

İş Sağlığı ve Güvenliğinde Yapay Zekâ Tabanlı Risk Analizi:

Bütünleşik Bir Mimari Yaklaşım Önerisi

Cemre Çınar¹, Saniye Yavuz²

Gönderilme Tarihi: 28 Nisan 2026

Kabul Tarihi: 9 Haziran 2026

Atıf | Citation: Çınar, C., & Yavuz, S. (2026). İş sağlığı ve güvenliğinde yapay zekâ tabanlı risk analizi: Bütünleşik bir mimari yaklaşım önerisi. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Dergisi, 4 (1). 122-145 gibi <https://doi.org/10.66643/btkdergi.1939549>

Araştırma Makalesi / Research Article

ÖZET

Bu çalışma, yapay zekâ tabanlı risk analizi yaklaşımlarının iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki konumunu literatür incelemesi (narrative literature review) ve kavramsal çerçeveye geliştirme yaklaşımının birlikte kullanıldığı iki aşamalı bir metodolojik yapı üzerinde inceleyerek mevcut bilgi birikimini sistematik biçimde haritalamaktadır. Ulusal ve uluslararası literatürden elde edilen bulgular, İSG uygulamalarında uzman sistemler, makine öğrenmesi modelleri ve IoT tabanlı sensör ağlarının giderek yaygınlaştığını; ancak açıklanabilirlik, veri yönetimi, model yaşam döngüsü yönetimi ve kurumsal uyum gerekliliklerinin çoğu çalışmada bütüncül biçimde ele alınmadığını göstermektedir. Bu eksiklikler doğrultusunda çalışma, literatürden türetilen bulguları sentezleyerek beş katmanlı yapısal bileşenden ve dört tasarım ilkesinden oluşan bütünleşik bir sistem mimarisi önermektedir. Önerilen mimari; veri toplama, veri işleme, analitik modelleme, karar destek ve kurumsal entegrasyon süreçlerini açıklanabilir yapay zekâ ve makine öğrenmesi operasyonları (Machine Learning Operations-MLOps) temelli yönetim ilkeleriyle bir araya getirerek İSG'de ölçeklenebilir, şeffaf ve denetlenebilir bir yapay zekâ entegrasyonu için metodolojik bir çerçeve sunmaktadır. Çalışma, mevcut yaklaşımlardaki teknik ve yönetsimsel sınırlılıkları netleştirirken hem araştırmacılar hem de uygulayıcı kurumlar için yapay zekâ destekli İSG sistemlerinin tasarımına yönelik bütüncül bir referans modeli ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Yapay Zekâ (YZ), İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG), IoT, XAI, Risk Analizi.*

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, cemrecinar91@gmail.com, ORCID: 0009-0004-1645-7133

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, saniyeyuksell@gmail.com, ORCID: 0009-0000-1488-0422

Artificial Intelligence (AI)-Based Risk Analysis in Occupational Health and Safety: An Integrated Architectural Approach Proposal

ABSTRACT

This study systematically maps the existing body of knowledge on artificial intelligence–based risk analysis approaches in the field of occupational health and safety (OHS) through a two-stage methodological design that integrates a narrative literature review with conceptual framework development. Findings derived from both national and international literature indicate that expert systems, machine learning models, and Internet of Things (IoT)–based sensor networks are increasingly adopted in OHS applications. However, critical dimensions such as explainability, data governance, model lifecycle management, and organizational compliance are not addressed holistically in the majority of existing studies. In response to these gaps, the study synthesizes the literature and proposes an integrated system architecture consisting of five structural layers and four design principles. The proposed architecture combines data collection, data processing, analytical modeling, decision support, and organizational integration processes within a governance framework grounded in Explainable Artificial Intelligence (XAI) and Machine Learning Operations (MLOps). In doing so, it provides a methodological foundation for scalable, transparent, and auditable AI integration in OHS contexts. By clarifying both the technical and governance-related limitations of current approaches, the study offers a comprehensive reference model for the design and implementation of AI-supported OHS systems, addressing the needs of both researchers and practitioners.

Keywords: *Artificial Intelligence (AI), Occupational Health and Safety (OHS), Internet of Things (IoT), Explainable AI (XAI), Risk Analysis.*

GİRİŞ

Küresel ölçekte iş sağlığı ve güvenliği (İSG), yalnızca çalışma yaşamının niteliğini değil, aynı zamanda ulusal ekonomilerin sürdürülebilirliğini de doğrudan etkileyen temel bir politika alanı olarak öne çıkmaktadır. Dünya genelinde işle ilişkili hastalıklar ve iş kazaları, her yıl milyonlarca çalışanın yaşamını yitirmesine ve ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır (WHO & ILO, 2021). Bu tablo, geleneksel risk faktörlerinin yanı sıra, risklerin zamanında tespit edilememesi ve önleyici mekanizmaların yetersizliğinin de önemli bir belirleyici olduğunu göstermektedir. Nitekim güncel raporlar, çalışma saatleri, ergonomik maruziyetler ve gürültü gibi çevresel risklerin küresel hastalık yüküne sistematik biçimde yansıdığını ortaya koymaktadır (WHO & ILO, 2021).

Dördüncü Sanayi Devrimi ile birlikte yapay zekâ (YZ), Makine Öğrenmesi (Machine Learning-ML), derin öğrenme (DL), Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) ve giyilebilir teknolojiler gibi dijital bileşenlerin üretim süreçlerine entegrasyonu, İSG alanında da yapısal bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. Yapay zekâ destekli çözümlerin iş kazalarının önlenmesi, meslek hastalıklarının erken tespiti ve gerçek zamanlı risk yönetimi açısından önemli olanaklar sunduğu, buna karşılık veri güvenliği, algoritmik şeffaflık ve etik sorumluluk gibi yeni tartışma alanlarını da gündeme taşıdığı vurgulanmaktadır (Shah & Mishra, 2024; El-Helaly, 2024). Bu çerçeveden bakıldığında literatürde, YZ tabanlı uygulamaların İSG'nin geleneksel “reaktif” yapısını aşarak “proaktif” ve öngörüye dayalı bir risk yönetimi anlayışına geçişi mümkün kıldığı, ancak ampirik kanıtların sektörler ve ülkeler arasında heterojen bir dağılım gösterdiği ifade edilmektedir (Park & Kang, 2024).

Literatürde yapay zekâ destekli İSG uygulamalarının üç temel teknoloji ekseninde yoğunlaştığı görülmektedir: (i) Uzman sistemler (Expert Systems) ve bilgi tabanlı karar destek sistemleri, (ii) makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı risk tahmin ve sınıflandırma modelleri, (iii) IoT ve giyilebilir sensör ağlarına dayalı gerçek zamanlı izleme altyapıları. Yapay zekânın meslek hastalıkları ve iş kazalarının erken öngörüsünde tanınal doğruluğu ve müdahale hızını artırdığı, özellikle çok değişkenli veri setleri üzerinde eğitilen ML modellerinin risk analizi süreçlerine güçlü bir öngörü kapasitesi kazandırdığı belirtilmektedir (Shah & Mishra, 2024; Vivian vd., 2025). Bu bulgular, klasik istatistiksel yöntemlerin ötesine geçen veri yoğun ve dinamik yaklaşımların İSG risk analizinde giderek merkezi bir rol üstlendiğini göstermektedir.

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme uygulamalarının sahadaki karşılığı özellikle görüntü işleme temelli risk tespit sistemlerinde belirginleşmektedir. Türkiye’de gerçekleştirilen çalışmalar, kişisel koruyucu donanım kullanımının denetlenmesi, tehlikeli davranışların otomatik olarak tespiti ve riskli durumların gerçek zamanlı izlenmesi amacıyla geliştirilen derin öğrenme tabanlı modellerin yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını ortaya koymaktadır (Aslan & Yağımlı, 2023). Benzer biçimde, sektörel iş kazası verileri üzerinde geliştirilen yapay sinir ağı tabanlı modellerin, özellikle yüksek riskli sektörlerde (inşaat, madencilik vb.) kaza olasılığının öngörülmesinde karar vericilere önemli katkılar sunduğu belirtilmektedir (Ayan vd., 2024). Bununla birlikte, bu tür modellerin veri kalitesi, model genellenabilirliği ve sahadaki uygulama koşulları açısından dikkatli metodolojik tasarımlar gerektirdiği de vurgulanmaktadır (Ayan vd., 2024).

