

İş sağlığı ve güvenliğinde dijital ikiz teknolojileri: araştırma eğilimlerinin ve tematik evrimin bibliyometrik analizi (2019–2025)

Seniha Senanur BACAKOĞLU¹, Engin ÖZDEMİR^{2*}

¹İnönü Üniversitesi Malatya Meslek Yüksekokulu İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, Malatya.

²İnönü Üniversitesi Malatya Meslek Yüksekokulu İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, Malatya.

Geliş Tarihi (Received Date): 19.02.2026

Kabul Tarihi (Accepted Date): 03.06.2026

Öz

Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 paradigmleriyle birlikte hız kazanan dijital dönüşüm süreci, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) yönetiminde veri odaklı, öngörücü ve insan merkezli yaklaşımların benimsenmesini zorunlu hâle getirmiştir. Bu bağlamda dijital ikiz teknolojisi; çalışma ortamlarının sanal olarak modellenmesi, risklerin önceden tahmin edilmesi ve güvenlik performansının optimize edilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanındaki bilimsel gelişimini bütüncül bir bakış açısıyla ele alan bibliyometrik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği literatüründeki bilimsel yapısını, tematik odaklarını ve araştırma eğilimlerini bibliyometrik bir yaklaşımla sistematik olarak incelemektir. Bu doğrultuda, 2019-2025 yılları arasında yayımlanan toplam 58 akademik çalışma, Web of Science Core Collection veri tabanından elde edilmiştir. Yayınların yıllara, ülkelere, yazarlara, kurumlara, dergilere ve araştırma alanlarına göre dağılımları analiz edilmiş; anahtar kelimeler arasındaki ilişkiler ağ, örtüşme ve yoğunluk haritaları aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bibliyometrik görselleştirmeler VOSviewer yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular, dijital ikiz tabanlı İSG çalışmalarının özellikle ergonomi, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, insan robot iş birliği, yapım güvenliği ve akıllı üretim sistemleri temalarında yoğunlaştığını göstermektedir. Ayrıca literatürde, üretim odaklı dijital ikiz uygulamalarından, yapay zekâ destekli, etkileşimli ve insan-merkezli güvenlik yaklaşımlarına doğru belirgin bir yönelim olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği alanında proaktif ve sürdürülebilir güvenlik yönetimi için stratejik bir araç olarak konumlandığını ortaya koymakta; araştırmacılar, uygulayıcılar ve politika yapıcılar için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Dijital ikiz, iş sağlığı ve güvenliği, bibliyometrik analiz, endüstri 4.0, endüstri 5.0

*Engin ÖZDEMİR, ozdemir.engin@inonu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-6043-0403>
Seniha Senanur BACAKOĞLU, senanurbacakoglu.60@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8803-0702>

Digital twin technologies in occupational health and safety: bibliometric analysis of research trends and thematic evolution (2019–2025)

Abstract

The rapid advancement of digital transformation paradigms under Industry 4.0 and Industry 5.0 has significantly reshaped occupational health and safety (OHS) management by enabling data driven, predictive, and human centered safety approaches. Among these technologies, digital twin has emerged as a powerful tool for modeling, monitoring, and optimizing complex work environments with enhanced safety performance. Despite the growing number of studies addressing digital twin applications in OHS, a comprehensive bibliometric assessment of this research domain remains limited. This study aims to systematically analyze the scientific landscape, thematic structure, and research trends of digital twin technologies in the context of occupational health and safety through a bibliometric approach. A total of 58 academic publications published between 2019 and 2025 were retrieved from the Web of Science Core Collection database. Bibliometric indicators related to publication years, countries, authors, institutions, journals, research areas, and keywords were examined. Keyword co-occurrence, network, overlay, and density visualizations were generated using VOSviewer to reveal conceptual relationships and thematic clusters within the literature. The results indicate a rapidly growing research interest in digital twin based OHS applications, particularly in ergonomics, virtual and augmented reality, human robot collaboration, construction safety, and intelligent manufacturing systems. The findings further reveal a shift from production oriented digital twin applications toward more interactive, predictive, and human centered safety solutions supported by artificial intelligence and immersive technologies. This study provides valuable insights for researchers, practitioners, and policymakers by highlighting emerging themes, research gaps, and future directions, and by positioning digital twin technology as a strategic enabler for proactive and sustainable occupational health and safety management.

Keywords; *Digital twin, occupational health and safety, bibliometric analysis, industry 4.0, industry 5.0*

1. Giriş

Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 paradigmaları ile birlikte üretim ve hizmet süreçleri, dijitalleşme, otomasyon ve veri odaklı yönetim anlayışı doğrultusunda köklü bir dönüşüm sürecine girmiştir. Bu dönüşüm, yalnızca teknolojik altyapının gelişmesini değil, aynı zamanda karar alma mekanizmalarının daha bütüncül, öngörülebilir ve sistematik bir yapıya kavuşmasını da beraberinde getirmiştir. Akıllı sistemler, gelişmiş sensör altyapıları, IoT, CPS, bulut bilişim teknolojileri ve yapay zekâ tabanlı uygulamalar; fiziksel ve dijital ortamlar arasında sürekli ve gerçek zamanlı veri etkileşimini mümkün kılarak operasyonel süreçlerin daha verimli, izlenebilir ve güvenli bir biçimde yönetilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda dijitalleşme, yalnızca üretkenlik artışıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda güvenlik, sürdürülebilirlik ve insan odaklı yaklaşımları da ön plana çıkarmaktadır. Bu teknolojik dönüşümün temel bileşenlerinden biri olarak

öne çıkan dijital ikiz teknolojisi, fiziksel bir varlığın, sürecin veya sistemin dinamik ve sürekli güncellenen sanal bir temsilini oluşturarak, sistem davranışlarının izlenmesine, analiz edilmesine, tahmin edilmesine ve optimize edilmesine olanak tanımaktadır [1-5]. Dijital ikizler, gerçek zamanlı veri akışı sayesinde fiziksel sistemlerde meydana gelen değişimlere eş zamanlı olarak uyum sağlayabilmekte ve böylece karmaşık süreçlerin bütüncül bir perspektifle değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu özellikleriyle dijital ikiz yaklaşımı, özellikle belirsizliklerin yüksek olduğu ve çok sayıda değişkenin etkileşim hâlinde bulunduğu endüstriyel ortamlarda stratejik bir karar destek aracı olarak değerlendirilmektedir [6-7].

Dijital dönüşüm süreçlerinin hız kazanmasıyla birlikte bibliyometrik analiz yöntemleri, gelişmekte olan araştırma alanlarının bilimsel yapısını sistematik biçimde incelemede yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bibliyometrik analiz; belirli bir araştırma alanındaki yayınların, yazarların, anahtar kavramların ve iş birliği ağlarının nicel yöntemlerle değerlendirilmesini sağlayan istatistiksel ve matematiksel bir analiz yaklaşımıdır. Özellikle Endüstri 4.0, yapay zekâ, sürdürülebilir üretim ve iş sağlığı ve güvenliği gibi disiplinler arası araştırma alanlarında literatürdeki eğilimlerin, tematik yapıların ve araştırma boşluklarının ortaya konulmasında önemli katkılar sağlamaktadır. Bu kapsamda bibliyometrik analiz yönteminin, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği alanındaki bilimsel gelişimini incelemek açısından uygun bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir. Bilimsel literatürün entelektüel haritasını, kavramsal ağlarını ve tematik evrimini matematiksel ve istatistiksel yöntemlerle değerlendiren bibliyometrik analiz, belirli bir araştırma alanının gelişim dinamiklerini nesnel ölçütlerle ortaya koyan güçlü bir metodolojidir. Dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki uygulamaları görece yeni, çok disiplinli ve hızla olgunlaşan bir karakter sergilediğinden, bu iki bağımsız disiplinin kesişim kümesini haritalandırmak, mevcut bilgi boşluklarını görünür kılmak ve geleceğe yönelik stratejik araştırma yönelimlerini tahmin etmek adına bibliyometrik haritalama en uygun metodolojik yaklaşım olarak benimsenmiştir. Literatür incelendiğinde; iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki genel akademik çıktıları, lisansüstü tezlerin tematik dağılımlarını veya belirli sektörlerdeki iş güvenliği yayınlarının eğilimlerini istatistiksel ve matematiksel yöntemlerle inceleyen çeşitli bibliyometrik çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir [26, 27]. Bu çalışmalar, İSG literatürünün tarihsel gelişimi ve genel yapısı hakkında önemli makro bilgiler sunmaktadır. Ancak, Endüstri 4.0 ve 5.0 dinamiklerinin en kritik siber-fiziksel bileşenlerinden biri olan dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanındaki spesifik yansımalarını, bu iki disiplinin kesişim noktasındaki tematik evrimi ve proaktif güvenlik yönetimi trendlerini odak noktasına alan derinlemesine bir bibliyometrik haritalama çalışması literatürde henüz yer almamaktadır. Dolayısıyla bu araştırma, genel iş sağlığı ve güvenliği bibliyometrik çalışmalarının dijitalleşme ve siber-fiziksel sistemler eksenindeki eksik kalan yönünü tamamlamayı hedeflemekte ve mevcut literatürdeki özgün konumunu en güncel bilimsel yaklaşım düzeyi çerçevesinde konumlandırmaktadır.

