toplam İş Kazası	Metal		Yapı		Maden	
		Ölümlü Sonuçlanan İş Kazası	Oran	Ölümlü Sonuçlanan İş Kazası	Oran	Ölümlü Sonuçlanan İş Kazası	Oran
2014	1.626	45	2,77	501	30,81	381	23,43
2015	1.252	58	4,63	473	37,78	79	6,31
2016	1.405	57	4,06	496	35,3	83	5,91
2017	1.633	65	3,98	587	35,95	85	5,21
2018	1.541	91	5,91	591	38,35	56	3,63
2019	1.147	50	4,36	368	32,08	48	4,18
2020	1.231	52	4,22	347	28,19	62	5,04
2021	1.382	71	5,14	386	27,93	70	5,07
2022	1.517	66	4,35	422	27,82	102	6,72
2023	1.966	90	4,57	552	28,07	75	3,81
Toplam	14.700	645	4,38	4.723	32,12	1.041	7,08

Tablo 1' deki bulgular metal sektöründe yaşanan iş kazalarının sayısal olarak diğer sektörlerden yüksek olduğunu gösterse de; Tablo 2 verileri, bu sektördeki ölümcül kaza oranının diğerlerine kıyasla daha düşük seviyede kaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Sektörlere göre ölümle sonuçlanan iş kazaları oranları (2014-2023)

Şekil 2 ve Şekil 3'e göre metal sektöründe yaşanan iş kazası oranı %45 iken, ölümlü iş kazası oranının %10 olduğu görülmektedir.

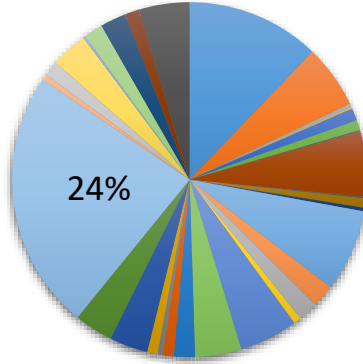
Tablo 3. İş kazası geçiren sigortalıların iş göremezlik sürelerine göre dağılımı NACE 24 (SGK, İstatistik Yıllıkları, 2023)

Ekonomik Faaliyet Sınıflaması (NACE)			İş Kazası Sayısı
24-Ana metal sanayii	1-Ana demir ve çelik ürünleri ile demir alaşımları imalatı	0-Ana demir ve çelik ürünleri ile demir alaşımları imalatı	7.644
	2-Çelikten tüpler, borular, içi boş profiller ve benzeri bağlantı parçalarının imalatı	0-Çelikten tüpler, borular, içi boş profiller ve benzeri bağlantı parçalarının imalatı	3.634
	3-Çeliğin ilk işlenmesinde elde edilen diğer ürünlerin imalatı	1-Barların soğuk çekilmesi	233
		2-Dar şeritlerin soğuk haddelenmesi	58
		3-Soğuk şekillendirme veya katlama	717
		4-Tellerin soğuk çekilmesi	575
	4-Değerli ana metaller ve diğer demir dışı metallerin imalatı	1-Değerli metal üretimi	53
		2-Alüminyum üretilmesi	3.756
		3-Kurşun, Çinko ve kalay üretimi	100
		4-Bakır üretilmesi	522
		5-Demir dışı diğer metallerin üretimi	199
		6-Nükleer yakıtların işlenmesi	2
	5-Metal döküm sanayii	1-Demir döküm	4.715
		2-Çelik dökümü	1.309
		3-Hafif metallerin dökümü	1.136
		4-Diğer demir dışı metallerin dökümü	430

Tablo 4. İş kazası geçiren sigortalıların iş göremezlik sürelerine göre dağılımı NACE 25 (SGK, İstatistik Yıllıkları, 2023)