Nesnelerin interneti ve giyilebilir teknolojilere dayalı yaklaşımlar ise İSG alanında “Güvenlik 4.0” olarak nitelendirilen yeni bir izleme ve yönetim paradigmasının gelişmesine zemin hazırlamaktadır. IoT tabanlı sensör ağları sayesinde sıcaklık, gürültü, gaz konsantrasyonu ve titreşim gibi çevresel parametreler sürekli izlenebilmekte; çalışanların konum ve hareket verileri üzerinden dinamik risk haritaları üretilebilmektedir (Erol & Eraslan, 2024). Ancak bu teknolojilerin İSG amaçlı kullanımının, mahremiyet, gözetim, veri sahipliği ve algoritmik şeffaflık bağlamlarında önemli etik ve hukuki sorunları da beraberinde getirdiği belirtilmektedir (El-Bouchikhi vd., 2024). Bu durum, YZ ve IoT tabanlı çözümlerin yalnızca teknik etkinlik değil, aynı zamanda güçlü bir veri yönetimi ve etik çerçeve ile birlikte ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Türkçe literatürde YZ ve dijital teknolojilerin İSG alanına yansımalarını inceleyen çalışmaların sayısında son yıllarda belirgin bir artış gözlenmektedir. Türkiye’de yapılan çalışmalarda, uzman sistemlerden büyük veri analitiğine kadar uzanan geniş bir teknoloji yelpazesinin İSG uygulamalarında kullanılmaya başlandığı ve bu dönüşümün ulusal politikalar açısından stratejik bir önem taşıdığı vurgulanmaktadır (Ayan vd., 2024). Bununla birlikte mevcut ulusal literatürün, uzman sistemler, makine öğrenmesi ve IoT entegrasyonunu özellikle bütünleşik bir “risk analizi mimarisi” çerçevesinde ele alan çalışmalar açısından hâlen sınırlı olduğu görülmektedir (Erol & Eraslan, 2024; Aslan & Yağımlı, 2023).

İSG'nin teknolojik boyutunun yanı sıra örgütsel ve kültürel boyutu da dijital çözümlerin etkinliğini belirleyen kritik bir unsurdur. İş sağlığı ve güvenliği kültürünün ölçülmesine yönelik geliştirilen ölçekler, yönetim taahhüdü, çalışan algısı ve örgütsel iklim gibi faktörlerin güvenlik performansı ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır (Olçay, 2021). Bu bağlamda, YZ destekli risk analizi sistemlerinin güvenlik kültürü ile bütünleştirilmemesi durumunda, teknoloji odaklı fakat sosyo-teknik bağlamı eksik çözümler üretme riski ortaya çıkmaktadır (Olçay, 2021; WHO & ILO, 2021).

Bu çerçevede bu çalışma, uzman sistemler, makine öğrenmesi ve IoT entegrasyonuna dayalı yapay zekâ destekli risk analizi yaklaşımlarını hem uluslararası literatür hem de Türkiye bağlamı üzerinden sistematik olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, bu üç teknolojik düzlemin İSG risk analizi süreçlerinde nasıl bütünleştirilebileceği, hangi teknik ve kurumsal sınırlılıkları barındırdığı ve etik-hukuki yönetim açısından ne tür gereklilikler ortaya çıkardığı tartışılmaktadır. Böylece Türkiye'de İSG'nin dijital dönüşümüne yönelik denetlenabilir, sürdürülebilir ve standartlarla uyumlu bir çerçeveye kavramsal katkı sunulması hedeflenmektedir.

2. YÖNTEM

Bu çalışma, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında yapay zekâ temelli uygulamaların mevcut durumunu bütüncül bir perspektifle değerlendirmek ve bu doğrultuda bütünlük bir sistem mimarisi önermek amacıyla nitel bir literatür incelemesi yaklaşımını benimsemektedir. Araştırma süreci, anlatı temelli literatür incelemesi (narrative literature review) ile kavramsal çerçeve geliştirme yaklaşımının birlikte kullanıldığı iki aşamalı bir metodolojik yapı üzerine kurgulanmıştır.

İlk aşamada, iş sağlığı ve güvenliği, yapay zekâ, makine öğrenmesi, açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence – XAI) ve nesnelerin interneti (Internet of Things – IoT) alanlarında yayımlanmış ulusal ve uluslararası çalışmalar kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Bu kapsamda literatür taraması; Web of Science, Scopus, IEEE Xplore ve Google Scholar veri tabanları üzerinden yürütülmüş, tarama sürecinde “occupational health and safety”, “artificial intelligence”, “machine learning”, “explainable AI”, “XAI”, “Internet of Things”, “IoT” ve “smart safety systems” gibi anahtar kelimeler tekil ve kombinasyonlar halinde kullanılmıştır. İnceleme sürecinde çalışmaların güncelli-

ği, araştırma konusu ile doğrudan ilişkisi ve uygulamaya dönük potansiyeli temel seçim kriterleri olarak esas alınmıştır.

İkinci aşamada, elde edilen bulgular tematik analiz yöntemiyle değerlendirilmiş; literatürde çoğunlukla birbirinden bağımsız ele alınan teknolojik bileşenler (uzman sistemler, makine öğrenmesi modelleri ve IoT altyapıları) kavramsal düzeyde bütünleştirilmiştir. Bu sentez süreci, literatürde önerilen mimari yaklaşımlar ve açıklanabilirlik gereksinimleri dikkate alınarak yürütülmüş ve sonuçta iki katmanlı bir sistem mimarisi önerisi geliştirilmiştir.

Benimsenen bu metodolojik yaklaşım, özellikle çok disiplinli ve karmaşık araştırma alanlarında teori geliştirme ve kavramsal model oluşturma çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, katı sistematik inceleme protokollerinin ötesine geçerek daha esnek ancak analitik temelleri güçlü bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır (Peters vd., 2020). Ayrıca, kullanılan veri tabanları ve anahtar kelimeler literatür kapsamını sınırlandırabileceğinden, elde edilen bulguların alanın tamamını temsil etme düzeyi bu çerçevede değerlendirilmelidir.

3. LİTERATÜR İNCELEMESİ

3.1. Uzman Sistemler

Uzman sistemler, belirli bir problem alanında insan uzmanların karar verme süreçlerini kural tabanlı bir bilgi tabanı ve çıkarım mekanizması aracılığıyla modelleyen yapay zekâ uygulamaları olarak tanımlanmaktadır (İçen & Günay, 2014). Bilgi tabanı, alan uzmanlarından türetilen kurallar ve olguların yapılandırılmış biçimde temsilini içerirken, çıkarım mekanizması bu kurallar ile yeni sonuçlara ulaşarak kullanıcılara açıklanabilir karar destek çıktıları üretmektedir (Azadeh vd., 2008). Böylece uzman sistemler, özellikle belirsizlik içeren, çok değişkenli ve uzman bilgisine yoğun biçimde ihtiyaç duyulan alanlarda risk analizi ve karar destek fonksiyonlarının sistematik, tutarlı ve tekrar edilebilir biçimde yürütülmesini mümkün kılmaktadır (Hadjimichael, 2009).

İş sağlığı ve güvenliği (İSG) bağlamında uzman sistemlerin temel avantajı, dağınık ve çoğu zaman örtük durumda bulunan uzman bilgisini yapılandırılmış bir bilgi tabanına dönüştürerek sahadaki uygulayıcıların erişimine açmasıdır (Azadeh vd., 2008). Örneğin, sağlık, güvenlik, çevre ve ergonomi

göstergelerini birlikte ele alan bulanık uzman sistem tasarımlarında; proses parametreleri, maruziyet düzeyleri ve ergonomik risk faktörleri dilsel değişkenlerle ifade edilmekte, bu değişkenler bulanık kümeler ve kural tabanları üzerinden bütüncül bir performans ve risk değerlendirmesine dönüştürülmektedir (Azadeh vd., 2008). Benzer biçimde, ergonomik risklerin değerlendirilmesi için geliştirilen uzman sistemlerde, kas-iskelet sistemi bozukluklarına ilişkin semptomlar, iş istasyonu özellikleri ve organizasyonel faktörler aynı bilgi tabanı içinde bütünleştirilerek işçilerin risk profili hakkında nicel çıktı üretilmekte ve önleyici öneriler sunulmaktadır (Pavlovic vd., 2016).

