

mgr inż. Zuzanna Woźniak^{1*)}

ORCID: 0000-0002-0168-5684

dr inż. Tomasz Nowobilski¹⁾

ORCID: 0000-0002-0599-7108

Current Research Directions on the Application of Artificial Intelligence in Construction in the Context of Occupational Safety

Aktualne kierunki badań nad zastosowaniem sztucznej inteligencji w budownictwie w kontekście bezpieczeństwa pracy

DOI: 10.15199/33.2025.03.03

Abstract: The aim of the research was to investigate the current possibilities of using artificial intelligence (AI) in processes related to occupational safety in construction. Previous research on the use of AI in the construction sector has shown the high effectiveness of these methods, including: big data analysis, training and education. The implementation of AI in construction can significantly improve occupational safety. However, it is necessary to take into account ethical aspects and develop appropriate legal regulations.

Keywords: construction; occupational health and safety; artificial intelligence; AI; accidents at work.

Streszczenie: Celem badań było zbadanie aktualnych możliwości zastosowania sztucznej inteligencji (AI) w procesach związanych z bezpieczeństwem pracy w budownictwie. Dotychczasowe badania dotyczące zastosowania AI w sektorze budownictwa wykazały dużą skuteczność tych metod m.in. w analizie dużych zbiorów danych, szkoleniach i edukacji. Wdrożenie AI w budownictwie może znacznie poprawić bezpieczeństwo pracy. Konieczne jest jednak uwzględnienie aspektów etycznych oraz opracowanie odpowiednich regulacji prawnych.

Słowa kluczowe: budownictwo; bezpieczeństwo i higiena pracy; sztuczna inteligencja; AI; wypadki przy pracy.

In the construction sector, there are an average of about 60,000 fatal accidents per year worldwide [1], which statistically means that there is one fatal accident approximately every 10 minutes. The work environment in construction is characterized by a large number of hazards, resulting primarily from the complexity and diversity of the tasks performed and the difficult working conditions on construction sites [2÷4]. Due to unfavourable accident statistics, construction is widely considered to be one of the most dangerous sectors of the economy [5, 6].

The high frequency of accidents at work is due to the dynamic nature of the work environment and the exposure of employees to numerous risk factors, such as working at heights, operating heavy machinery or contact with hazardous substances [7]. These events generate many losses, both material and non-material. In 2023 alone, the number of days of incapacity for work in Poland in the construction industry amounted to 167,486, which is 158.68 days per 1,000 employees [6]. Material losses due to an accident at work are only the tip of the iceberg [4]. Losses related to the loss of a loved one, pain and suffering due to an accident at work are very difficult to estimate. Analysis of statistical data for 2023 in Poland showed that the construction sector was characterized by the highest rate of fatal accidents (Figure 1a). It is worth noting that despite the common perception of the mining sector as the most dangerous area of

W sektorze budowlanym na całym świecie odnotowuje się średnio ok. 60 000 wypadków śmiertelnych rocznie [1], co statystycznie oznacza, że co około 10 minut zdarza się 1 wypadek śmiertelny. Środowisko pracy w budownictwie cechuje się dużą liczbą zagrożeń, wynikających przede wszystkim ze złożoności i różnorodności realizowanych zadań oraz trudnymi warunkami pracy panującymi na placach budowy [2÷4]. Ze względu na niekorzystne statystyki wypadkowości, budownictwo jest powszechnie uznawane za jeden z najbardziej niebezpiecznych sektorów gospodarki [5, 6].

Duża częstotliwość wypadków przy pracy wynika z dynamicznego charakteru środowiska pracy oraz ekspozycji pracowników na liczne czynniki ryzyka, takie jak praca na wysokości, obsługa ciężkich maszyn czy kontakt z niebezpiecznymi substancjami [7]. Zdarzenia te generują wiele strat, zarówno materialnych, jak i niematerialnych. Tylko w 2023 r. w Polsce liczba dni niezdolności do pracy w budownictwie wyniosła 167 486, co w przeliczeniu na każde 1000 osób pracujących wynosi 158,68 dni [6]. Straty materialne w związku z zaistnieniem wypadku przy pracy, to tylko wierzchołek góry lodowej [4]. Straty związane z utratą bliskiej osoby, bólem i cierpieniem w związku z wypadkiem przy pracy są bardzo trudne do oszacowania. Analiza danych statystycznych za 2023 r. w Polsce wykazała, że sektor budownictwa charakteryzował się najwyższym wskaźnikiem wypadków śmiertelnych (rysunek 1a). Warto zaznaczyć, że pomimo powszechnego postrzegania sektora górniczego jako najbardziej niebezpiecznego obszaru zatrudnienia, dane z 2023 r.