Ekonomik Faaliyet Sınıflaması (NACE)			İş Kazası Sayısı
25-Makine ve teçhizat hariç. Fabrikasyon metal ürünleri imalatı	1-Metal yapı malzemeleri imalatı	1-Metal yapı ve yapı parçaları imalatı	3.350
		2-Metal kapı ve pencere imalatı	2.652
	2-Metal tank. Rezervuar ve muhafaza kapları imalatı	1-Merkezi ısıtma radyatörleri, Sıcak su kazanları (boyler) ve kombi imalatı	1.204
		9-Metalden diğer tank. Rezervuar ve büyük muhafaza kapları imalatı	623
	3-Buhar jeneratörü imalatı	0-Buhar jeneratörü imalatı	305
	4-Silah ve mühimmat (cephane) imalatı	0-Silah ve mühimmat (cephane) imalatı	585
	5-Metallerin dövülmesi, preslenmesi, baskılanması ve yuvarlanması	0-Metallerin dövülmesi, preslenmesi, baskılanması ve yuvarlanması, toz metalürjisi	2.210
		1-Metallerin işlenmesi ve kaplanması	2.203
	6-Metallerin işlenmesi ve kaplanması, makinede işleme	2-Metallerin makinede işlenmesi ve şekil verilmesi	14.856
		1-Çatal-bıçak takımı ve diğer kesici aletlerin imalatı	328
	7-Çatal-bıçak takımı ve diğer kesici aletler ile el aletleri ve genel hırdavat malzemeleri imalatı	2-Kilit ve menteşe imalatı	869
		3-El aletleri. Takım tezgâhları uçları.	2.094
		1-Çelik varil ve benzer muhafazaların imalatı	127
	9-Diğer fabrikasyon metal ürünlerin imalatı	2-Hafif metalden paketleme malzemeleri imalatı	1.102
		3-Tel ürünleri. Zincirler ve yayların imalatı	1.473
		4-Bağlantı malzemelerinin ve vida makinesi ürünlerinin imalatı	825
		9-Başka yerde sınıflandırılmamış diğer fabrikasyon metal ürünlerin imalatı	2.893

■ 2-Metallerin makinede işlenmesi ve şekil verilmesi



Şekil 4. NACE 24 (Ana Metal Sanayi) ve NACE 25 (Makine ve teçhizat hariç. fabrikasyon metal ürünleri imalatı) alt iş kolları oranları (2023 yılı)

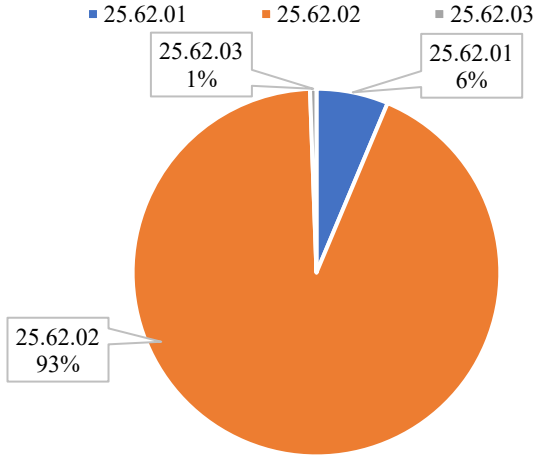
Şekil 4’ de NACE 24 (Ana Metal Sanayi) ve NACE 25 (Makine ve teçhizat hariç. Fabrikasyon metal ürünleri imalatı) iş kollarına ait 33 alt iş kolundan NACE kodu 25.62 olan “Metallerin makinede işlenmesi ve şekil verilmesi” alt iş kolunun %24 lük bir oranla oldukça yüksek bir iş kazası payına sahip olduğu görülmektedir. Sadece 2023 yılına ait olan bu oranın 2014-2023 yılları arasındaki diğer yıllarda da alt sektörler göre oldukça yüksek seyrettiği tespit edilmiştir.