Uzman sistemlerin risk analizi süreçlerine katkısı, özellikle belirsizliğin yüksek olduğu alanlarda daha belirgin hale gelmektedir. Havacılık gibi yüksek riskli sektörlerde geliştirilen bulanık uzman sistemler, çok sayıda risk faktörünü ve bu faktörler arasındaki etkileşimleri modelleyerek operasyonel risk düzeyini nicel bir risk endeksine dönüştürmekte, böylece insan yargısını tamamlayan sistematik bir risk değerlendirme çerçevesi sağlamaktadır (Hadjimichael, 2009). Benzer şekilde, kömür madenciliği gibi kompleks ve çok boyutlu tehlike profiline sahip çalışma ortamlarında, uzman sistemler ve yapay sinir ağlarını birleştiren hibrit yaklaşımlarla gaz, toz, iklim koşulları, titreşim ve jeoteknik göstergeler gibi çok sayıda parametre tek bir güvenlik durum değerlendirmesine indirgenebilmekte; bu sayede maden ortamının genel güvenlik düzeyi ve tehlike kategorisi bütüncül biçimde izlenebilmektedir (Lilić vd., 2010).

İş sağlığı ve güvenliği performansının değerlendirilmesine yönelik çalışmalarda da uzman sistem mantığının, özellikle bulanık mantıkla birleştiğinde, belirsizlikleri yönetme ve nitel değerlendirilebilir bilgiyi nicel skorlara dönüştürme kapasitesi nedeniyle sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Farklı endüstrilerde güvenlik performansının bulanık yaklaşımla değerlendirilmesi, kaza sıklığı, şiddeti, eğitim düzeyi, yönetim taahhüdü ve davranışsal göstergeler gibi çok sayıda kriterin uzman görüşüne dayalı olarak ağırlıklandırılmasını ve tek bir güvenlik performans endeksinde birleştirilmesini mümkün kılmıştır (Berihä vd., 2012). Bu tür çalışmalar, uzman sistemlerin yalnızca tehlike ve risk düzeylerini sınıflamakla kalmayıp, aynı zamanda iyileştirme önceliklerinin belirlenmesinde de etkin bir karar destek aracı olduğunu ortaya koymaktadır (Azadeh vd., 2008).

Türkiye bağlamında bakıldığında, uzman sistemler ve yapay zekâ tabanlı karar destek yaklaşımlarının İSG alanında giderek daha görünür hale geldiği görülmektedir. Uzman sistem kavramını istatistiksel yöntemlerle birlikte ele alan çalışmalar, kural tabanlı sistemlerin veri analitiği ve istatistikle entegrasyonunun, karar süreçlerinin hem şeffaflığını hem de öngörü gücünü artırdığını vurgulamaktadır (İçen & Günay, 2014). Yapay zekâ teknolojilerinin İSG alanındaki kullanımını inceleyen güncel derleme çalışmaları ise uzman sistemleri, makine öğrenmesi ve diğer yapay zekâ teknikleriyle birlikte “akıllı İSG çözümleri” ekosisteminin temel bileşenlerinden biri olarak konumlandırmakta, bu sistemlerin özellikle risk analizi, kaza tahmini ve tehlike sınıflandırma süreçlerinde önemli rol oynadığını göstermektedir (Ayan vd., 2024). Sektörel iş kazalarının yapay zekâ teknolojileri ve uzman sistem uygulamaları perspektifinden incelendiği çalışmalar, uzman sistemlerin maden, inşaat, metal gibi yüksek riskli sektörlerde kaza örüntülerinin belirlenmesi ve risk azaltıcı stratejilerin geliştirilmesinde tamamlayıcı bir araç olarak kullanıldığını ortaya koymaktadır (Şengöz & Bozkurt, 2025).

Mevcut literatür, uzman sistemlerin İSG’de iki düzeyde kritik işlev gördüğünü göstermektedir:

- i. Risk faktörlerinin tanımlanması, sınıflandırılması ve görelî önemlerinin belirlenmesini sağlamak,
- ii. Saha uygulayıcılarına, politika yapıcılara ve yöneticilere yönelik açıklanabilir, izlenebilir ve standardize edilmiş karar destek çıktıları üretmek.

Bununla birlikte, mevcut çalışmaların önemli bir kısmı, uzman sistemleri çoğunlukla kural tabanlı ve tekil sistemler olarak ele almakta; makine öğrenmesi algoritmaları ve gerçek zamanlı IoT sensör verileriyle tam entegre, dinamik ve kendini güncelleyebilen uzman sistem örnekleri görece sınırlı kalmaktadır (Ayan vd., 2024; Şengöz & Bozkurt, 2025). Bu durum, özellikle iş sağlığı ve güvenliğinde yapay zekâ destekli risk analizi için uzman sistemlerin, makine öğrenmesi ve IoT altyapılarıyla bütünleşik yeni nesil hibrit mimariler çerçevesinde yeniden düşünülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.2. Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi (ML), karmaşık ve çok değişkenli iş sağlığı ve güvenliği (İSG) verilerinde örüntü tanıma ve öngörü üretme kapasitesi nedeniyle geleneksel risk analiz yaklaşımlarına önemli bir alternatif sunmaktadır. İş kazalarının çoğu doğrusal olmayan, çok faktörlü ve yüksek belirsizlik içeren süreçlerden kaynaklandığı için ML modelleri—özellikle karar ağaçları, rastgele ormanlar ve yapay sinir ağları—klasik istatistiksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşabilmektedir (Vivian vd., 2025).

Literatürde ML'nin, erken uyarı sistemleri, kaza olasılığı tahmini, davranış temelli güvenlik ve maruziyet analizinde etkin şekilde kullanıldığı, bu kullanımın İSG'nin reaktif yapısını daha proaktif bir risk yönetimi anlayışına dönüştürdüğü vurgulanmaktadır (Shah & Mishra, 2024). Türkiye'de yapılan çalışmalar da bu eğilimi doğrulamakta, örneğin derin öğrenme temelli görüntü işleme modelleriyle kişisel koruyucu donanım kullanımının otomatik tespit edildiği ve denetim süreçlerinde önemli ölçüde doğruluk artışı sağlandığı gözlemlenmektedir (Aslan & Yağımlı, 2023). Bununla beraber inşaat gibi yüksek riskli sektörlerde geliştirilen ML tabanlı kaza tahmin modelleri, özellikle dalgacık (wavelet) dönüşümü ile hibritleştirildiğinde, sınırlı veri setlerinde dahi anlamlı öngörü performansı sergilemektedir (Koç vd., 2022).

Literatürden elde edilen bulgular, ML'nin İSG risk analizinde güçlü bir bileşen olmakla birlikte, tek başına yeterli olmadığını; sensör verileri, uzman sistemler ve IoT altyapılarıyla bütünleşik hibrit mimariler içinde daha etkili sonuçlar ürettiğini göstermektedir (Ayan vd., 2024).

3.3. IoT ve Sensör Tabanlı Sistemler

Nesnelerin interneti (IoT), iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında risklerin gerçek zamanlı ve sürekli izlenmesine olanak tanıyan önemli bir bileşen hâline gelmiştir. IoT tabanlı sensör ağları; sıcaklık, gaz yoğunluğu, titreşim, gürültü, ergonomik duruş, konum ve hareket gibi kritik çalışma ortamı göstergelerini anlık olarak toplayarak risk değerlendirme süreçlerini büyük ölçüde dönüştürmektedir (Park & Kang, 2024). Bu dönüşüm, İSG'de geleneksel olarak dönemsel gözlem ve manuel raporlamaya dayanan veri toplama süreçlerinin yerini, sürekli ve veri odaklı bir izleme yaklaşımına bırakması açısından önemlidir.