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Correspondence address: zuzanna.wozniak@pwr.edu.pl

employment, data from 2023 shows that the sector had significantly fewer fatal accidents than construction.

However, it is encouraging that the number of all accidents at work in construction in recent years has been decreasing (Figure 1b). Unfortunately, achieving the goal of the „zero accidents” initiative still remains a distant prospect. In the face of the changing construction industry, the research methods currently used are insufficient. Therefore, there is a need to intensify preventive measures and implement effective strategies for managing occupational health and safety in the construction sector.

In the face of the large number of accidents at work, the construction industry is beginning to recognize the potential of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML). These technologies offer new possibilities in the process of data analysis, threat forecasting and process optimization. Artificial intelligence (AI) is currently used in various industrial sectors, which contributes to significant improvements in operational efficiency and quality while ensuring work safety. These effects were emphasized in the research by Sultanow et al. [8], who describe the use of robots (so-called Cobots) working in a shared space with people.

Artificial intelligence is a rapidly developing field of computer science focused on creating systems capable of imitating and performing tasks that require human-like intelligence [9]. The development of artificial intelligence dates back to 1956 [10]. It is estimated that AI technologies will impact current jobs [11] and cause another industrial revolution [12, 13].

The aim of this article is to present the current state of knowledge and identify the latest trends in the field of artificial intelligence. The research focuses on the analysis of the role of AI in the transformation of construction, with particular emphasis on its impact on improving work safety.

Research method

The research method consisted of three stages. In the first stage, a database of publications indexed in the Scopus database was

wykazują, że sektor ten charakteryzował się znacznie mniejszą liczbą wypadków śmiertelnych niż budownictwo.

Pocieszający jest jednak fakt, że liczba wszystkich wypadków przy pracy w budownictwie w ostatnich latach wykazuje tendencję malejącą (rysunek 1b.) Niestety, osiągnięcie celu w postaci inicjatywy „zero wypadków” pozostaje w dalszym ciągu odległą perspektywą. W obliczu zmieniającego się budownictwa, obecnie stosowane metody badań są niewystarczające. Istnieje zatem potrzeba intensyfikacji działań prewencyjnych oraz wdrożenia efektywnych strategii zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy w sektorze budowlanym.

W obliczu dużej liczby wypadków przy pracy, budownictwo zaczyna dostrzegać potencjał, jaki niesie ze sobą sztuczna inteligencja (ang. Artificial Intelligence – AI) oraz uczenie maszynowe (ang. Machine Learning – ML). Technologie te oferują nowe możliwości w procesie analizy danych, prognozowania zagrożeń oraz optymalizacji procesów. Sztuczna inteligencja (AI) znajduje obecnie zastosowanie w różnych sektorach przemysłu, co przyczynia się do znacznej poprawy efektywności oraz jakości operacyjnej przy zapewnieniu bezpieczeństwa pracy. Te efekty podkreślone zostały w badaniach Sultanowa i in. [8], którzy opisują wykorzystanie robotów (tzw. Cobotów), pracujących na wspólnej przestrzeni z ludźmi.

Sztuczna inteligencja jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną informatyki koncentrującą się na tworzeniu systemów zdol-

nych do naśladowania i wykonywania zadań wymagających inteligencji typowej dla ludzi [9]. Rozwój sztucznej inteligencji datuje się od 1956 r. [10]. Szacuje się, że technologie AI wpłyną na obecne miejsca pracy [11] i spowodują kolejną rewolucję przemysłową [12, 13].

Celem artykułu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy oraz identyfikacja najnowszych trendów w obszarze zastosowania sztucznej inteligencji. Badania koncentrują się na analizie roli AI w transformacji budownictwa, ze szczególnym uwzględnieniem jej wpływu na poprawę bezpieczeństwa pracy.