Tablo 5. Metallerin makinede işlenmesi ve şekil verilmesi alt kolları

25.62	Metallerin makinede işlenmesi ve şekil verilmesi	
25.62.01	Lazer ışınlarının, CNC oksijen, CNC plazma, CNC su jeti vb. makinelerinin kullanılması yoluyla metallerin kesilmesi veya üzerlerinin yazılması	Tehlikeli
25.62.02	Metallerin makinede işlenmesi (torna tesfiye işleri, metal parçaları delme, tornalama, frezeleme, rendeleme, parlatma, oluk açma, perdahlama, birleştirme, kaynak yapma vb. faaliyetler)	Tehlikeli
25.62.03	Lazer ışınlarının kullanılması yoluyla metallerin kesilmesi veya üzerlerinin yazılması	Tehlikeli

Tablo 5'e bakıldığında; Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığının İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliğinin Ek-1'inde yer alan, İşyeri Tehlike Sınıfları Listesine ait NACE kodu 25.62 olan "Metallerin makinede işlenmesi ve şekil verilmesi" üç ayrı kola ayrılarak sınıflandırıldığı görülmektedir. 256201 kodlu "Lazer ışınlarının, CNC oksijen, CNC plazma, CNC su jeti vb. makinelerinin kullanılması yoluyla metallerin kesilmesi veya üzerlerinin yazılması" iş kolunda SGK' dan alınan veriler detaylı incelendiğinde 2014-2023 yılları arasında 6160 adet iş kazasının gerçekleştiği tespit edilmiştir. 256202 kodlu "Metallerin makinede işlenmesi (torna tesfiye işleri, metal parçaları delme, tornalama, frezeleme, rendeleme, parlatma, oluk açma, perdahlama, birleştirme, kaynak yapma vb. faaliyetler)" iş kolunda ise SGK' dan alınan veriler detaylı incelendiğinde 2014-2023 yılları arasında 90.643 adet iş kazasının gerçekleştiği tespit edilmiştir. 256203 kodlu "Lazer ışınlarının kullanılması yoluyla metallerin kesilmesi veya üzerlerinin yazılması" iş kolunda SGK' dan alınan veriler detaylı incelendiğinde 2014-2023 yılları arasında 548 adet iş kazasının gerçekleştiği tespit edilmiştir.

25.62.02 kodlu "Metallerin makinede işlenmesi (torna tesfiye işleri, metal parçaları delme, tornalama, frezeleme, rendeleme, parlatma, oluk açma, perdahlama, birleştirme, kaynak yapma vb. faaliyetler)" iş kolunda 2014-2023 yılları arasında 90.643 iş kazası gerçekleşmiş ve diğer iki alt koldaki iş kazalarına göre %93 lük bir payla oldukça yüksek bir orana sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 2014-2023 yılları arası 25.62 kodlu "Metallerin makede işlenmesi ve şekil verilmesi" alt kolları İş Kazası Oranları

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Türkiye'de metal, yapı ve maden sektörlerinde 2014-2023 yılları arasında meydana gelen iş kazalarının istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, metal sektöründe yaşanan iş kazalarının diğer sektörler (yapı ve maden) göre daha yüksek oranlarda gerçekleştiğini göstermekle birlikte, metal sektöründeki iş kazalarının ölümle sonuçlanması yapı ve maden sektörlerine göre daha düşük seviyelerdedir. Ölümlü iş kazalarının diğer sektörler göre daha düşük seyretmesi, metal sektöründeki iş sağlığı ve güvenliği (İSG) önlemlerinin göz ardı edildiği sonucunu göstermektedir. Nitekim, literatür değerlendirmesinde iş kazalarını önlemeye yönelik yapay zekâ tekniklerinin tüm sektörlerde kullanıldığı fakat metal sektöründe yeterli düzeyde yapay zekâ tabanlı çalışma yapılmadığı görülmüştür. Alan yazın taramaları; uzman sistemler, yapay sinir ağları (YSA), bulanık mantık ve sinirsel bulanık mantığın (ANFIS) kazaların öngörülmesi ve engellenmesi süreçlerinde son derece işlevsel yöntemler olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle metal sektöründe bu tekniklerin kullanılması, iş kazalarının sayısını azaltmak ve çalışanların güvenliğini artırmak için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Sonuç olarak, metal sektöründeki işletmelerde etkin ve objektif risk analizi yöntemlerinin kullanılması, mevcut istatistikler