Giyilebilir sensörler, çalışanların fizyolojik durumunu ve ergonomik risk faktörlerini izleyerek özellikle kas-iskelet sistemi bozuklukları, yorgunluk, ısı stresi ve tehlikeli hareketler gibi olayların erken tespit edilmesini kolaylaştırmaktadır. Çalışanların duruş, hareket, ivme ve titreşim gibi verilerini işleyen bu sistemlerde, sensör verileri genellikle makine öğrenmesi algoritmalarıyla birleştirilerek davranışsal risklerin sınıflandırılması ve gerçek zamanlı uyarı oluşturulması mümkün olmaktadır (El-Helaly, 2024). Bu yapı, ergonomik risklerin yalnızca periyodik gözlemle değil, sürekli veri akışıyla yönetilebilmesini sağlamaktadır. IoT tabanlı izleme sistemlerinin bir diğer güçlü yönü, tehlike tespiti ve acil durum yönetimi süreçlerindeki katkısıdır. Endüstriyel tesislerde gaz sızıntısı, sıcaklık artışı veya ekipman arızası gibi olaylar, dağıtık sensör ağları sayesinde erken aşamada fark edilebilmekte ve bu durum operasyonel güvenliğe doğrudan etki etmektedir (Erol & Eraslan, 2024). Benzer şekilde, yüksek riskli sektörlerde çalışanların konum takibi, kapalı alanlarda varlık doğrulama veya çarpışma risklerinin izlenmesi gibi uygulamalarda IoT sistemlerinin önemli performans kazançları sağladığı bilinmektedir (Ayan vd., 2024). Bununla birlikte IoT tabanlı İSG uygulamalarında mahremiyet, veri güvenliği ve gözetim temelli etik kaygılar belirgin biçimde öne çıkmaktadır. Özellikle çalışan davranışlarının sürekli izlenmesine dayalı sistemlerde veri sahipliği, şeffaflık, açık rıza ve veri minimizasyonu gibi ilkelerin teknik tasarımın ayrılmaz bir parçası olması gerektiği vurgulanmaktadır (El-Bouchikhi vd., 2024). Bu açıdan bakıldığında, IoT çözümlerinin yalnızca sensör performansı bakımından değil, aynı zamanda yönetim ve etik çerçevelerle uyumlu bir şekilde tasarlanması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde ise IoT çözümleri, İSG'de veri üretimini hızlandıran, risk tespitini otomatikleştiren ve iş kazası oluşmadan önce tehlikeleri görünür kılan güçlü bir bileşendir. Ancak bu teknolojilerin en etkili biçimde çalışabilmesi; makine öğrenmesi modelleri, uzman sistemler ve açıklanabilir yapay zekâ teknikleri ile bütünleşik şekilde kullanıldığında mümkün olmaktadır. Bu nedenle IoT, İSG'de dijital dönüşümün yalnızca donanım boyutunu değil; aynı zamanda bütünsel bir risk analizi mimarisinin temel bileşenlerinden birini temsil etmektedir.

3.4. Hibrit Sistemler: Uzman Sistem + Makine Öğrenmesi + IoT Entegrasyonu

Yapay zekâ tabanlı İSG uygulamalarında son dönemde öne çıkan temel eğilim, tekil teknolojilerin yapısal sınırlılıklarını aşmayı hedefleyen hibrit mimarilerin geliştirilmesidir. Uzman sistemler, kural temelli ve açıklanabilir karar mekanizmaları sunmalarına karşın öğrenme yeteneğinden yoksundur; makine öğrenmesi modelleri yüksek öngörü doğruluğu sağlasa da yorumlanabilirlik ve geniş veri gereksinimi açısından kısıtlar taşır. IoT tabanlı sensör ağları ise çalışma ortamına ilişkin sürekli ve ayrıntılı veri üretmekle birlikte, bu ham verinin tek başına anlamlı bir risk göstergesine dönüşmesi mümkün değildir. Bu nedenle literatürde giderek artan biçimde, İSG alanında uzman sistemler, makine öğrenmesi ve IoT altyapılarını bütünleştiren hibrit yaklaşımların hem teknik etkililik hem de operasyonel uygulanabilirlik açısından en güçlü çözüm çerçevesini sunduğu kabul edilmektedir (Ayan vd., 2024). Türkçe literatürde, hibrit yapılar özellikle yüksek riskli sektörlerde dikkat çekmektedir. Örneğin, inşaat ve maden sektörlerinde yapılan çalışmalarda sensör verileri, bulanık mantık kuralları ve makine öğrenmesi algoritmalarının bir arada kullanıldığı, tehlikeli gaz seviyeleri, ekipman titreşimleri, duruş bozuklukları ve personel konum verilerinin tek bir güvenlik durumu skoruna dönüştürüldüğü hibrit yapılar geliştirilmiştir (Şengöz & Bozkurt, 2025). Bu mimariler, tekil modellere kıyasla hem daha yüksek doğruluk hem de daha açıklanabilir karar çıktıları sunmakta ve sahadaki denetim süreçlerini hızlandırmaktadır. Uluslararası literatürde hibrit sistemlerin öne çıkmasının temel nedenlerinden biri, öğrenebilen fakat açıklanabilir, sürekli veri toplayan fakat yorumlanabilir, kurala dayalı fakat adaptif bir güvenlik yönetimi ihtiyacının ön plana çıkmış olmasıdır. Örneğin, IoT sensörleri tarafından toplanan duruş, sıcaklık, gaz ve hızlanma verilerinin makine öğrenmesi algoritmalarıyla işlenmesi, ardından uzman sistemi kural tabanının bu çıktıları sınıflandırması hem gerçek zamanlı risk tahmini hem de açıklanabilir karar desteği sağlamaktadır (Park & Kang, 2024). Bu bütünsel yapı, İSG uygulamalarında “erken uyarı sistemlerinin” doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktadır.

Sensör verisinin sahadan anlık ve nesnel bilgi sağlaması, uzman sistemlerin “neden-sonuç” açıklamalarıyla birleştğinde, yöneticilerin eğitim, planlama ve anlık müdahale kararlarında daha etkin bir altyapı sunmaktadır (İçen & Günay, 2014). Bu nedenle hibrit sistemler gerek operasyonel süreçler ge-

rekse mevzuat uyum süreçlerinde İSG profesyonellerine yeni bir karar destek paradigması kazandırmaktadır.

Hibrit sistemlerin güçlü yönlerine rağmen literatürde karşılaşılan zorluklar arasında; farklı kaynaklardan gelen çok türde verinin entegrasyonu, veri kalitesi ve standardizasyon sorunları, gerçek zamanlı işlem yükü ve mahremiyet gereklilikleri yer almaktadır (El-Bouchikhi vd., 2024). Ayrıca hibrit mimarilerin saha uygulamalarında başarıya ulaşabilmesi için kurumların hem dijital altyapı kapasitesinin hem de veri yönetişimi süreçlerinin güçlü olması gerekmektedir (Ayan vd., 2024). Genel bir değerlendirme yapıldığında, hibrit sistemlerin, tehlikelerin erken tespiti, kaza tahmini, maruziyet izleme, ergonomik değerlendirme ve davranış analizi gibi birçok alt alanı tek bir çatı altında birleştirerek, tek bir teknolojiyle çözülemeyen karmaşık İSG sorunlarına yönelik bütünleşik bir yaklaşım sunduğu görülmektedir. Bu nedenle hibrit mimariler, İSG'nin dijital evriminde belirleyici ve uzun vadede merkezî bir rol üstleneceği öngörülmektedir.