Son yıllarda dijital ikiz teknolojileri, yalnızca üretim performansının artırılması, bakım ve operasyon maliyetlerinin azaltılması ya da süreç verimliliğinin iyileştirilmesi amacıyla değil, aynı zamanda İSG alanında da yenilikçi ve etkili bir çözüm aracı olarak ele alınmaya başlanmıştır. Dijital ikizler; riskli çalışma koşullarının sanal ortamda modellenmesine ve simüle edilmesine, ergonomik değerlendirmelerin sistematik biçimde gerçekleştirilmesine, tehlike kaynaklarının gerçek zamanlı olarak izlenmesine ve insan makine etkileşimlerinin güvenli şekilde tasarlanmasına imkân tanımaktadır [8]. Bu yönüyle dijital ikiz teknolojisi, İSG profesyonellerine yalnızca mevcut risklerin

değerlendirilmesi değil, aynı zamanda potansiyel tehlikelerin öngörülmesi ve önleyici stratejilerin geliştirilmesi açısından da gelişmiş bir karar destek mekanizması sunmaktadır. Çalışma ortamlarında ortaya çıkabilecek potansiyel tehlikelerin önceden belirlenmesi, olası iş kazaları ve meslek hastalıklarının senaryo bazlı olarak modellenmesi, çalışan davranışlarının veri temelli analiz edilmesi ve acil durum yönetim planlarının sanal ortamda test edilmesi gibi uygulamalar, dijital ikiz teknolojilerini İSG alanında önemli bir yenilikçi yaklaşım hâline getirmektedir. Özellikle yüksek risk içeren sektörlerde, dijital ikiz tabanlı sistemlerin proaktif güvenlik yönetimine katkı sağladığı ve reaktif yaklaşımlara kıyasla daha etkili sonuçlar sunduğu görülmektedir. Mevcut literatür incelendiğinde, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği bağlamında giderek artan bir akademik ilgi gördüğü dikkat çekmektedir [9-10]. Ergonomi, artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR), insan robot iş birliği (HRC) ve akıllı üretim sistemleri gibi temaların dijital ikiz yaklaşımlarıyla entegre edildiği çalışmaların sayısı son yıllarda belirgin biçimde artış göstermiştir. Bununla birlikte, bu alandaki bilimsel üretimin gelişimini, araştırma eğilimlerini, tematik odakları ve bilgi yapısını bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koyan kapsamlı bibliyometrik analiz çalışmalarının sınırlı olduğu görülmektedir [11].

Bu çalışma, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği alanındaki bilimsel üretimini bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda çalışma, literatürdeki mevcut bilgi yapısını ortaya koymanın yanı sıra, araştırma eğilimlerini, tematik yoğunlaşmaları ve gelişen odak alanlarını sistematik olarak analiz etmeyi hedeflemektedir. Çalışmanın temel amacı, dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanındaki akademik gelişimini nicel ve nitel göstergeler aracılığıyla değerlendirmek ve gelecekteki araştırmalara yön verebilecek bilimsel çıkarımlar sunmaktır.

Bu doğrultuda çalışma aşağıdaki araştırma sorularına yanıt aramaktadır:

RQ1: Dijital ikiz teknolojileri, iş sağlığı ve güvenliği literatüründe hangi tematik alanlarda yoğunlaşmaktadır?

RQ2: 2019-2025 yılları arasında yayımlanan akademik çalışmalar hangi ülkeler, kurumlar ve araştırmacılar tarafından üretilmiştir?

RQ3: Dijital ikiz teknolojileri ile iş sağlığı ve güvenliği arasındaki ilişkiyi inceleyen araştırmalarda hangi kavramlar ön plana çıkmakta ve bu çalışmalar geleceğe yönelik hangi araştırma eğilimlerini ortaya koymaktadır?

Bu araştırma sorularını yanıtlamak amacıyla, bibliyometrik analiz yaklaşımı benimsenmiş ve çalışma kapsamında Web of Science Core Collection veri tabanında indekslenen akademik yayınlar sistematik olarak incelenmiştir. Seçilen veri tabanı, yüksek etki faktörlü dergileri kapsaması ve disiplinlerarası bilimsel üretimi temsil etmesi nedeniyle çalışmanın amaçlarıyla uyumlu bir kaynak olarak değerlendirilmiştir. Belirlenen zaman aralığında yayımlanan çalışmalar, önceden tanımlanan dâhil etme ve hariç tutma kriterleri doğrultusunda analiz edilmiştir. Elde edilen bibliyografik veriler kullanılarak, anahtar kelime eş oluşum analizleri gerçekleştirilmiş ve literatürde öne çıkan kavramsal yapılar ile tematik kümelenmeler görselleştirilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan ağ haritaları aracılığıyla, dijital ikiz teknolojileri ile iş sağlığı ve güvenliği arasındaki ilişkilerin hangi kavramlar etrafında şekillendiği, araştırma odaklarının zaman içerisindeki değişimi ve ortaya çıkan yeni eğilimler sistematik bir biçimde değerlendirilmiştir. Böylece çalışmada, yalnızca mevcut literatürün nicel bir özeti sunulmakla kalmamış; aynı zamanda dijital ikiz tabanlı İSG araştırmalarının bilimsel

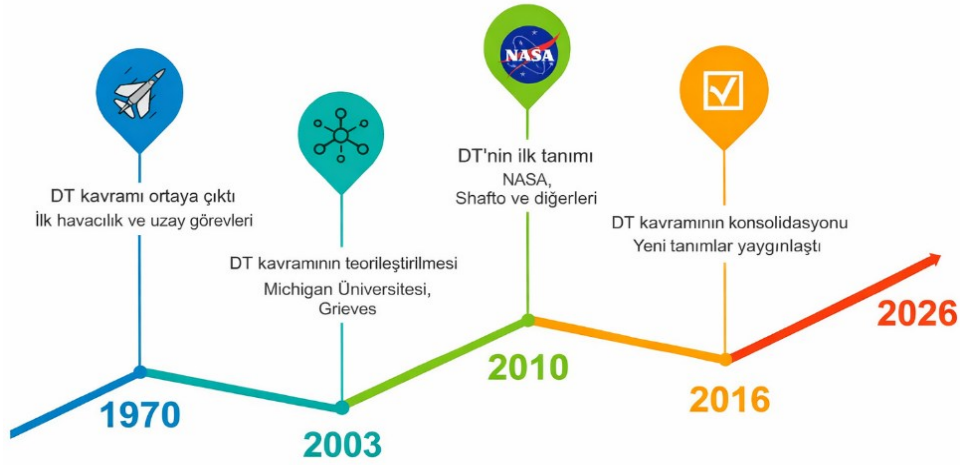
yapısı, gelişim dinamikleri ve gelecekteki potansiyel yönelimleri analitik bir çerçevede ortaya konulmuştur. Bu yönüyle çalışma, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği alanındaki akademik gelişimine ilişkin kapsamlı bir değerlendirme sunarak, hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için yol gösterici nitelikte bulgular sağlamayı amaçlamaktadır.

2. Kuramsal arka plan

Dijital ikiz kavramı, kökenini 1970’li yıllarda NASA tarafından yürütülen uzay görevlerinde, karmaşık mühendislik sistemlerinin performansının uzaktan izlenmesi ve sanal modeller aracılığıyla değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen yaklaşımlara dayandırmaktadır. Bu erken dönem uygulamalar, fiziksel sistemlerden elde edilen gerçek zamanlı verilerin sanal modellerle bütünleştirilerek sistem davranışlarının izlenmesi ve olası arıza senaryolarının önceden değerlendirilmesini hedeflemiştir. Nitekim bu yaklaşım, fiziksel bir varlığın davranışlarının yalnızca geçmiş verilere dayalı olarak değil, dinamik ve güncellenebilir sanal temsiller aracılığıyla öngörülmesini mümkün kılması bakımından dijital ikiz kavramının temelini oluşturmuştur [12]. Bu erken dönem çalışmalar, dijital ikizin yalnızca statik bir simülasyon aracı değil, fiziksel sistemle sürekli etkileşim hâlinde olan, veri temelli ve adaptif bir yapı olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur [13].

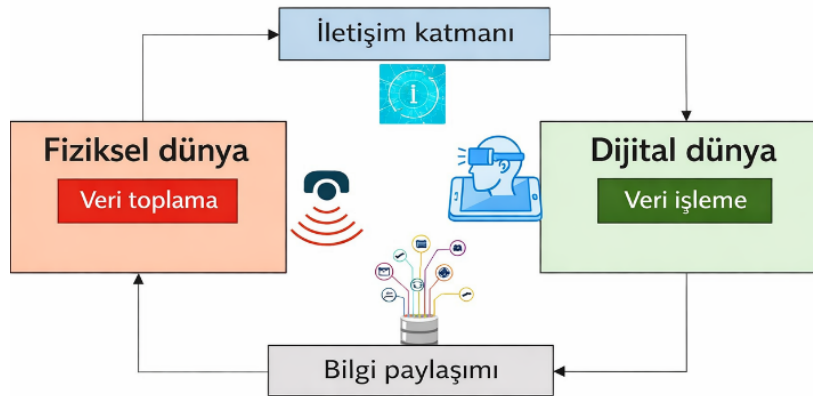
Dijital ikiz tanımının zaman içerisindeki kavramsal evrimi, teknolojik gelişmeler ve artan veri işleme kapasitesiyle birlikte şekillenmiş olup, bu tarihsel gelişim süreci Şekil 1’de özetlenmektedir. Dijital ikiz, statik bir analiz aracı olmaktan çıkarak, yaşayan, öğrenen ve adaptif bir sistem yapısına dönüşmektedir. Kavramsal çerçevenin zamanla olgunlaşmasıyla birlikte, NASA tarafından geliştirilen daha kapsamlı bir tanımda dijital ikiz; bir fiziksel varlığın yaşam döngüsü boyunca çoklu fizik (multi physics), çoklu ölçek (multi scale) ve olasılıksal (probabilistic) modelleme yaklaşımlarıyla desteklenen, dinamik ve sürekli güncellenebilir bir sanal temsili olarak ifade edilmiştir [14-15]. Bu tanım, dijital ikizlerin yalnızca mevcut durumun izlenmesine değil, aynı zamanda sistem performansının tahmin edilmesine, belirsizliklerin analiz edilmesine ve olası arıza senaryolarının önceden değerlendirilmesine olanak tanıdığını ortaya koymaktadır. Bu özellikleri sayesinde dijital ikiz teknolojileri; havacılık, otomotiv, imalat ve enerji gibi yüksek risk ve yüksek maliyet içeren sektörlerde, tahmine dayalı analizler, kestirimci bakım stratejileri ve performans optimizasyonu uygulamalarında kritik bir araç hâline gelmiştir.