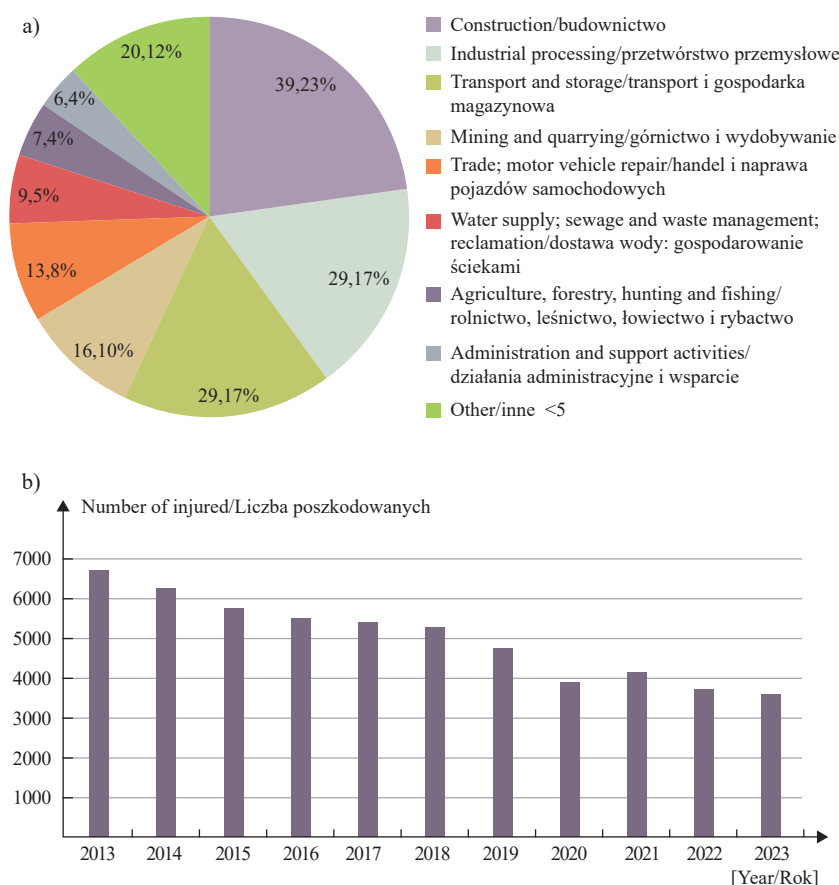


Fig. 1. Summary of: a) fatal accidents in 2023; b) injured in the years 2013-2023 according to the Central Statistical Office data [6]

Rys. 1. Zestawienie: a) wypadków śmiertelnych w 2023 r.; b) poszkodowanych w latach 2013–2023 wg danych GUS [6]

developed. The search was carried out using a combination of keywords: „construction industry”, „artificial intelligence”, „occupational safety”, „health and safety” and „AI”, searched for in the titles, abstracts and keywords of articles. It was decided to focus on the latest achievements in the analysed area, therefore only English-language publications published from January 2020 to the end of January 2025 were included in the database. Ultimately, the database subjected to further analysis included 99 items.

The second stage of the study included the identification of current trends and research directions based on a detailed analysis of the database content and the co-occurrence of keywords using VOSviewer software. The analysis included all keywords present in the database, both those declared by the authors of the publication and those assigned in the indexing process. The full counting method was used. 34 terms were qualified for analysis. The visualization of the keyword co-occurrence network (Figure 2a) reveals the structure of the thematic connections in the studied area.

The third stage of the research was devoted to discussing the results, identifying research gaps and formulating conclusions.

The use of artificial intelligence in civil engineering

Based on the analysis of the quality of publications from the database and the map of keyword co-occurrence, 5 main areas of research conducted by scientists in the last 5 years were identified, which are presented in Figure 2b. These are the following aspects: (1) ergonomics and employee health protection; (2) analysis and processing of data sets; (3) training and education in the field of occupational health and safety; (4) occupational health and safety management in construction; (5) risk management.