3.5. Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI)

İş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında yapay zekâ (YZ) tabanlı modellerin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu modellerin karar verme süreçlerinin şeffaf, izlenebilir ve gerekçelendirilebilir olması giderek daha kritik hâle gelmiştir. Derin öğrenme gibi yüksek karmaşıklığa sahip algoritmaların çoğu durumda “kara kutu” niteliği taşıması, özellikle insan hayatı ve çalışma koşullarına doğrudan etki eden güvenlik-kritik uygulamalarda önemli metodolojik ve etik sorunlar doğurmaktadır (Adadi & Berrada, 2018). Bu nedenle Açıklanabilir Yapay Zekâ (Explainable AI – XAI), YZ modellerinin içsel mantığını görünür kılmayı ve karar çıktılarını insan tarafından anlaşılabilir biçimde sunmayı hedefleyen tamamlayıcı bir yöntemler bütünü olarak ön plana çıkmıştır.

XAI, yalnızca model çıktılarının nedenlerini açıklamakla kalmaz; aynı zamanda sorumlu ve güvenilir YZ uygulamaları için gerekli şeffaflık, denetlenebilirlik, etik uyum ve hesap verebilirlik boyutlarını da güçlendirir (Barredo vd., 2020). İSG bağlamında bu gereklilik daha da belirgindir, zira çalışan güvenliğini etkileyen kararların belirsiz algoritmik çıktılarla açıklanması hem kabul edilebilirlik hem de hukuki uygunluk açısından risk yaratabilmektedir. Bu nedenle XAI, model tahminlerinin hangi özellikler tarafından yönlendirildiğini, hangi örüntülerin risk sınıflandırmasına yol açtığını ve hangi girdi-

lerin karar ağırlığını belirlediğini somut biçimde ortaya koyarak İSG profesyonellerinin karar süreçlerini daha öngörülebilir kılmaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar XAI yaklaşımlarının özellikle yüksek riskli sektörlerde iş güvenliğini destekleyen bir karar mekanizması olarak başarıyla uygulandığını göstermektedir. Ormancılık gibi yüksek tehlike içeren sektörlerde yapılan çalışmalar, XAI'nin hem yüksek doğruluklu risk tahmini sağladığını hem de modelin dayandığı kanıt kullanıcıya açıklayarak kararların meşruiyetini artırdığını ortaya koymaktadır (Hoenigsberger vd., 2024). Bu durum, XAI'nin yalnızca teknik bir araç değil; aynı zamanda makine öğrenmesi modellerinin iş güvenliği bağlamında etik ve operasyonel olarak kabul edilebilir hâle gelmesini sağlayan bir yönetim unsuru olduğunu göstermektedir.

XAI literatüründe sıkça vurgulanan bir diğer boyut ise, açıklanabilirliğin yalnızca model çıktısına yönelik bir ek açıklama değil, aynı zamanda model geliştirme, doğrulama ve uygulanma süreçlerinin tamamını etkileyen bütünsel bir yaklaşım olmasıdır (Kabir vd., 2025). Bu bütünsel yaklaşım, özellikle hibrit İSG mimarilerinde daha da önem kazanmaktadır. Zira verilerin sensör ağlarından gerçek zamanlı olarak aktığı, modellerin öngörü ürettiği ve uzman sistemlerin karar kuralı oluşturduğu çok katmanlı yapılarda, açıklanabilirlik hem teknik uyumu hem de kullanıcı güvenini doğrudan belirlemektedir.

Bu çerçevede XAI, İSG'de giderek daha fazla benimsenen yapay zekâ uygulamalarının sorumlu, güvenli ve izlenebilir biçimde hayata geçirilmesi için temel bir bileşen niteliği taşımaktadır. Hem algoritmik şeffaflığı artırması hem de kullanıcıların model kararlarını sorgulayabilmesine olanak tanınması sayesinde XAI, İSG'nin dijital dönüşümünde yalnızca yardımcı bir teknik değil, aynı zamanda karar destek ekosisteminin vazgeçilmez bir metodolojik unsuru hâline gelmiştir.

3.6. Mevzuat, Standartlar ve Kurumsal Uyum

İş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında yapay zekâ, makine öğrenmesi ve IoT tabanlı teknolojilerin kullanımının artması, yalnızca teknik yenilikleri değil, aynı zamanda mevzuat, standartlar ve kurumsal yönetim açısından yeni sorumluluklar ve düzenlemeler gerektiren kapsamlı bir dönüşümü beraberinde getirmektedir. YZ tabanlı karar destek sistemlerinin işyerlerinde kullanılması, verinin toplanma biçiminden işleme sürecinin etik niteliğine, algoritmik çık-

tının doğrulanmasından kurumsal denetim süreçlerine kadar pek çok alanın düzenleyici çerçeve ile uyumlu olmasını zorunlu kılmaktadır (El-Bouchikhi vd., 2024). Özellikle çalışan verilerinin sensör ağları ve giyilebilir teknolojiler üzerinden sürekli olarak izlenmesi, mahremiyet, veri minimizasyonu ve açığa rıza gibi yükümlülükleri kurumlar için kaçınılmaz hâle getirmektedir.

Bu bağlamda uluslararası standartlar, YZ kullanımının yalnızca teknik değil, yönetişimsel boyutlarını da şekillendiren önemli referans noktalarıdır. Yapay zekâya ilişkin temel kavram ve terminolojiyi tanımlayan ISO/IEC 22989 ile YZ sistemlerinin yaşam döngüsüne ilişkin süreçleri düzenleyen ISO/IEC 23053, güvenilirlik, izlenebilirlik ve doğrulanabilirlik ilkelerinin hem tasarım hem de operasyon aşamalarında geçerli kılınmasını şart koşmaktadır. Benzer şekilde ISO 45001 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi standardı, tehlike tanımlama ve risk değerlendirme süreçlerinin sistematik ve süreklilik arz eden bir yaklaşımla yürütülmesini zorunlu kılmakta, YZ ve IoT tabanlı çözümler bu gereklilikleri daha nesnel, kanıta dayalı ve gerçek zamanlı veri akışıyla destekleyen araçlar olarak konumlanmaktadır (Erol & Eraslan, 2024). Bununla birlikte bu sistemlerin uygulanması, model çıktılarının doğrulanması, algoritmik kararların denetlenebilir hâle getirilmesi ve modelin kurumsal risk yönetişimi süreçleriyle uyumlu biçimde bütünleştirilmesi gibi ek uyum mekanizmalarını gerektirmektedir.

Açıklanabilir yapay zekâ (XAI), bu mevzuat ve standartlar evreninin merkezinde yer almaktadır. Zira çalışan güvenliği gibi yüksek riskli alanlarda, bir modelin belirli bir riski neden ürettiğinin açıklanamaması hem mevzuat uyumunu zorlaştırmakta hem de kurumsal hesap verebilirlik bağlamında önemli sakıncalar yaratmaktadır. XAI teknikleri, YZ çıktılarının hangi değişkenlere dayandığını görünür kılarak hem yöneticilerin karar süreçlerini daha öngörülebilir hâle getirmekte hem de denetim ve iç kontrol mekanizmalarının güçlenmesine katkı sunmaktadır (Adadi & Berrada, 2018; Kabir vd., 2025). Bu nedenle XAI, sadece teknik bir iyileştirme aracı değil, aynı zamanda YZ tabanlı İSG uygulamalarının hukuki ve kurumsal uygunluğunu mümkün kılan temel bir yönetim bileşeni hâline gelmiştir.

Bununla birlikte literatüre giren çalışmaların, YZ tabanlı İSG uygulamalarının kurumsal uyum bağlamında karşılaştığı başlıca zorlukların; veri kaynaklarının çeşitliliği, model doğrulama süreçlerinin belirsizliği, algoritmik tarafsızlığın sağlanması ve sensör tabanlı izleme teknolojilerinin etik sınırla-

rının tanımlanması gibi kritik alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir (Hoenigsberger vd., 2024). Bu nedenle kurumların YZ kullanımına yönelik politikaları; veri yönetişimi, etik uyum, algoritmik şeffaflık, açıklanabilirlik, erişim kontrolü ve risk iletişimi gibi çok katmanlı yapıların bütünleşik bir biçimde ele alındığı kapsamlı bir çerçevede tasarlanmalıdır. Bu değerlendirmeler ışığında, yapay zekâ tabanlı İSG uygulamalarının başarıyla hayata geçirilmesi; teknik doğruluk kadar, hatta çoğu durumda ondan daha fazla ölçüde, mevzuata uyum, etik ilkeler ve kurumsal yönetim mekanizmalarının etkin biçimde işletilmesine bağlıdır.