Gerçek zamanlı veri entegrasyonu ve ileri modelleme yetenekleri, dijital ikizleri karmaşık sistemlerin güvenilirliğini artırmaya yönelik stratejik bir çözüm olarak ön plana çıkarmaktadır. Bu yönüyle dijital ikiz yaklaşımı, yalnızca mühendislik performansının iyileştirilmesine değil, aynı zamanda güvenlik, sürdürülebilirlik ve risk yönetimi gibi alanlarda da giderek artan bir uygulama potansiyeline sahiptir [16-17].



Şekil 1. Dijital İkiz tanımının evriminin zaman çizelgesi.

Daha kapsamlı ve uygulama odaklı bir tanım ise NASA tarafından geliştirilmiştir. NASA'nın tanımına göre dijital ikiz; bir fiziksel varlığın tüm yaşam döngüsü boyunca çoklu fizik, çoklu ölçek ve olasılıksal modelleme yaklaşımlarıyla desteklenen, dinamik ve sürekli güncellenebilir bir sanal temsili olarak ifade edilmektedir. Bu tanım, dijital ikizlerin yalnızca mevcut sistem durumunun izlenmesini değil, aynı zamanda belirsizliklerin analiz edilmesini, sistem performansının öngörülmesini ve olası arıza senaryolarının önceden değerlendirilmesini mümkün kıldığını vurgulamaktadır. Bu bağlamda dijital ikiz teknolojileri; havacılık, otomotiv, imalat ve enerji gibi yüksek risk ve yüksek maliyet içeren sektörlerde tahmine dayalı analizler ve kestirimci bakım uygulamaları açısından stratejik bir araç olarak öne çıkmaktadır [18-19]. 2010'lu yıllardan itibaren nesnelerin interneti, siber fiziksel sistemler, sensör teknolojileri, büyük veri analitiği ve bulut bilişim alanlarında yaşanan hızlı gelişmeler, dijital ikiz teknolojilerinin endüstriyel uygulamalara entegrasyonunu önemli ölçüde hızlandırmıştır [11, 20]. IoT altyapıları aracılığıyla fiziksel ortamdan elde edilen yüksek hacimli ve gerçek zamanlı veriler dijital modellere aktarılırken, CPS yapıları fiziksel ve dijital dünyalar arasındaki etkileşimi sağlayan temel bileşenler olarak işlev görmektedir. Dijital ikiz mimarisinin bu çift yönlü veri ve etkileşim yapısı, Şekil 2'de kavramsal olarak sunulmaktadır. Bu yapı sayesinde sistem davranışları anlık olarak izlenebilmekte, sanal ortamda farklı senaryolar test edilebilmekte ve süreç performansı güvenli bir biçimde optimize edilebilmektedir.



Şekil 2. Dijital ikiz mimarisinin kavramsal yapısı ve fiziksel dijital etkileşimi.

Son yıllarda dijital ikiz teknolojileri yalnızca üretim optimizasyonu ve sistem performansı odaklı uygulamalarla sınırlı kalmamış; çalışan güvenliği, ergonomi, risk yönetimi ve insan merkezli üretim sistemleri gibi iş sağlığı ve güvenliği odaklı alanlarda da yoğun biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle gerçek zamanlı veri izleme, tehlike simülasyonları, öngörücü risk analizi ve sanal eğitim uygulamaları sayesinde dijital ikiz sistemlerinin iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ortamlarının geliştirilmesine önemli katkılar sunduğu değerlendirilmektedir.

Dijital ikiz yaklaşımı sayesinde çalışma ortamlarının sanal modelleri oluşturulabilmekte, tehlike kaynakları erken aşamada tespit edilebilmekte ve yüksek risk içeren senaryolar, fiziksel ortamdaki tehlikelere maruz kalınmaksızın analiz edilebilmektedir. Bunun yanı sıra ergonomik değerlendirmeler, insan makine etkileşimlerinin modellenmesi, artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik destekli eğitim ve simülasyon uygulamaları gibi alanlarda dijital ikiz tabanlı çözümler önemli avantajlar sunmaktadır [10]. Bu uygulamalar, çalışan güvenliğinin artırılmasına, riskli çalışma koşullarının önleyici bir yaklaşımla değerlendirilmesine ve güvenlik kültürünün güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Her ne kadar dijital ikiz teknolojilerinin İSG bağlamındaki uygulamalarına yönelik çalışmaların sayısında son yıllarda belirgin bir artış gözlenirse de, bu alandaki bilimsel gelişimin tarihsel evrim, tematik odaklar ve araştırma eğilimleri açısından bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirildiği bibliyometrik analiz çalışmalarının sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, dijital ikiz-İSG ilişkisini sistematik bir çerçevede ele alan, literatürün yapısını ve gelişim dinamiklerini ortaya koyan kapsamlı çalışmalara duyulan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır.

Dijital ikiz teknolojilerinin kavramsal gelişimi ve endüstriyel uygulamalardaki yaygınlaşması, bu yaklaşımın iş sağlığı ve güvenliği alanında giderek daha fazla akademik ilgi görmesine zemin hazırlamıştır. Özellikle dijital ikizlerin risk analizi, ergonomi, insan makine etkileşimi, eğitim simülasyonları ve önleyici güvenlik stratejileri gibi İSG'nin temel bileşenleriyle bütünleştiği çalışmaların sayısında son yıllarda dikkat çekici bir artış yaşanmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu çalışmaların hangi tematik alanlarda yoğunlaştığı, literatürün zaman içerisindeki gelişim eğilimleri, öne çıkan araştırma odakları ile bu alandaki bilimsel üretimin hangi ülkeler, kurumlar ve araştırmacılar tarafından yönlendirildiği konuları henüz bütüncül bir perspektifle ele alınmamıştır. Bu bağlamda, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği literatüründeki bilgi yapısının sistematik olarak analiz edilmesi, hem mevcut akademik birikimin daha iyi anlaşılması hem de gelecekteki araştırma yönelimlerinin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.

Bibliyometrik analiz yöntemi, literatürdeki nicel eğilimleri, kavramsal kümelenmeleri ve iş birliği ağlarını ortaya koyması bakımından bu tür bütüncül değerlendirmeler için etkili bir araç sunmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, dijital ikiz ve İSG arasındaki ilişkinin bilimsel gelişimini nicel göstergeler ve ağ analizleri aracılığıyla inceleyerek, literatürdeki mevcut boşlukları ve potansiyel araştırma fırsatlarını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda çalışma kapsamında, dijital ikiz teknolojileri ile iş sağlığı ve güvenliği literatürü arasındaki ilişkinin bibliyometrik yöntemler aracılığıyla sistematik biçimde analiz edilmesi, literatürdeki tematik eğilimlerin, kavramsal kümelenmelerin ve bilimsel üretim yapısının ortaya konulması amaçlanmaktadır.

3. Yöntem

Bu çalışmada, dijital ikiz teknolojilerinin İSG literatüründeki tematik yapısını, kavramsal ilişkilerini ve araştırma eğilimlerini sistematik bir biçimde ortaya koymak amacıyla bibliyometrik analiz yöntemi benimsenmiştir. Bibliyometrik analiz, belirli bir araştırma alanında yayımlanan akademik çalışmaların nicel göstergeler aracılığıyla değerlendirilmesini sağlayan ve literatürün kavramsal yapısını, bilgi ağlarını ve gelişim dinamiklerini ortaya koyan güçlü bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde, araştırma alanındaki baskın temalar, öne çıkan kavramlar ve bilimsel üretimin dağılımı nesnel ölçütlerle analiz edilebilmektedir. Bu bölümde veri kaynağı seçimi, arama stratejisi, veri setinin hazırlanması ve analiz sürecine ilişkin adımlar ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.1. Veri kaynağı ve arama stratejisi

Bu çalışmada kullanılan bibliyografik veriler Web of Science Core Collection veri tabanından elde edilmiştir. Veri toplama sürecinde, metodolojik şeffaflığın ve tutarlılığın sağlanması ile iş sağlığı ve güvenliği alanına ilişkin çalışmaların sistematik biçimde belirlenmesi amacıyla yapılandırılmış bir arama stratejisi kullanılmıştır. Bu kapsamda literatür taraması, TS=("digital twin*" AND (occupational OR "workplace safety" OR "occupational safety" OR "occupational health" OR ergonomics OR "human factors")) sorgusu ile gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamı 2019–2025 yılları arasında yayımlanan çalışmalarla sınırlandırılmış, yalnızca İngilizce dilinde yayımlanan “Article” ve “Review Article” türündeki yayınlar değerlendirmeye alınmıştır. Böylece hem güncel literatüre odaklanılmış hem de çalışma kapsamının akademik olarak karşılaştırılabilir bir çerçevede tutulması sağlanmıştır. Ayrıca veri setinin doğrudan iş sağlığı ve güvenliği alanıyla ilişkili yayınlardan oluşturulabilmesi amacıyla Web of Science kategori filtrelemesi uygulanmıştır. Bu doğrultuda “Industrial Engineering”, “Multidisciplinary Engineering”, “Construction & Building Technology”, “Ergonomics” ve “Public, Environmental & Occupational Health” kategorilerindeki yayınlar dikkate alınmıştır. Filtreleme işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar başlık, özet ve anahtar kelime düzeyinde ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Bu aşamada iş sağlığı ve güvenliği ile doğrudan ilişkisi bulunmayan çalışmalar veri setinden çıkarılmış, kriterleri karşılayan yayınlar ise nihai analiz veri setine dâhil edilmiştir.

3.2. Veri setinin hazırlanması

Web of Science Core Collection veri tabanından elde edilen bibliyografik kayıtlar, herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın analiz sürecine aktarılmıştır. Veri seti içerisinde toplam 196 farklı anahtar kelime tespit edilmiştir. Ancak bibliyometrik analizlerde, düşük frekansa sahip anahtar kelimelerin kavramsal yapının yorumlanmasını güçleştirebileceği dikkate alınarak, analiz sonuçlarının daha anlamlı ve yorumlanabilir olması amacıyla anahtar kelimeler için minimum tekrar (occurrence) filtresi uygulanmıştır.