doğrultusunda yapay zekâ tekniklerinin de dâhil edildiği kaza tahmin modellerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu stratejiler, İSG çalışmalarının etkinliğini artırarak, çalışanların güvenliğini korumaya yönelik önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adem, A., Dağdeviren, M., Çolak, A., & Kabak, M. (2016). Fuzzy prioritization approach for risks of wind turbine life cycle. *Procedia Computer Science*, 102, 406-413.
- Ahmed, H. K., & Zulquernain, M. (2009). Expert system to predict effects of noise pollution on operators of power plant using neuro-fuzzy approach. *Noise and Health*, 11(45), 206.
- Alli, B. (2008). Fundamental Principles of Occupational Health and Safety. (Second Edition). Geneva: International Labour Organization (ILO), 7.
- Amiri, M., Ardeshtir, A., & Zarandi, M. H. F. (2017). Fuzzy probabilistic expert system for occupational hazard assessment in construction. *Safety science*, 93, 16-28.
- Aras, F., Karakaş, E., & Biçen, Y. (2014). Fuzzy logic-based user interface design for risk assessment considering human factor: A case study for high-voltage cell. *Safety science*, 70, 387-396.
- Asawarungaengkul, K., Nanthavanij, S., & Chalidabhongse, J. (2007). Decision support system for designing effective noise hazard prevention strategies. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 13(4), 451-470.
- Ayanoğlu, C.C., & Kurt, M. (2019). Metal Sektöründe Veri Madenciliği Yöntemleri ile Bir İş Kazası Tahmin Modeli Önerisi. *Ergonomi*, 2(2), 78-87.
- Baron, P., Brázda, P., Dobránsky, J., & Kočiško, M. (2012). Expert system approach to safety management. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 44, 77-88.
- Cebi, S., Akyuz, E., & Sahin, Y. (2017). Developing web based decision support system for evaluation occupational risks at shipyards. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 68(1), 17-30.
- Chaudhari, S. (2016). Safety of Workers in Indian Mines: Study, Analysis and Prediction Shikha Vermaa, Research scholar, YCCE, RTMNU, Nagpur shikhaverma2108@ gmail.com.
- Cooke, T., Lingard, H., Blismas, N. ve Stranieri, A. (2008). ToolSHeDTM: inşaat tasarımında sağlık ve güvenlik için bir karar destek aracının

- geliştirilmesi ve değerlendirilmesi. *Mühendislik, İnşaat ve Mimari Yönetim*, 15 (4), 336-351.
- Debnath, J., Biswas, A., Sivan, P., Sen, K. N., & Sahu, S. (2016). Fuzzy inference model for assessing occupational risks in construction sites. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 55, 114-128.
- Draghici, A., & Draghici, G. (2013). Cross-disciplinary approach for the risk assessment ontology design. *Information Resources Management Journal (IRMJ)*, 26(1), 37-53.
- Fragiadakis, N. G., Tsoukalas, V. D., & Papazoglou, V. J. (2014). An adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) model for assessing occupational risk in the shipbuilding industry. *Safety Science*, 63, 226-235.
- Hadipriono, F. C. (1992). Expert system for construction safety. II: knowledge base. *Journal of performance of constructed facilities*, 6(4), 261-274.
- Halim, I., Arep, H., Kamat, S. R., Abdullah, R., Omar, A. R., & Ismail, A. R. (2014). Development of a decision support system for analysis and solutions of prolonged standing in the workplace. *Safety and health at work*, 5(2), 97-105.
- Imriyas, K., Pheng, L. S., & Lin, T. A. (2007). A decision support system for predicting accident risks in building projects. *Architectural science review*, 50(2), 149-162.
- İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği. (2012, 26 Aralık). *Resmi Gazete* (Sayı: 28509). Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/12/20121226-11.htm>.
- Janackovic, G. L., Savic, S. M., & Stankovic, M. S. (2013). Selection and ranking of occupational safety indicators based on fuzzy AHP: a case study in road construction companies: case study. *South African Journal of Industrial Engineering*, 24(3), 175-189
- Janicak, C. A. (1999). Developing programs with the knowledge-based safety training system. *Professional Safety*, 44(6), 34.
- Li, W., Liang, W., Zhang, L., & Tang, Q. (2015). Performance assessment system of health, safety and environment based on experts' weights and fuzzy comprehensive evaluation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 95-103.