4. SİSTEM MİMARİSİ ÖNERİSİ

Bu çalışmada, iş sağlığı ve güvenliğinde (İSG) yapay zekâ temelli risk analizinin uygulanabilmesi için, veri toplama, veri işleme, analitik-modelleme, karar destek ve kurumsal entegrasyon aşamalarından oluşan “Katmanlı Yapısal Mimari, (Şekil.1)” ve bu katmanların uygulanmasını dört kavramsal eksende yöneten “Tasarım İlkeleri (Şekil.2)” olmak üzere iki düzeyli bir mimari çerçeve önerilmektedir.

Bu ayrım, literatürde XAI, IoT ve ML temelli güvenlik sistemlerinin önerdiği mimari yaklaşımların sistematik taramasıyla (El-Bouchikhi vd., 2024; Hoenigsberger vd., 2024; Adadi & Berrada, 2018; Barredo Arrieta vd., 2020; Erol & Eraslan, 2024) uyumludur. Böylece önerilen mimari, teknik bileşenler ile uygulamayı yöneten ilkeleri açık biçimde birbirinden ayıran bütüncül bir çerçevede oluşturulmuştur. Önerilen mimaride, hibrit ve açıklanabilir bir YZ yapısının hem güvenilirlik hem de kurumsal işleyiş açısından zorunlu olduğu yönündeki literatür bulguları da dikkate alınmıştır (Adadi & Berrada, 2018; Barredo Arrieta vd., 2020).

4.1. Katmanlı Yapısal Mimari

Önerilen katmanlı yapısal mimari, işyerinde üretilen ham verinin kurumsal karar süreçlerine taşınmasını sağlayan beş temel katmandan oluşur. Bu katmanlar, literatürdeki parçalı modelleri bir araya getirerek sensör verisi, makine öğrenmesi, açıklanabilirlik ve kurumsal entegrasyon bileşenlerinin bütünleşik biçimde çalışmasını amaçlamaktadır.

Katman 1. Veri Toplama Katmanı: Bu katman, sistemin işlevselliğini mümkün kılan temel veri üretim aşamasını oluşturur. IoT sensörleri, giyilebilir cihazlar,

çevresel izleme üniteleri ve iş ekipmanı telemetrisi aracılığıyla işyeri ortamına ilişkin anlık ve sürekli veri akışı sağlanır. El-Bouchikhi vd. (2024), bu tür sensör tabanlı veri toplama altyapılarının, İSG uygulamalarında gerçek zamanlı durum farkındalığı yaratmak açısından vazgeçilmez olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu katman, mimarinin hem niceliksel veri hacmini hem de niteliksel doğruluğunu belirleyen başlangıç noktasıdır.

Katman 2. Veri İşleme ve Hazırlık Katmanı: Veri toplama aşamasını takiben ham verinin doğrudan analitik modellere aktarılması mümkün değildir. Bu nedenle ikinci katman, verinin temizlenmesi, normalleştirilmesi, özellik çıkarımı yapılması ve olası anomali ya da gürültülerin giderilmesi gibi ön-işleme süreçlerini içerir. Veri kalitesinin korunması hem uzman sistem kurallarının geçerliliği hem de makine öğrenmesi modellerinin performansı açısından kritik öneme sahiptir. Bu katman, sistemin analitik doğruluğunu belirleyen bir metodolojik filtre işlevi üstlenmektedir.

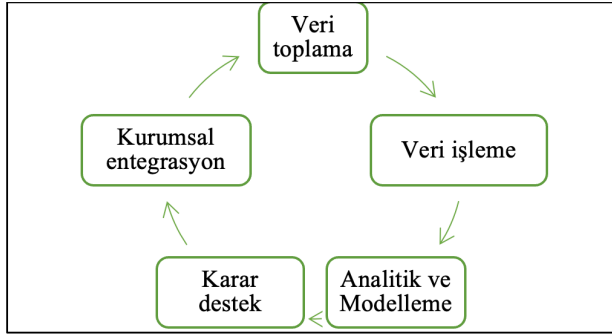
Katman 3. Analitik ve Modelleme Katmanı: Bu katman, mimarinin hesaplama ve çıkarım süreçlerinin yürütüldüğü çekirdek bölümünü oluşturur. Uzman sistem kuralları, alandaki mevcut uzmanlığın biçimsel olarak temsil edilmesini sağlarken; makine öğrenmesi modelleri, veri odaklı desenleri ve olasılık temelli risk göstergelerini öğrenir. XAI teknikleri (Shapley Additive Explanations- SHAP, Local Interpretable Model-agnostic Explanations-LIME vb.), bu modellerin karar mantığını görünür kılarak açıklanabilirliği artırır. Literatürde, yapay zekâya dayalı risk tahmini uygulamalarında açıklanabilirliğin özellikle güvenlik-kritik sektörlerde zorunlu olduğu doğrulanmaktadır (Hoenigsberger vd., 2024; Adadi & Berrada, 2018). Böylece bu katman hem sezgisel hem de veri temelli çıkarımı bütünleştiren hibrit bir yapıya sahiptir.

Katman 4. Karar Destek ve Uyarı Katmanı: Analitik çıktılar, bu katmanda kullanıcıya yorumlanabilir ve eyleme dönük biçimde sunulur. Üretilen risk skorları, durum analizleri, erken uyarı bildirimleri ve yönetsel raporlar; İSG uzmanları ve yöneticilerin operasyonel kararlarını desteklemeye yönelik olarak yapılandırılır. Barredo Arrieta vd. (2020), XAI tekniklerinin karar destek sistemlerinde kullanıcı güvenliğini artırdığını ve sistemin benimsenmesini kolaylaştırdığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda katman, yalnızca sonuç üretmekle kalmayıp, sonuçların neden üretildiğini açıklayarak hesap verebilirliği güçlendirir.

Katman 5. Kurumsal Entegrasyon ve Uyum Katmanı: Son katman, teknik çıktının kurumsal yönetim mekanizmaları ile bütünleştiği aşamayı temsil eder. Elde

edilen risk göstergeleri ve açıklanabilir karar çıktıları, ISO 45001 çerçevesinde yürütülen İSG yönetim süreçlerine entegre edilir. Bu katman veri koruma, erişim kontrolü, denetim kayıtları, şeffaflık ve hukuki uyum gibi yönetsel bileşenleri içerir. Erol ve Eraslan (2024), IoT temelli sistemlerin kurumsal süreçlere entegrasyonunda uyum ve veri güvenliği mekanizmalarının merkezi bir rol oynadığını vurgulamaktadır.

Şekil.1: Katmanlı Yapısal Mimari



4.2. Tasarım İlkeleri: Dört Kavramsal Eksen

Önerilen beş katmanlı yapısal mimari, uygulanabilirlik ve sürdürülebilirlik açısından aşağıda açıklanan dört temel tasarım eksenini tarafından yönlendirilmektedir. Bu eksenler, sistemin teknik bileşenlerinin ötesine geçerek mimarinin nasıl tasarlanması, nasıl yönetilmesi ve kurumsal ortamlara nasıl entegre edilmesi gerektiğini belirleyen üst ilkeleri oluşturmaktadır.