3.3. Minimum eşik değerinin belirlenmesi

Anahtar kelimeler için minimum tekrar eşik değerinin belirlenmesinde, literatürde yaygın olarak kullanılan ve Forthofer ve Lehnen (1981) tarafından önerilen eşik değeri formülünden yararlanılmıştır [21]. Bu formül aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$T = \frac{1 + \sqrt{1 + 8I}}{2}$$

Burada I, toplam anahtar kelime sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada $I = 196$ olarak belirlendiğinden, teorik eşik değeri yaklaşık $T \approx 20$ olarak hesaplanmaktadır. Bununla birlikte, dijital ikiz ve İSG kesişiminin görece yeni ve literatür hacmi açısından sınırlı bir araştırma alanı olması göz önünde bulundurularak, daha kapsayıcı bir tematik analiz gerçekleştirmek amacıyla minimum tekrar değeri 2 olarak belirlenmiştir. Bu eşik değeri sonucunda analiz kapsamına alınan 37 anahtar kelime üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

3.4. Analiz parametreleri ve yazılım

Bibliyometrik analizler, bilimsel haritalama ve ağ görselleştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan VOSviewer yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Dijital ikiz ve İSG literatüründeki kavramsal ilişkileri incelemek amacıyla anahtar kelime eş oluşum analizi uygulanmıştır. Analiz birimi olarak All keywords seçilmiş, sayım yöntemi ise tüm anahtar kelimelere eşit ağırlık verilmesini sağlayan Full counting yaklaşımı olarak belirlenmiştir. Bu parametreler sayesinde, literatürde birlikte kullanılan kavramlar arasındaki ilişkiler daha bütüncül bir biçimde ortaya konulmuştur.

3.5. Kümelenme yaklaşımı

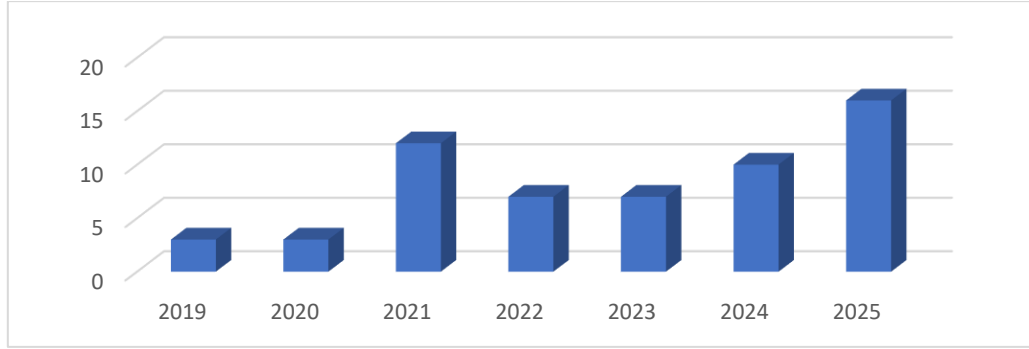
VOSviewer yazılımı, anahtar kelimeler arasındaki benzerliği hesaplamak için association strength ölçütünü kullanmakta ve elde edilen benzerlik değerleri doğrultusunda tematik kümeleri smart local moving algoritması yardımıyla otomatik olarak oluşturmaktadır [22]. Bu yaklaşım, literatürdeki kavramsal yapının nesnel ölçütlere dayalı olarak sınıflandırılmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen tematik kümeler, kavramsal ağ yapıları ve görselleştirme sonuçları bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak sunulmakta ve yorumlanmaktadır.

4. Bulgular

Bu bölümde, dijital ikiz ve İSG alanında 2019-2025 yılları arasında yayımlanan akademik çalışmaların bilimsel eğilimleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Bibliyometrik analizler aracılığıyla literatürün yapısal özellikleri, yoğunlaştığı tematik alanlar ve araştırma dinamikleri ortaya konulmuştur. Bu kapsamda öncelikle yayınların yıllara göre dağılımı analiz edilmiş; ardından ülkeler, yazarlar, kurumlar ve dergiler bağlamında üretim eğilimleri değerlendirilmiştir. Devamında ise literatürün kavramsal ve tematik yapısını görünür kılmak amacıyla anahtar kelime eş oluşumuna dayalı yoğunluk, ağ ve kümelenme haritaları oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular, dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanındaki gelişiminin yalnızca nicel bir artışı değil, aynı zamanda konu çeşitliliği ve disiplinler arası etkileşim açısından da belirgin bir dönüşüm sürecini yansıttığını göstermektedir. Bu yönüyle sonuçlar, alanın mevcut durumuna ilişkin kapsamlı bir değerlendirme sunmakta ve gelecekteki araştırma eğilimlerine dair önemli ipuçları sağlamaktadır.

4.1. Yayınların yıllara göre dağılımı

Dijital ikiz ve İSG konulu akademik yayınların 2019-2025 yılları arasındaki yıllık dağılımı Şekil 3'te sunulmaktadır.

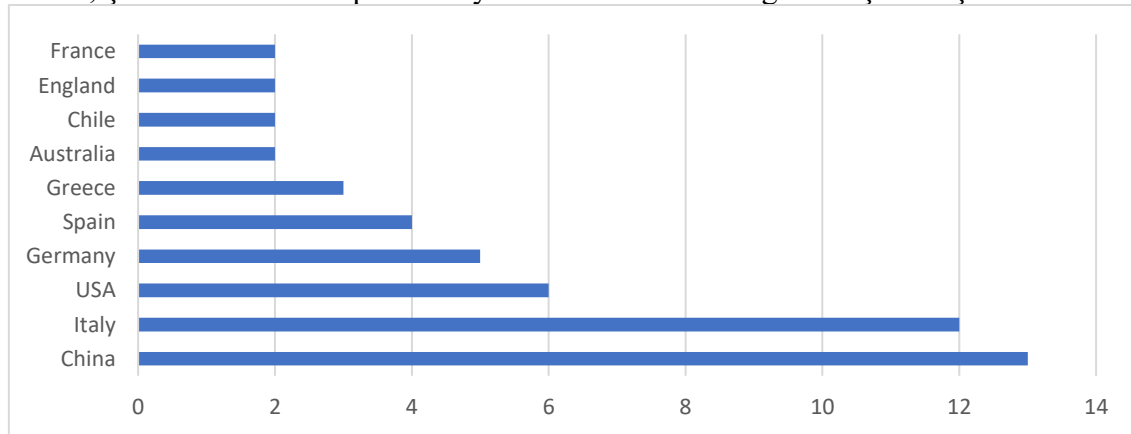


Şekil 3. 2019–2025 yılları arasında iş sağlığı ve güvenliği alanında dijital ikiz konulu yayınların yıllara göre dağılımı

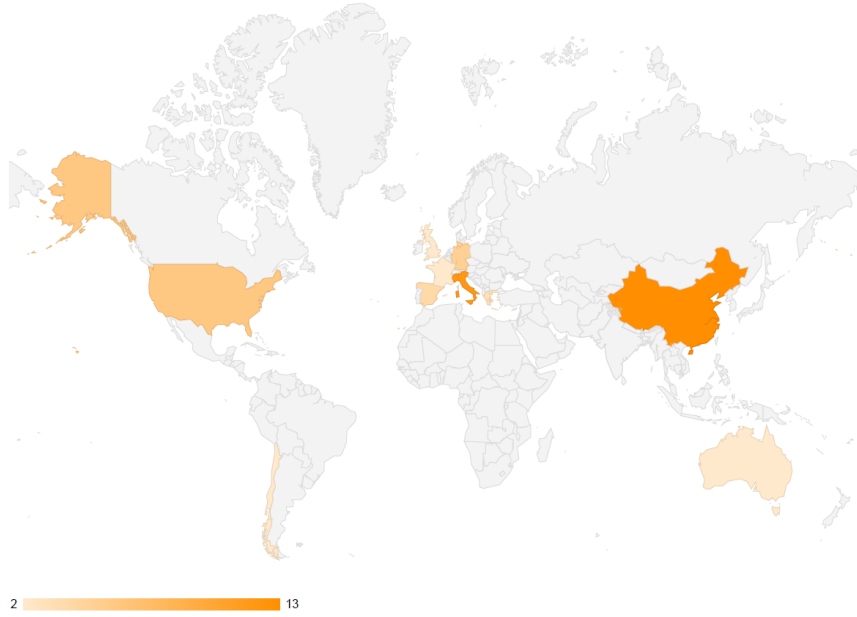
Yıllara göre yayın eğilimleri incelendiğinde, 2019 ve 2020 yıllarında konuya ilişkin akademik üretimin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, dijital ikiz teknolojilerinin İSG bağlamında henüz erken bir araştırma aşamasında olduğunu ve uygulama alanlarının yeni yeni şekillenmeye başladığını göstermektedir. Buna karşılık 2021 yılında yayın sayısında belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu artış, dijital ikiz teknolojilerinin sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, insan makine etkileşimi ve ergonomi odaklı uygulamalarla bütünleşmesinin akademik ilgiyi artırdığına işaret etmektedir. 2022 ve 2023 yıllarında yayın sayısının görece istikrarlı bir seyir izlediği görülmekte olup, bu dönem dijital ikiz temelli İSG çalışmalarının kavramsal olgunlaşma ve uygulama çeşitliliği kazandığı bir geçiş süreci olarak değerlendirilebilir. Bu yıllarda yapılan çalışmaların, daha çok modelleme, simülasyon ve eğitim odaklı uygulamalara yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. 2024 ve 2025 yıllarında ise dijital ikiz-İSG alanına yönelik akademik ilginin yeniden artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu artış, özellikle dijital ikiz tabanlı risk analizleri, önleyici güvenlik yaklaşımları, akıllı iş güvenliği sistemleri ve çalışan eğitim modellerinin araştırma gündeminde daha güçlü bir yer edinmeye başladığını ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, yayınların yıllara göre dağılımı dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanında giderek artan bir önem kazandığını ve bu alanın gelişen, dinamik bir araştırma sahası hâline geldiğini göstermektedir. Bu eğilim, dijital ikiz yaklaşımının gelecekte İSG uygulamalarında daha yaygın biçimde kullanılacağına ve akademik çalışmaların bu doğrultuda çeşitleneceğine işaret etmektedir.