- Lilić, N., Obradović, I., & Cvjetić, A. (2010). An intelligent hybrid system for surface coal mine safety analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(4), 453-462.
- Lin, L., Hu, P. J. H., & Sheng, O. R. L. (2006). A decision support system for lower back pain diagnosis: Uncertainty management and clinical evaluations. *Decision Support Systems*, 42(2), 1152-1169.
- Marciano, F., Cocca, P., Stefana, E., & Alberti, M. (2016). Selection of occupational health and safety management software using Analytic Hierarchy Process. *Proceedings of the Summer School Francesco Turco*, 13-15.
- Meciarova, J. (2011). Expert system for assessing health hazards of metalworking fluids. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 461-463.
- Mitea, A. C., Darabont, D., Cioca, M., & Popovici, I. (2012). Improving OHS activities at company level with decision support software. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(6), 1123-1128.
- Nunes, I. L. (2009). FAST ERGO_X—a tool for ergonomic auditing and work-related musculoskeletal disorders prevention. *Work*, 34(2), 133-148.
- Nussbaum, M. A., Shewchuk, J. P., Kim, S., Seol, H., & Guo, C. (2009). Development of a decision support system for residential construction using panellised walls: Approach and preliminary results. *Ergonomics*, 52(1), 87-103.
- Özfirat, P. M. (2014). Bulanık önceliklendirme metodu ve hata türü ve etkileri analizini birleştiren yeni bir risk analizi yöntemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 755-768.
- Padma, T., & Balasubramanie, P. (2011). Domain experts' knowledge-based intelligent decision support system in occupational shoulder and neck pain therapy. *Applied Soft Computing*, 11(2), 1762-1769.
- Samantra, C., Datta, S., & Mahapatra, S. S. (2017). A risk-based decision support framework for selection of appropriate safety measure system for underground coal mines. *International journal of injury control and safety promotion*, 24(1), 54-68.
- SGK İstatistik Yıllıkları, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/>.

- Shavarani, S. M., & Korhan, O. (2015). Expert system assessment of work-related musculoskeletal disorders for video display terminal users. *Applied Research in Quality of Life*, 10, 205-216.
- Stojiljkovic, E., Janackovic, G., Grozdanovic, M., Savic, S., & Zunjic, A. (2016). Development and application of a decision support system for human reliability assessment—a case study of an electric power company. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(4), 1581-1590.
- Talat Birgonul, M., Dikmen, I., Budayan, C., & Demirel, T. (2016). An expert system for the quantification of fault rates in construction fall accidents. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 22(1), 20-31.
- Tam, C. M., Tong, T. K., Chiu, G. C., & Fung, I. W. (2002). Non-structural fuzzy decision support system for evaluation of construction safety management system. *International Journal of Project Management*, 20(4), 303-313.
- Teimourikia, M., & Fugini, M. (2017). Ontology development for run-time safety management methodology in Smart Work Environments using ambient knowledge. *Future Generation Computer Systems*, 68, 428-441.
- Virkki-Hatakka, T., & Reniers, G. L. (2009). A case-based reasoning safety decision-support tool: Nextcase/safety. *Expert Systems with Applications*, 36(7), 10374-10380.
- Winn, G. L., Gopalakrishnan, B., Akladios, M., & Becker, P. E. (2002). Texpert: A tool for safety professionals & design engineers. *Professional Safety*, 47(10), 32.
- Womack, S. K., & Armstrong, T. J. (2005). Use of a computerized decision support system for primary and secondary prevention of work-related MSD disability. *Journal of occupational rehabilitation*, 15, 313-328.
- Wu, X., Liu, H., Zhang, L., Skibniewski, M. J., Deng, Q., & Teng, J. (2015). A dynamic Bayesian network based approach to safety decision support in tunnel construction. *Reliability Engineering & System Safety*, 134, 157-168.
- Zhu, Y. L. (2013). The construction safety accident emergency decision support system based on ontology and CBR. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 423, pp. 2149-2153). Trans Tech Publications Ltd.



ISBN: 978-625-378-465-2