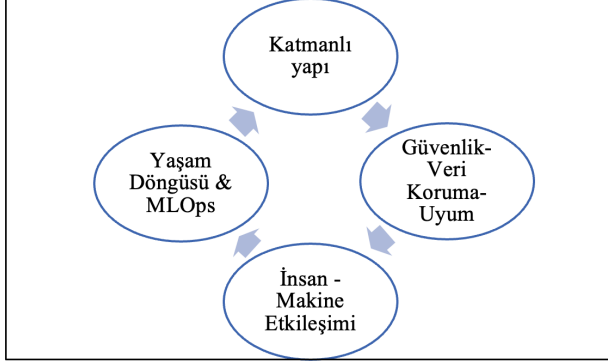
Eksen 1. Katmanlı Yapı İlkesi: Bu ilke, mimarinin temel akış mantığını oluşturarak, verinin işleme sürecinin ham veriden nihai karara doğru sistematik bir ilerleyiş içinde yapılandırılmasını belirtmektedir. Katmanlı yaklaşım, farklı işlevsel süreçlerin (veri toplama, ön işleme, modelleme ve karar desteği) birbirinden ayrılmasını ve her bir katmanın kendi işlevsel gereklilikleri doğrultusunda optimize edilmesini sağlamaktadır. IoT tabanlı İSG uygulamalarında bu düzenin sağlanmasının, veri bütünlüğü ve operasyonel güvenilirlik açısından kritik olduğu literatürde açık biçimde ortaya konmuştur (El-Bouchikhi vd., 2024). Bu nedenle katmanlı yapı ilkesi, mimarinin hem yatay hem dikey yönde tutarlılığını garanti eden temel tasarım eksenidir.

Eksen 2. Model Yaşam Döngüsü ve MLOps İlkesi: Bu eksen, yapay zekâ modellerinin tek seferlik çıktılar üreten statik yapılar değil, sürekli yenilenen ve güncellenen bir yaşam döngüsü içinde ele alınması gerektiğini belirtmektedir. Model geliştirme, doğrulama, dağıtım ve gerçek zamanlı izleme aşamalarının sistematik biçimde yürütülmesi, özellikle IoT kaynaklı yoğun veri akışının bulunduğu İSG ortamlarında model bozulması (model drift) ve performans düşüşlerinin önlenmesi açısından zorunludur. Erol ve Eraslan (2024), IoT ve İSG ilişkisinde sürekli güncellenen veri akışlarının sistem kalitesine etkisini ortaya koyarak, yaşam döngüsü temelli bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu çerçevede Makine Öğrenmesi Operasyonları (Machine Learning Operations) MLOps süreçleri, modellerin güncelliğinin, güvenilirliğinin ve açıklanabilirliğinin sürdürülebilir biçimde yönetilmesini sağlayan kurumsal bir mekanizma görevi görür.

Eksen 3. Güvenlik, Veri Koruma ve Uyum İlkesi: IoT temelli iş güvenliği çözümleri, doğası gereği çalışan davranışı, konum bilgisi, çevresel maruziyet verileri gibi hassas veri türlerini işler. Bu durum, mimarinin yalnızca teknik performans açısından değil, aynı zamanda veri koruma, mahremiyet, hukuki uyum ve etik sorumluluklar açısından da tasarlanmasını zorunlu kılar. El-Bouchikhi vd. (2024), IoT tabanlı İSG uygulamalarında veri minimizasyonu, anonimleştirme, erişim kontrolü ve sürekli denetim kayıtlarının güvenli ve etik bir kullanım için temel gereklilikler olduğunu göstermektedir. Bu eksen, mimarinin kurumsal uyum ve güvenlik standartlarıyla bütünleşmesini sağlar. Aynı zamanda yönetimsel temeli oluşturur.

Eksen 4. İnsan-Makine Etkileşimi İlkesi: Son eksen, yapay zekâ sistemlerinin yalnızca teknik doğruluk ölçütleriyle değil, kullanıcıların sistemi nasıl algıladığı ve kararları nasıl yorumladığıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. XAI tekniklerinin ürettiği açıklamaların kullanıcıya açık, anlaşılır ve eyleme dönük biçimde sunulması, sistemin benimsenmesi ve etkin kullanımı açısından kritik bir faktördür. Hoenigsberger vd. (2024), iş güvenliği bağlamında XAI tabanlı açıklamaların karar destek süreçlerini güçlendirdiğini ve kullanıcı güvenliğini artırdığını göstermektedir. Bu nedenle insan-makine etkileşimi ilkesi, teknolojinin kurumsal ortamlarda etkili, güvenilir ve sorumlu biçimde kullanılabilmesi için gerekli olan insan merkezli tasarım anlayışını mimarinin temel bileşeni hâline getirir.

Şekil.2: Tasarım İlkeleri



Önerilen mimari, iş sağlığı ve güvenliği alanında sıklıkla birbirinden kopuk biçimde incelenen IoT tabanlı veri toplama, makine öğrenmesi modelleri, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları ve kurumsal uyum mekanizmalarını tek bir bütünlüklü çerçevede bir araya getirerek oluşturulmuştur. Özellikle XAI'nin tüm katmanlara yerleştirilmesi, sistemde kararların gerekçelendirilmesini mümkün kılarak, güvenlik gibi kritik uygulamalarda şeffaflığı artırmayı amaçlamaktadır. Sistemi ISO 45001 gibi standartlarla uyumlu bir yönetim çerçevesine taşıması amacıyla "kurumsal uyum" mimarinin temel bir bileşeni olarak tasarlanmıştır. Sürekli veri akışı bulunan İSG ortamlarında güvenilirliği güçlendirmek amacıyla ise, MLOps süreçlerinin eklenmiştir. Bu özellikler, mimariyi hem uygulanabilir hem de denetlenebilir kılarak, veri temelli tahmin gücü ile açıklanabilir kural tabanlı çıkarımı tek bir hibrit yapıda başarılı biçimde bütünlüştireceği değerlendirilmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, yapay zekâ temelli iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarına ilişkin ulusal ve uluslararası literatürü sistematik biçimde incelenmiş ve mevcut eğilimleri, metodolojik yaklaşımları ve kurumsal-etik sınırlılıkları bütüncül bir çerçevede ortaya konulmuştur. İnceleme bulguları, İSG’de dijitalleşmenin üç ana teknoloji ekseninde derinleştiğini göstermektedir: (i) uzman sistemler, belirsizlik içeren ortamlarda açıklanabilir karar kuralları sağlayarak risk değerlendirme süreçlerini standartlaştırmakta; (ii) makine öğrenmesi modelleri, karmaşık ve çok değişkenli veri yapılarında güçlü öngörü kapasitesi sunarak erken uyarı ve kaza tahmini uygulamalarını güçlendirmekte; (iii) IoT tabanlı sensör ağları ise çalışma ortamına ilişkin sürekli ve yüksek çözünürlüklü veri akışı sağlayarak risklerin anlık izlenmesini mümkün kılmaktadır (Azadeh vd., 2008; Hadjimichael, 2009; Vivian vd., 2025; Erol & Eraslan, 2024). Bununla birlikte literatür, bu üç teknolojinin çoğunlukla ayrı sınırlılıklara sahip olduğunu; uzman sistemlerin adaptasyon kapasitesinin sınırlı, ML modellerinin ise açıklanabilirlik ve veri gereksinimi açısından sorunlu olduğunu; IoT sistemlerinin ise güvenilir yorumlama için mutlaka analitik bileşenlere ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır (El-Bouchikhi vd., 2024; Ayan vd., 2024).

Bu bulgular ışığında çalışmada, literatürdeki parçalı teknik yaklaşımları bütünleştiren iki düzeyli özgün bir mimari önerilmektedir. İlk düzey olan beş katmanlı yapısal mimari, veri toplama, veri işleme, analitik-modelleme, karar destek ve kurumsal entegrasyon süreçlerini uçtan uca tanımlayarak YZ tabanlı risk analizi için tutarlı bir işleyiş şeması sunmaktadır. İkinci düzey olan dört kavramsal tasarım eksenine ise bu yapısal mimarinin nasıl tasarlanması ve uygulanması gerektiğini belirleyen üst ilkeleri ortaya koymaktadır: katmanlı yapı, model yaşam döngüsü ve MLOps, güvenlik-veri koruma-uyum ve insan-makine etkileşimi. Böylece önerilen mimari hem teknik doğruluk ve analitik geçerlilik hem de açıklanabilirlik, etik uygunluk ve mevzuat uyumu açısından bütünleşik bir çerçeve sunmaktadır. Literatürün özellikle XAI’nin güvenlik-kritik sektörlerde zorunlu olduğunu göstermesi (Adadi & Berrada, 2018; Barredo Arrieta vd., 2020; Hoenigsberger vd., 2024), mimaride açıklanabilirliğin tüm katmanlara gömülü bir ilke olarak yer almasını gerekli kılmıştır.