4.2. Yayınların ülkelere göre dağılımı

Dijital ikiz ve İSG konulu akademik yayınların ülkelere göre dağılımı Şekil 4'te nicel olarak, Şekil 5'te ise choropleth dünya haritası formatında görselleştirilmiştir.



Şekil 4. Dijital ikiz ve İSG konulu yayınların ülkelere göre dağılımı



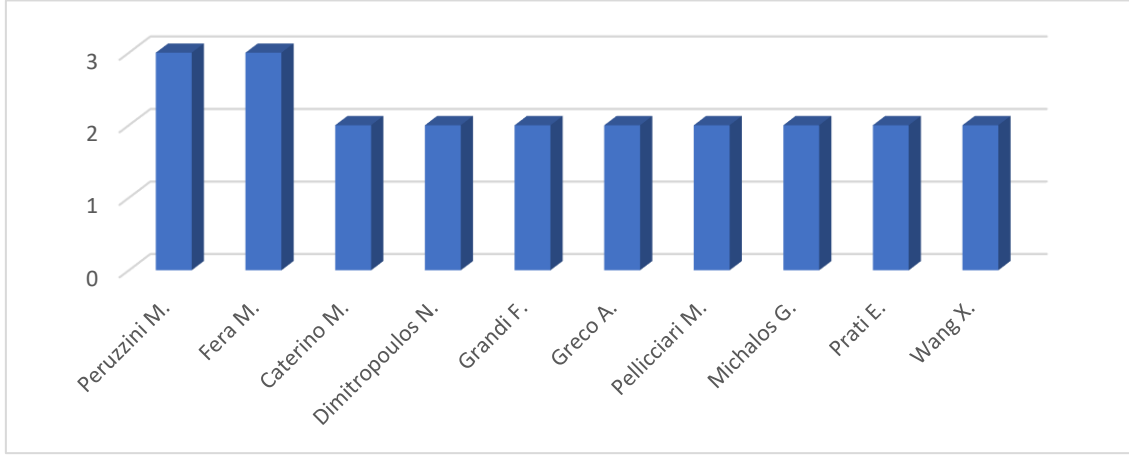
Şekil 5. Dijital ikiz ve İSG konulu yayınların küresel dağılımını gösteren choropleth dünya haritası

Şekil 5’te sunulan choropleth haritada, dijital ikiz-İSG literatürüne katkı sağlayan ülkelerin küresel ölçekteki dağılımı açık biçimde görülmektedir. Harita üzerindeki renk yoğunlukları, ülkelerin yayın üretim hacmini temsil etmekte olup, koyu tonlar daha yüksek bilimsel katkıyı ifade etmektedir. Bulgular incelendiğinde, Çin ($n = 13$) ve İtalya ($n = 12$), dijital ikiz temelli İSG araştırmalarında en yüksek yayın sayısına sahip ülkeler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, söz konusu ülkelerde dijital dönüşüm, akıllı üretim sistemleri ve endüstriyel güvenlik alanlarına yönelik yoğun akademik ve teknolojik yatırımların bir yansıması olarak değerlendirilebilir. Bunun yanı sıra Amerika Birleşik Devletleri ($n = 6$), Almanya ($n = 5$) ve İspanya ($n = 4$) gibi sanayileşmiş ülkelerin de literatüre anlamlı düzeyde katkı sağladığı görülmektedir. Bu ülkelerde gerçekleştirilen çalışmaların, çoğunlukla dijital ikiz tabanlı simülasyonlar, insan makine etkileşimi, ergonomik değerlendirmeler ve önleyici güvenlik stratejileri gibi uygulama odaklı temalara yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Daha sınırlı sayıda yayına sahip olmakla birlikte Yunanistan ($n = 3$), Avustralya ($n = 2$), Şili ($n = 2$), Birleşik Krallık ($n = 2$) ve Fransa ($n = 2$) gibi ülkelerin de küresel araştırma ağı içerisinde yer aldığı görülmektedir. Bu ülkelerdeki çalışmalar, dijital ikiz teknolojilerinin İSG bağlamındaki potansiyelini farklı sektörler ve uygulama alanları üzerinden ele alarak literatürün çeşitlenmesine katkı sunmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, ülkelere göre yayın dağılımı dijital ikiz teknolojilerinin yalnızca üretim ve mühendislik performansı odaklı değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği perspektifinden de küresel ölçekte artan bir akademik ilgi gördüğünü ortaya koymaktadır. Özellikle sanayileşmiş ve dijital dönüşüm süreçlerini hızla benimseyen ülkelerin literatürde öncü konumda yer alması, dijital ikiz tabanlı İSG uygulamalarının gelecekte daha yaygın ve disiplinler arası bir araştırma alanı hâline geleceğine işaret etmektedir.

4.3. En üretken yazarlar

Şekil 6’da sunulan bulgular, dijital ikiz ve İSG alanında en yüksek yayın üretimine sahip yazarların araştırmalarını ağırlıklı olarak ergonomi, insan makine etkileşimi, sanal ve artırılmış gerçeklik tabanlı eğitim uygulamaları ile akıllı üretim ve endüstri 4.0 sistemleri ekseninde yoğunlaştırdığını göstermektedir. Özellikle bazı araştırmacılar, dijital ikiz

teknolojilerinin insan faktörleri odaklı güvenlik analizleri, işyeri tasarımı ve risk değerlendirme süreçlerinde etkin bir metodolojik araç olarak benimsendiğini ortaya koymuştur [23]. Bununla birlikte, yüksek üretkenliğe sahip yazarların farklı mühendislik disiplinleri, ergonomi, bilişsel bilimler ve bilgi teknolojileri alanlarından gelmesi, dijital ikiz-İSG entegrasyonunun belirgin biçimde disiplinler arası bir araştırma karakteri taşıdığını göstermektedir. Bu durum, dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanında yalnızca teknik risklerin modellenmesiyle sınırlı kalmayıp, insan merkezli güvenlik yaklaşımlarının geliştirilmesine de önemli katkılar sunduğunu işaret etmektedir [24-25]



Şekil 6. Dijital ikiz ve İSG alanında en üretken yazarların yayın yoğunluğu

4.4. Kurumsal dağılım

Tablo 1 incelendiğinde, dijital ikiz ve iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki bilimsel yayınlara en fazla katkı sunan kurumların ağırlıklı olarak İtalya, Yunanistan, İspanya ve Hong Kong merkezli üniversitelerden oluştuğu görülmektedir. Bu kurumların, özellikle endüstri 4.0 uygulamaları, ergonomik risk analizleri, insan robot işbirliği ve akıllı üretim sistemleri gibi dijital ikiz teknolojilerinin temel bileşenleriyle doğrudan ilişkili araştırma alanlarında uzmanlaştığı dikkat çekmektedir. Kurumsal katkıların büyük ölçüde teknik üniversiteler ve mühendislik ağırlıklı araştırma merkezlerinden gelmesi, dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanında daha çok üretim süreçleri, çalışma ortamlarının simülasyonu ve insan merkezli güvenlik değerlendirmeleri kapsamında ele alındığını göstermektedir. Bununla birlikte, farklı coğrafyalardan ve disiplinlerden kurumların literatürde temsil edilmesi, dijital ikiz temelli İSG çalışmalarının çok disiplinli bir araştırma alanı haline geldiğini ve küresel ölçekte giderek artan bir akademik ilgi gördüğünü ortaya koymaktadır. Bu kurumsal dağılım, dijital ikiz teknolojilerinin farklı sektörlerdeki iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarına uyarlanabilirliğini vurgulamakta ve akademi endüstri iş birlikleri açısından önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

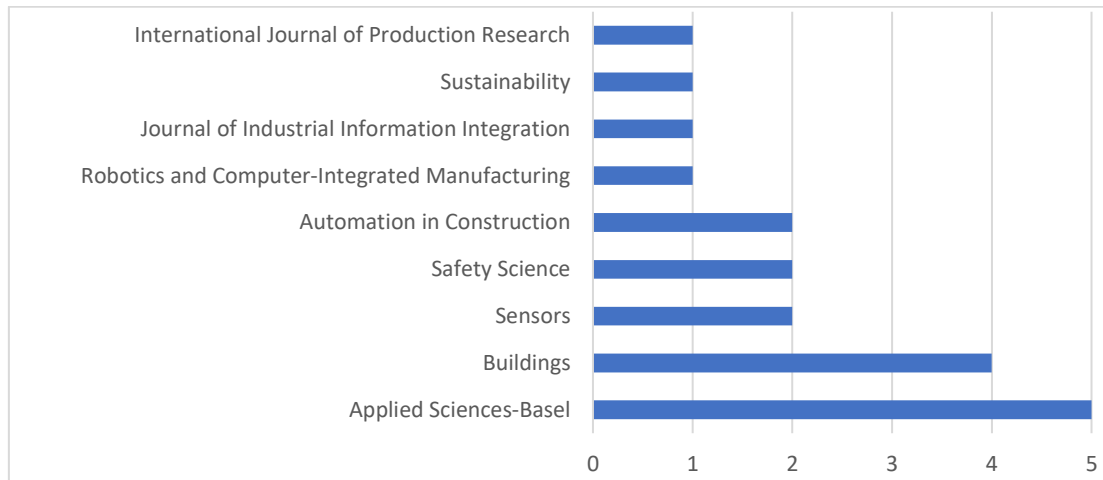
Tablo 1. Dijital ikiz ve İSG konulu yayınların kurumsal dağılımı

Kurum Adı	Yayın Sayısı	%
Università di Modena e Reggio Emilia	4	6.897
University of Patras	3	5.172
Università della Campania Vanvitelli	3	5.172
Hong Kong Polytechnic University	3	5.172
University of Bologna	2	3.448
Universitat Politècnica de Catalunya	2	3.448
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso	2	3.448
Diğer 90+ kurum	1	1.724

Tablo 1 incelendiğinde, dijital ikiz ve İSG alanındaki bilimsel yayınlara en fazla katkı sunan kurumların ağırlıklı olarak İtalya, Yunanistan, İspanya ve Hong Kong merkezli üniversitelerden oluştuğu görülmektedir. Bu kurumların, özellikle endüstri 4.0 uygulamaları, ergonomik risk analizleri, insan robot işbirliği ve akıllı üretim sistemleri gibi dijital ikiz teknolojilerinin temel bileşenleriyle doğrudan ilişkili araştırma alanlarında uzmanlaştığı dikkat çekmektedir. Kurumsal katkıların büyük ölçüde teknik üniversiteler ve mühendislik ağırlıklı araştırma merkezlerinden gelmesi, dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanında daha çok üretim süreçleri, çalışma ortamlarının simülasyonu ve insan merkezli güvenlik değerlendirmeleri kapsamında ele alındığını göstermektedir. Bununla birlikte, farklı coğrafyalardan ve disiplinlerden kurumların literatürde temsil edilmesi, dijital ikiz temelli İSG çalışmalarının çok disiplinli bir araştırma alanı haline geldiğini ve küresel ölçekte giderek artan bir akademik ilgi gördüğünü ortaya koymaktadır. Bu kurumsal dağılım, dijital ikiz teknolojilerinin farklı sektörlerdeki iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarına uyarlanabilirliğini vurgulamakta ve akademi endüstri iş birlikleri açısından önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

4.5. Yayınların dergilere göre dağılımı

Şekil 7’de, dijital ikiz ve İSG alanında yayımlanan çalışmaların yoğunlaştığı başlıca dergiler sunulmaktadır. Bulgular, Applied Sciences, Buildings ve Sensors dergilerinin bu alanda en fazla yayın barındıran akademik platformlar arasında yer aldığını göstermektedir. Söz konusu dergilerin; mühendislik bilimleri, yapım teknolojileri, sensör sistemleri, akıllı üretim süreçleri ve dijitalleşme temelli güvenlik uygulamalarını kapsayan geniş disiplinler arası yayın politikaları, dijital ikiz araştırmalarının doğasıyla yüksek düzeyde örtüşmektedir. Özellikle sensör tabanlı veri toplama, sanal fiziksel sistem entegrasyonu ve çalışma ortamlarının simülasyonu gibi konuların bu dergilerde yoğunlaşması, dijital ikiz teknolojilerinin İSG risklerinin izlenmesi, değerlendirilmesi ve önlenmesine yönelik uygulamalarda giderek daha fazla tercih edildiğini ortaya koymaktadır. Bu dağılım, dijital ikiz çalışmalarının yalnızca bilgi teknolojileri veya üretim odaklı bir yaklaşımla sınırlı kalmadığını; ergonomi, çalışan güvenliği, yapı güvenliği ve işyeri risk yönetimi gibi İSG’nin temel bileşenlerini kapsayan bütüncül bir araştırma çerçevesine evrildiğini göstermektedir. Dolayısıyla, ilgili dergiler dijital ikiz-İSG literatürünün gelişiminde merkezi bir rol üstlenmekte ve alanın bilimsel görünürlüğünü artırmaktadır.



Şekil 7. Dijital ikiz ve İSG konulu yayınların dergilere göre dağılımı

4.6. Araştırma alanlarına göre yayın dağılımı

Web of Science veri tabanından elde edilen sonuçlar incelendiğinde, dijital ikiz ve İSG konularını birlikte ele alan çalışmaların ağırlıklı olarak mühendislik temelli araştırma alanlarında yoğunlaştığı görülmektedir. Yayınların çok büyük bir kısmı mühendislik ana kategorisi altında sınıflandırılmış olup, bu alan toplam çalışmaların %96,55'ini (n=56) oluşturmaktadır. Bu bulgu, dijital ikiz uygulamalarının özellikle yapısal modelleme, süreç izleme, üretim güvenliği, risk analizi ve endüstriyel otomasyon gibi mühendislik altyapısı gerektiren İSG problemlerine odaklandığını göstermektedir. Mühendislik alanını takiben Bilgisayar Bilimleri (Computer Science) kategorisi %29,31 (n=17) oranıyla literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Dijital ikiz sistemlerinin; gerçek zamanlı veri işleme, sensör entegrasyonu, IoT, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı karar destek mekanizmalarıyla doğrudan ilişkili olması, bu alandaki yayın yoğunluğunu açıklayan temel faktörler arasında yer almaktadır. Buna ek olarak kimya, malzeme bilimi ve fizik disiplinlerinin her biri %22,41 (n=13) oranında temsil edilmiştir. Bu teknik alanlar; dijital ikizlerin çoklu fizik (multifizik) simülasyon yetenekleri, malzeme davranışlarının modellenmesi, kimyasal proses güvenliği ve endüstriyel risklerin öngörülmesine yönelik bilimsel altyapı sağlamaktadır. Analiz sonuçları ayrıca yöneylem araştırması ve yönetim bilimi, inşaat ve yapı teknolojileri, robotik, ergonomi ve iş güvenliği mühendisliği gibi alt alanlarda da belirli sayıda çalışmanın bulunduğunu ortaya koymaktadır. Daha sınırlı olmakla birlikte psikoloji, işletme ekonomisi ve halk sağlığı / çevresel ve iş sağlığı gibi sosyal ve sağlık temelli disiplinlerin de literatürde yer alması, dijital ikiz-İSG araştırmalarının yalnızca teknik boyutla sınırlı kalmadığını göstermektedir. Bu disiplinler arası dağılım, dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanında bütüncül bir yaklaşımla ele alındığını; teknik, yönetsel ve insan faktörlerini birlikte değerlendiren çok boyutlu bir araştırma ekseninin oluştuğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Yayınların araştırma alanlarına göre dağılımı (WoS, 2019–2025).

Araştırma Alanı	Kayıt Sayısı (n)
Mühendislik	56
Bilgisayar Bilimleri	17
Kimya	13
Malzeme Bilimi	13
Fizik	13
Yöneylem Araştırması ve Yönetim Bilimi	12
İnşaat ve Yapı Teknolojileri	9
Robotik	3
Matematik	2
İşletme Ekonomisi	1
Psikoloji	1
Halk Sağlığı / Çevresel ve İş Sağlığı	1
Diğer Bilim ve Teknoloji Konuları	1

4.7. Web of science kategorilerine göre yayın dağılımı

Web of Science (WoS) kategorileri esas alınarak yapılan analizler, dijital ikiz-İSG alanındaki çalışmaların belirgin biçimde üretim ve mühendislik odaklı disiplinlerde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, yayınların en yüksek oranda yer aldığı kategori Üretim Mühendisliği olup, toplam çalışmaların %32,75'ini (n=19) oluşturmaktadır. Bu bulgu, dijital ikiz teknolojilerinin üretim süreçlerinin sanal ortamda modellenmesi, proses kontrolü, hata ve arıza analizi, kestirimci bakım uygulamaları ve

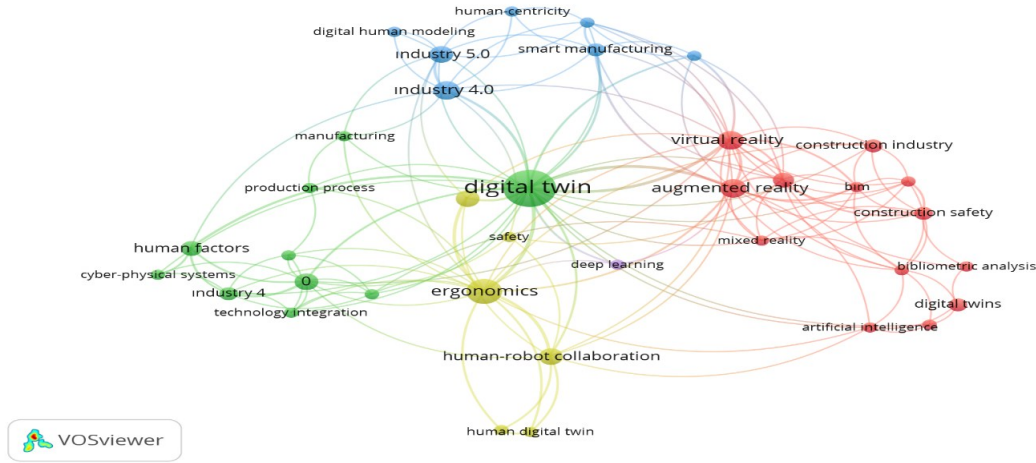
operasyonel süreç güvenliği gibi İSG bileşenlerinde etkin bir araç olarak kullanıldığını göstermektedir. Üretim mühendisliğini sırasıyla Bilgisayar Bilimleri Disiplinlerarası Uygulamalar (Computer Science Interdisciplinary Applications), Endüstri Mühendisliği (Engineering Industrial) ve Multidisipliner Mühendislik (Engineering Multidisciplinary) kategorileri takip etmekte olup, her biri %29,31 (n=17) oranında temsil edilmektedir. Bu kategorilerdeki yayınlar, dijital ikiz uygulamalarının siber fiziksel sistemler, karar destek mekanizmaları, üretim hatlarında simülasyon, gerçek zamanlı izleme ve veri odaklı güvenlik analizleriyle bütünleşik bir yapıda ele alındığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra Multidisipliner Kimya, Multidisipliner Malzeme Bilimi ve Uygulamalı Fizik (Physics Applied) kategorilerinde yer alan çalışmaların her biri %22,41 (n=13) oranında literatürde temsil edilmiştir. Bu alanlar, dijital ikiz teknolojilerinin çoklu fizik (multifizik) modelleme, malzeme davranışı tahmini, proses kimyası analizi ve tehlike öngörümü gibi ileri düzey teknik süreçlerde kullanıldığını göstermektedir. Ayrıca inşaat ve yapı teknolojisi ile inşaat mühendisliği kategorilerinde yer alan yayınlar (%15,51; n=9), dijital ikizlerin yapı güvenliği, risk analizi, acil durum senaryolarının modellenmesi, bina performansı değerlendirmesi ve inşaat sektörüne özgü İSG uygulamalarında giderek artan bir önem kazandığını ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, WoS kategori dağılımı dijital ikiz-İSG literatürünün üretim teknolojileri, mühendislik uygulamaları ve hesaplamalı modelleme ekseninde bütünleşik ve disiplinlerarası bir yapıda geliştiğini açıkça göstermektedir. Bu durum, dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanında hem operasyonel güvenlik hem de stratejik karar destek süreçlerinde temel bir araştırma ve uygulama paradigması haline geldiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Web of Science kategorilerine göre yayın dağılımı (WoS, 2019–2025).