Bununla birlikte, literatürde tespit edilen boşluklar doğrultusunda gelecekteki araştırmalar için bazı özgül öneriler ortaya konulabilir. İlk olarak, önerilen hibrit mimarilerin ampirik olarak test edilmesine yönelik çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Özellikle IoT veri akışı, makine öğrenmesi modelleri ve uzman sistem kurallarının birlikte çalıştığı sistemlerin farklı sektörlerde (inşaat, madencilik, üretim vb.) performans karşılaştırmaları yapılmalıdır. Bu tür çalışmalar, önerilen mimarinin genellenebilirliğini ve pratik uygulanabilirliğini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. İkinci olarak, açıklanabilir yapay zekâ (XAI) tekniklerinin iş sağlığı ve güvenliği bağlamında nasıl ölçülebileceği önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Gelecek çalışmalar, açıklanabilirliğin yalnızca teknik bir özellik değil, aynı zamanda kullanıcı güveni, karar kalitesi ve müdahale hızına etkisini ölçen nicel göstergeler geliştirmelidir. Üçüncü olarak, MLOps süreçlerinin İSG sistemlerine entegrasyonu henüz yeterince incelenmemiştir. Özellikle model drift, veri güncelliği ve sürekli öğrenme mekanizmalarının güvenlik-kritik ortamlarda nasıl yönetileceği üzerine odaklanan çalışmalar, bu alandaki önemli bir boşluğu dolduracaktır. Son olarak, insan-makine etkileşimi boyutunun davranışsal ve bilişsel perspektiflerden ele alınması gerekmektedir. İSG uzmanlarının yapay zekâ destekli karar sistemlerine duyduğu güven, sistemin benimsenmesi ve etkin kullanımı açısından belirleyici bir faktördür. Bu nedenle gelecekteki araştırmaların, kullanıcı deneyimi, güven ve karar davranışı gibi değişkenleri içeren deneysel tasarımlar geliştirmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak çalışma, İSG’de yapay zekâ temelli dönüşümün yalnızca teknik bir süreç olmadığını; aynı zamanda veri yönetişimi, algoritmik şeffaflık, etik uyum, hesap verebilirlik ve kullanıcı güveni gibi çok katmanlı unsurlar tarafından belirlendiğini göstermektedir. Bu bağlamda uygulayıcı kurumlara yönelik üç temel öneri geliştirilebilir: (i) IoT, ML ve uzman sistem bileşenlerinin birlikte çalışmasını mümkün kılan hibrit mimariler benimsenmeli; (ii) XAI teknikleri hem model geliştirme hem de karar destek aşamalarının ayrılmaz bir parçası hâline getirilmeli; (iii) dijital İSG sistemlerinin mevzuat, veri güvenliği ve kurumsal yönetim standartlarıyla uyumu için sürekli denetim ve MLOps tabanlı izleme mekanizmaları kurulmalıdır.

KAYNAKÇA

Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (XAI). IEEE Access, 6, 52138–52160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052>

Aslan, T., & Yağımlı, M. (2023). İş Sağlığı ve Güvenliğinde Derin Öğrenme Tabanlı Risk Tespit ve Analizi. The Journal of International Scientific Researches, 8(2), 223-236. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/isrjournal/issue/78902/1288496>

Ayan, B., Taşçı, S., & Köksal, E. B. M. (2024). İş Sağlığı ve Güvenliği Alanında Kullanılan Yapay Zeka Teknolojilerine İlişkin İnceleme. Çalışma İlişkileri Dergisi, 15(2), 20-33. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cider/issue/86465/1496402>

Azadeh, A., Fam, I. M., Khoshnoud, M., & Nikafrouz, M. (2008). Design and implementation of a fuzzy expert system for performance assessment of an integrated health, safety, environment (HSE) and ergonomics system: The case of a gas refinery. Information Sciences, 178(22), 4280–4300. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.06.026>

Barredo A. A., 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. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>

Beriha, G. S., Patnaik, B., Mahapatra, S. S., & Padhee, S. (2012). Assessment of safety performance in Indian industries using fuzzy approach. Expert Systems with Applications, 39(3), 3311–3323. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.018>

El-Bouchikhi, M., Weerts, S., & Clavien, C. (2024). The internet of things deployed for occupational health and safety purposes: A qualitative study of opportunities and ethical issues. Frontiers in Public Health, 12, 1468646, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1468646>

El-Helaly, M. (2024). Artificial intelligence and occupational health and safety, benefits and drawbacks. La Medicina del Lavoro, 115(2), 91–104. <https://doi.org/10.23749/mdl.v115i2.15835>

Erol, M., & Eraslan, E. (2024). Nesnelerin İnterneti, Uygulama Alanları ve İş Sağlığı ve Güvenliği ile Etkileşimi. Journal of Turkish Operations Management, 8(1), 73-89. <https://doi.org/10.56554/jtom.1258262>

Hadjimichael, M. (2009). A fuzzy expert system for aviation risk assessment. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 6512–6519. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.081>

Hoenigsberger, F., Saranti, A., Jalali, A., Stampfer, K., & Holzinger, A. (2024). Explainable Artificial Intelligence to Support Work Safety in Forestry: Insights from Two Large Datasets, Open Challenges, and Future Work. *Applied Sciences*, 14(9), 3911. <https://doi.org/10.3390/app14093911>

İçen, D., & Günay, S. (2014). Uzman Sistemler ve İstatistik. *İstatistikçiler Dergisi: İstatistik ve Aktüerya*, 7(2), 37–45. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jssa/issue/36636/417059>

Kabir, S., Hossain, M. S., & Andersson, K. (2025). A Review of Explainable Artificial Intelligence from the Perspectives of Challenges and Opportunities. *Algorithms*, 18(9), 556. <https://doi.org/10.3390/a18090556>

Koç, K., Ekmekcioğlu, Ö., & Gürgün, A. P., (2022). Accident prediction in construction using hybrid wavelet-machine learning. *Automation in Construction*, vol.133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103987>

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. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.025>

Olçay, Z. F. (2021). İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürü Ölçeği; Geçerlik ve Güvenirlilik Çalışması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (23), 678-685. <https://doi.org/10.31590/ejosat.892845>

Park, J., & Kang, D. (2024). Artificial Intelligence and Smart Technologies in Safety Management: A Comprehensive Analysis Across Multiple Industries. *Applied Sciences*, 14(24), 1-22. <https://doi.org/10.3390/app142411934>

Pavlovic-Veselinovic, S., Hedge, A., & Veselinovic, M. (2016). An ergonomic expert system for risk assessment of work-related musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 53, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.11.008>

Peters, M. D. J., Marnie, C., Tricco, A. C., Pollock, D., Munn, Z., Alexander, L., ... Khalil, H. (2020). Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JBİ Evidence Synthesis*, 18(10), 2119–2126. <https://doi.org/10.11124/JBİES-20-00167>

Shah, I. A., & Mishra, S. (2024). Artificial intelligence in advancing occupational health and safety: An encapsulation of developments. *Journal of Occupational Health*, 66(1), 1-12 <https://doi.org/10.1093/joccuh/uiad017>

Şengöz, T. E., & Bozkurt, Y. (2025). İş Sağlığı ve Güvenliği Kapsamında Sektörel İş Kazalarının Yapay Zekâ Teknolojileri ve Uzman Sistem Uygulamaları Yönünden İncelenmesi. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 8(1), 17-44. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1678632>

Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., ... Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467-473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>

Vivian, N., Maheshwari, U., Yeboah, R. (2025). A comprehensive survey on machine learning for workplace injury analysis: Risk prediction, return to work strategies, and demographic insights. *Journal of Big Data*, 12, 167, 1-26. <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01229-z>

World Health Organization & International Labour Organization. (2021). WHO/ILO joint estimates of the work-related burden of disease and injury, 2000-2016: Global monitoring report. World Health Organization & International Labour Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034945>