Web of Science Kategorisi	Kayıt Sayısı (n)	Yüzde (%)
Üretim Mühendisliği (Engineering Manufacturing)	19	32,75%
Bilgisayar Bilimleri – Disiplinlerarası Uygulamalar	17	29,31%
Endüstri Mühendisliği	17	29,31%
Multidisipliner Mühendislik	17	29,31%
Multidisipliner Kimya	13	22,41%
Multidisipliner Malzeme Bilimi	13	22,41%
Uygulamalı Fizik	13	22,41%
Yöneylem Araştırması / Yönetim Bilimi	12	20,69%
İnşaat ve Yapı Teknolojisi	9	15,51%
İnşaat Mühendisliği	9	15,51%

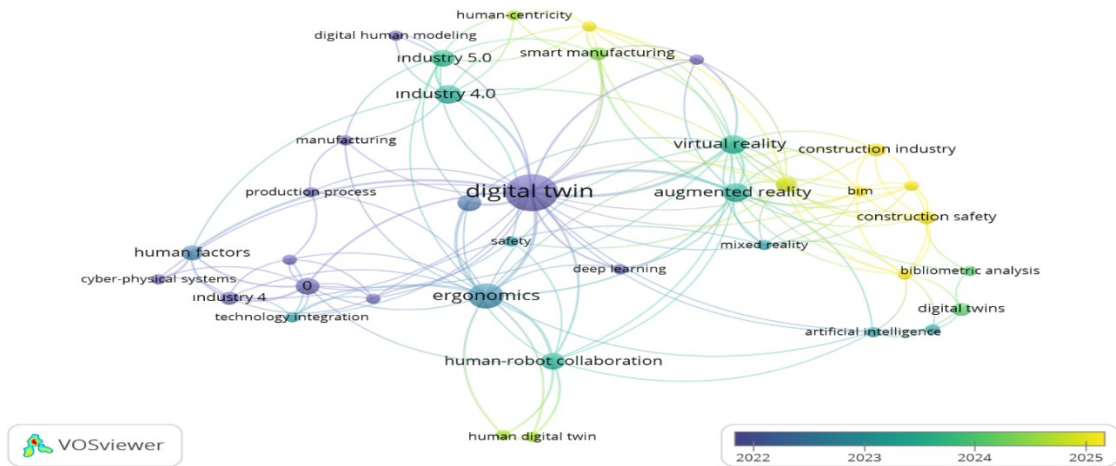
4.8. Anahtar kelime analizi bulguları

Anahtar kelimelerin eş oluşum analizine dayalı olarak oluşturulan ağ haritası (network visualization) Şekil 8’de sunulmuştur. Harita incelendiğinde, “digital twin” anahtar kelimesinin ağ yapısının merkezinde yer aldığı ve literatürdeki diğer kavramlarla yoğun ve güçlü bağlantılar kurduğu açıkça görülmektedir. Özellikle “ergonomics”, “virtual reality”, “augmented reality”, “human factors”, “industry 4.0”, “industry 5.0”, “construction safety” ve “artificial intelligence” anahtar kelimelerinin dijital ikiz kavramı ile yüksek düzeyde ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, dijital ikiz teknolojilerinin İSG alanında insan odaklı güvenlik yaklaşımları ve ileri dijital teknolojilerle bütünleşik biçimde ele alındığını göstermektedir.



Şekil 8. Anahtar kelimeler arasındaki eş-oluşum ilişkilerini gösteren ağ haritası.

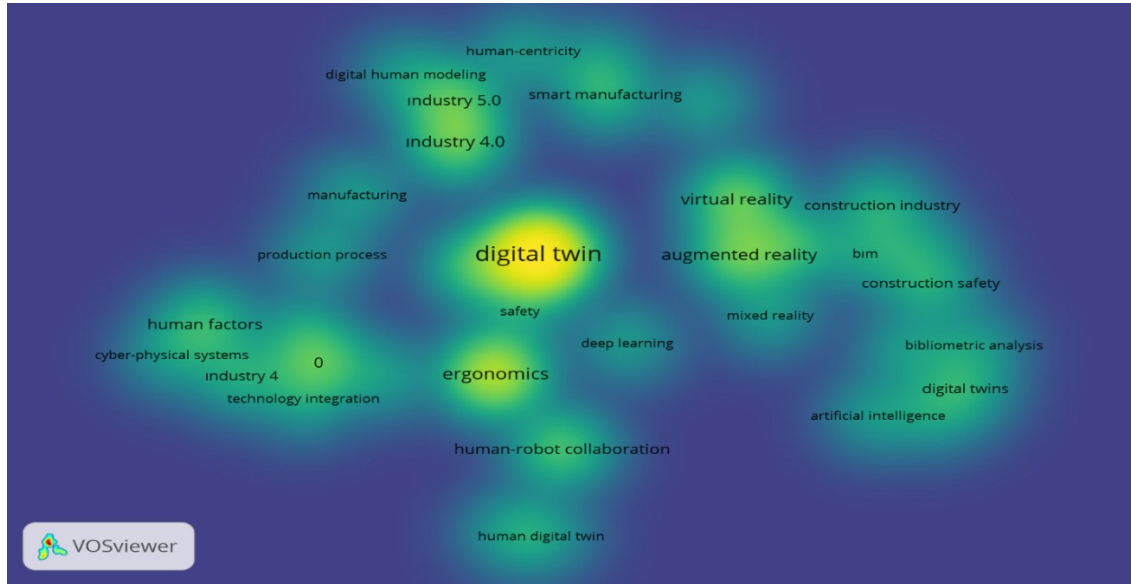
Şekil 9’da sunulan örtüşme haritası (overlay visualization), anahtar kelimelerin zaman içerisindeki kullanım eğilimlerini ortaya koymaktadır. Harita incelendiğinde, literatürün erken dönem çalışmalarında “industry 4.0”, “cyber-physical systems” ve “production process” gibi daha çok üretim ve sistem entegrasyonu odaklı kavramların ön plana çıktığı görülmektedir. Buna karşılık, son yıllarda yayımlanan çalışmalarda “virtual reality”, “augmented reality”, “construction safety”, “artificial intelligence” ve “bibliometric analysis” gibi kavramların daha sık kullanıldığı dikkat çekmektedir. Bu eğilim, dijital ikiz-İSG literatürünün zamanla daha etkileşimli, veri odaklı ve insan-merkezli uygulamalara yöneldiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Anahtar kelimelerin zaman içindeki araştırma eğilimlerini gösteren örtüşme

Anahtar kelimelerin kullanım sıklığına dayalı dağılımını gösteren yoğunluk haritası (density visualization) Şekil 10’da sunulmuştur. Haritada “digital twin” kavramı en yüksek yoğunluğa sahip anahtar kelime olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra “ergonomics”, “virtual reality” ve “augmented reality” kavramlarının da yüksek yoğunluk değerleri sergilediği belirlenmiştir. Bu bulgu, dijital ikiz uygulamalarının İSG literatüründe özellikle ergonomik değerlendirmeler, simüle edilmiş çalışma ortamları ve güvenli eğitim uygulamaları bağlamında yoğunlaştığını doğrulamaktadır. Tüm ağ,

örtüşme ve yoğunluk haritaları, VOSviewer yazılımı kullanılarak; benzerlik ölçütü olarak association strength ve kümelenme için smart local moving algoritması esas alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 10. Anahtar kelimelerin yoğunluk dağılımını gösteren yoğunluk haritası

Anahtar kelime analizinden elde edilen bulgular bütüncül olarak değerlendirildiğinde, dijital ikiz ve iş sağlığı güvenliği alanındaki çalışmaların belirgin biçimde çok disiplinli bir yapı sergilediği görülmektedir. Ağ, örtüşme ve yoğunluk haritaları birlikte ele alındığında; araştırma alanının yalnızca dijital modelleme ve simülasyon süreçleriyle sınırlı kalmadığı, aynı zamanda ergonomi, insan faktörleri, yapım güvenliği, artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamaları, yapay zekâ temelli analizler ve insan robot iş birliği gibi geniş bir tematik çerçevede geliştiği anlaşılmaktadır. Örtüşme haritasında son yıllarda öne çıkan sarı tonların özellikle artırılmış gerçeklik, yapay zekâ, yapım güvenliği ve insan robot etkileşimi kavramları üzerinde yoğunlaşması, dijital ikiz tabanlı İSG çalışmalarının giderek daha teknolojik, etkileşimli ve insan merkezli bir yaklaşıma evrildiğini göstermektedir. Yoğunluk haritası ise literatürün kavramsal merkezinde “digital twin”, “ergonomics”, “virtual reality” ve “augmented reality” gibi anahtar kavramların yer aldığını doğrulamaktadır. Bu kavramların yüksek tekrar oranları, dijital ikiz uygulamalarının İSG alanında güvenliğin iyileştirilmesi, risklerin önceden tahmin edilmesi, insan makine etkileşiminin optimize edilmesi ve eğitim simülasyonlarının geliştirilmesi gibi kritik hedeflere odaklandığını ortaya koymaktadır. Genel olarak elde edilen sonuçlar, dijital ikiz teknolojisinin iş sağlığı ve güvenliği alanında giderek daha stratejik bir araç hâline geldiğini; çalışma ortamlarının sanal olarak modellenmesi, tehlikeli senaryoların risk oluşturmadan test edilmesi ve çalışan performansının iyileştirilmesi gibi uygulamalar aracılığıyla literatüre önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda dijital ikiz, hem teknolojik dönüşümün hem de çağdaş İSG yaklaşımlarının merkezinde yer alan temel bir araştırma eksenini konumlanmaktadır.

5. Sonuçlar, tartışma ve uygulama çıkarımları

Bu çalışma, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) literatüründeki konumunu bibliyometrik bir yaklaşımla inceleyerek alanın mevcut bilimsel yapısını,

tematik eğilimlerini ve gelişim dinamiklerini sistematik biçimde ortaya koymuştur. Web of Science Core Collection veri tabanında 2019–2025 yılları arasında yayımlanan 58 akademik çalışmanın analizi sonucunda, dijital ikiz uygulamalarının özellikle ergonomi, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, insan robot iş birliği ve akıllı üretim sistemleri gibi İSG ile doğrudan ilişkili temalarda yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bulgular, dijital ikiz teknolojisinin yalnızca üretim verimliliğini artırmaya yönelik bir araç olmaktan öte; risk tahmini, tehlike analizi, ergonomik iyileştirme ve çalışan güvenliğinin geliştirilmesi gibi kritik İSG süreçlerinde giderek daha stratejik bir rol üstlendiğini göstermektedir. Anahtar kelime eş oluşturma analizleri ve görselleştirme haritaları, literatürde belirgin kavramsal kümelenmelerin oluştuğunu ve araştırmaların insan merkezli güvenlik yaklaşımları, etkileşimli dijital ortamlar ve veri temelli risk yönetimi ekseninde yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Yıllara ve ülkelere göre dağılım analizleri ise dijital ikiz-İSG kesişimindeki akademik ilginin son yıllarda belirgin bir ivme kazandığını göstermektedir. Bu durum, dijital ikiz yaklaşımının güvenlik yönetimi açısından büyüyen bir araştırma ve uygulama potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmanın bulguları, yönetsel ve uygulama düzeyinde önemli çıkarımlar sunmaktadır. Dijital ikiz teknolojileri, İSG yöneticilerine ve karar vericilere proaktif ve veri temelli bir güvenlik yönetim modeli geliştirme imkânı sağlamaktadır. Fiziksel çalışma ortamlarının dijital ortamdaki dinamik temsilleri sayesinde, potansiyel tehlikeler gerçekleşmeden önce modellenilebilmekte; farklı senaryolar sanal ortamda test edilerek riskler minimize edilebilmektedir. Bu yaklaşım, geleneksel reaktif güvenlik anlayışından öngörücü ve önleyici bir İSG kültürüne geçişi desteklemektedir. Özellikle yüksek riskli sektörlerde dijital ikiz uygulamaları; insan makine etkileşimlerinin optimize edilmesi, ergonomik tasarım süreçlerinin iyileştirilmesi ve tehlikeli görevlerin sanal ortamda simüle edilmesi yoluyla iş kazalarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. VR/AR entegrasyonlu dijital ikiz sistemleri, çalışanların güvenli bir ortamda risk senaryolarını deneyimlemelerine olanak tanıyarak eğitim süreçlerinin etkinliğini artırabilir. Bu bağlamda dijital ikiz teknolojilerinin, kurumların İSG performans göstergelerini iyileştirmede stratejik bir araç olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Bununla birlikte çalışma, yalnızca Web of Science Core Collection veri tabanındaki yayınlarla sınırlandırılmış olup; konferans bildirileri, kitap bölümleri ve diğer veri tabanlarında yer alan çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Ayrıca bibliyometrik analiz yöntemi gereği çalışmaların içeriksel derinliği ve metodolojik ayrıntıları nitel olarak incelenmemiştir. Gelecek araştırmalarda, farklı veri tabanlarının entegre edildiği geniş kapsamlı analizlerin yanı sıra, dijital ikizlerin İSG uygulamalarındaki etkinliğini ölçen deneysel ve saha temelli çalışmaların artırılması önerilmektedir. Özellikle yapay zekâ destekli risk tahmini, acil durum simülasyonları, insan robot iş birliği güvenliği ve dijital ikiz tabanlı ergonomik optimizasyon konuları alanın derinleşmesine önemli katkılar sunacaktır. Sonuç olarak bu çalışma, dijital ikiz teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği alanında yalnızca destekleyici bir dijital araç değil; karar verme süreçlerini güçlendiren, riskleri öngören ve insan-merkezli güvenlik anlayışını pekiştiren bütünsel bir yönetim yaklaşımı olarak konumlandığını ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1] Ramasubramanian, A. K., Mathew, R., Kelly, M., Hargaden, V. ve Papakostas, N., Digital twin for human–robot collaboration in manufacturing: Review and outlook, **Applied Sciences**, 12, 10, 4811, (2022).

- [2] Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. ve Hicks, B., Characterising the digital twin: A systematic literature review, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 29, 36–52, (2020).
- [3] Park, J. S., Lee, D. G., Jimenez, J. A., Lee, S. J. ve Kim, J. W., Human-focused digital twin applications for occupational safety and health in workplaces: A brief survey and research directions, **Applied Sciences**, 13, 7, 4598, (2023).
- [4] Grieves, M. ve Vickers, J., Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems, Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, 85–113, **Springer International Publishing, Cham**, (2016).
- [5] Pan, Y. ve Zhang, L., A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management, **Automation in Construction**, 124, 103564, (2021).
- [6] Kumaş, E. ve Erol, S., Endüstri 4.0’da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler, **Politeknik Dergisi**, 24, 2, 691–701, (2021).
- [7] Duman, M. Ç., İşletmeler için yeni bir verimlilik teknolojisi: Dijital ikiz, **Verimlilik Dergisi**, 189–206, (2022).
- [8] Şahin, H. ve Eldem, C., Otobüslerde ergonomik koltuk tasarımı için dijital insan modellerinin kullanımı, **IKSAD Publishing House**, Türkiye, ISBN: 978-625-6955-91-2, (2022).
- [9] Tao, F., Zhang, H., Liu, A. ve Nee, A. Y., Digital twin in industry: State-of-the-art, **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 15, 4, 2405–2415, (2018).
- [10] Badri, A., Boudreau-Trudel, B. ve Souissi, A. S., Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern?, **Safety Science**, 109, 403–411, (2018).
- [11] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. ve Sihn, W., Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, **IFAC-PapersOnLine**, 51, 11, 1016–1022, (2018).
- [12] Bayer, H., Aracı, F. G. İ. ve Gürkan, G., Dijital ikizlerin eğitimde kullanımı: Kavramsal boyut, kullanım alanları ve etik açıdan kapsamlı bir değerlendirme, **İnönü Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi**, 26, 3, 2019–2060, (2025).
- [13] Rasheed, A., San, O. ve Kvamsdal, T., Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective, **IEEE Access**, 8, 21980–22012, (2020).
- [14] Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchey, E. P., Qiao, Y., Murray, N. ve Devine, D., Digital twin: Origin to future, **Applied System Innovation**, 4, 2, 36, (2021).
- [15] Barricelli, B. R., Casiraghi, E. ve Fogli, D., A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications, **IEEE Access**, 7, 167653–167671, (2019).
- [16] Rojas, L., Peña, Á. ve Garcia, J., AI-driven predictive maintenance in mining: A systematic literature review on fault detection, digital twins, and intelligent asset management, **Applied Sciences**, 15, 6, 3337, (2025).
- [17] Majeed, H. ve Iftikhar, T., Industry 6.0 in aerospace, defense, military, and automotive smart manufacturing, Intelligent Manufacturing in Industry 6.0: A Climate Resilience Approach, 391–464, **Springer Nature Switzerland, Cham**, (2026).
- [18] Liu, W., Wu, M., Wan, G. ve Xu, M., Digital twin of space environment: Development, challenges, applications, and future outlook, **Remote Sensing**, 16, 16, 3023, (2024).
- [19] Vidyalakshmi, G., Gopikrishnan, S., Boulila, W., Koubaa, A. ve Srivastava, G., Digital twins and cyber-physical systems: A new frontier in computer modeling, **Computer Modeling in Engineering & Sciences**, 143, 1, 51, (2025).

- [20] Negri, E., Fumagalli, L. ve Macchi, M., A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems, **Procedia Manufacturing**, 11, 939–948, (2017).
- [21] Forthofer, R. N., & Lehnen, R. G. Rank correlation methods. In Public program analysis: A new categorical data approach, **MA: Springer US**, 146-163, (1981).
- [22] Orduña-Malea, E. ve Costas, R., Link-based approach to study scientific software usage: The case of VOSviewer, **Scientometrics**, 126, 9, 8153–8186, (2021).
- [23] Peruzzini, M., Bilancia, P., Majić, T., Ostrosi, E. ve Stjepandić, J., Human-centric digital twin: A transdisciplinary view, **Advances in Transdisciplinary Engineering**, 41, 923–932, (2023).
- [24] Wu, S., Enhancing construction workforce safety through formulating an augmented reality digital twin system, Doktora Tezi, **RMIT University**, (2024).
- [25] Zahid, A., Ferraro, A., Petrillo, A. ve De Felice, F., Exploring the role of digital twin and industrial metaverse technologies in enhancing occupational health and safety in manufacturing, **Applied Sciences**, 15, 15, 8268, (2025).
- [26] Çakır, E., Türkiye’de İş Sağlığı ve Güvenliği Alanında Yapılan Lisansüstü Tezlerin Bibliyometrik Analizi, **Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi**, 12(3), 1145–1156, (2023).
- [27] Yazıcı, M. ve Tekin, A., İş Sağlığı ve Güvenliği Konulu Akademik Yayınların Bibliyometrik Analizi: Ulusal Literatür Üzerine Bir İnceleme", **Doğuş Üniversitesi Dergisi**, 25(1), 85–102, (2024).