Bibliometric analysis of keyword co-occurrences. The centrality of the term “construction industry” and its strong association with “artificial intelligence” confirm that AI integration in the construction sector is an important area of exploration. The strong relationship between “artificial intelligence” and “deep learning” suggests that deep learning methods are intensively studied and used in the context of construction. Furthermore, the association of “artificial intelligence” with “safety” and “accident prevention” indicates a clear drive to improve construction safety through the use of AI-based systems.

The map analysis also reveals that “object detection” appears in relation to “construction sites”, suggesting that AI-based vision systems are being used to monitor construction sites and identify potential hazards. The co-occurrence of the terms “machine learning” and “forecasting” may indicate the use of machine learning algorithms for risk prediction, construction process optimization, or cost forecasting.

Qualitative analysis of the content of publications. A key application of artificial intelligence in construction is **monitoring the state of occupational safety in order to improve ergonomics and protect the health of employees** [14]. In addition to the ongoing assessment of the physical and mental condition of employees, these technologies can also contribute

Metoda badań

Metoda badań obejmowała trzy etapy. W pierwszym opracowano bazę publikacji indeksowanych w bazie Scopus. Wyszukiwanie zrealizowano, wykorzystując kombinację słów kluczowych: „construction industry”, „artificial intelligence”, „occupational safety”, „health and safety” oraz „AI”, poszukiwanych w tytułach, abstraktach oraz słowach kluczowych artykułów. Postanowiono skupić się na najnowszych osiągnięciach w analizowanym obszarze, dlatego też do bazy włączono wyłącznie publikacje anglojęzyczne opublikowane od stycznia 2020 r. do końca stycznia 2025 r. Ostatecznie, baza danych poddana dalszej analizie obejmowała 99 pozycji.

Drugi etap badań obejmował identyfikację aktualnych trendów i kierunków badań na podstawie szczegółowej analizy treści bazy danych oraz współwystępowania słów kluczowych z wykorzystaniem oprogramowania VOSviewer. W analizie uwzględniono wszystkie słowa kluczowe obecne w bazie danych, zarówno zadeklarowane przez autorów publikacji, jak i przypisane w procesie indeksowania. Zastosowano metodę pełnego zliczania (ang. *full counting*). Do analizy zakwalifikowano 34 terminy. Wizualizacja sieci współwystępowania słów kluczowych (rysunek 2a) ujawnia strukturę powiązań tematycznych w badanym obszarze.

Trzeci etap badań poświęcony był dyskusji wyników, identyfikacji luk badawczych oraz sformułowaniu wniosków.

Wykorzystanie sztucznej inteligencji w inżynierii lądowej

Na podstawie analizy jakości publikacji z bazy danych oraz mapy współwystępowania słów kluczowych zidentyfikowano 5 głównych obszarów badań naukowców z ostatnich pięciu lat, które przedstawiono na rysunku 2b. Są to aspekty: (1) ergonomiczne i ochrona zdrowia pracowników; (2) analiza i przetwarzanie zbiorów danych; (3) szkolenia i edukacja w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy; (4) zarządzanie bezpieczeństwem pracy w budownictwie; (5) zarządzanie ryzykiem.

Bibliometryczna analiza współwystępowania słów kluczowych. Centralne położenie terminu „construction industry” (przemysł budowlany) oraz jego silne powiązanie z „artificial intelligence” (sztuczna inteligencja) potwierdza, że integracja AI w sektorze budowlanym stanowi istotny obszar eksploracji. Silne relacje między „artificial intelligence” a „deep learning” (uczenie głębokie) sugerują, że metody uczenia głębokiego są intensywnie badane i wykorzystywane w kontekście budownictwa. Ponadto, połączenie „artificial intelligence” z „safety” (bezpieczeństwo) i „accident prevention” (zapobieganie wypadkom) wskazuje na wyraźne dążenie do poprawy bezpieczeństwa na budowach przez zastosowanie systemów bazujących na AI.

Analiza mapy ujawnia również, że „object detection” (wyrzutowanie obiektów) pojawia się w relacji z „construction sites” (teren budowy), co sugeruje, że systemy wizyjne bazujące na AI są wykorzystywane do monitorowania terenu budowy i identyfikacji potencjalnych zagrożeń. Współwystępowanie terminów „machine learning” (uczenie maszynowe) i „forecasting” (prognozowanie) może wskazywać na zastosowa-

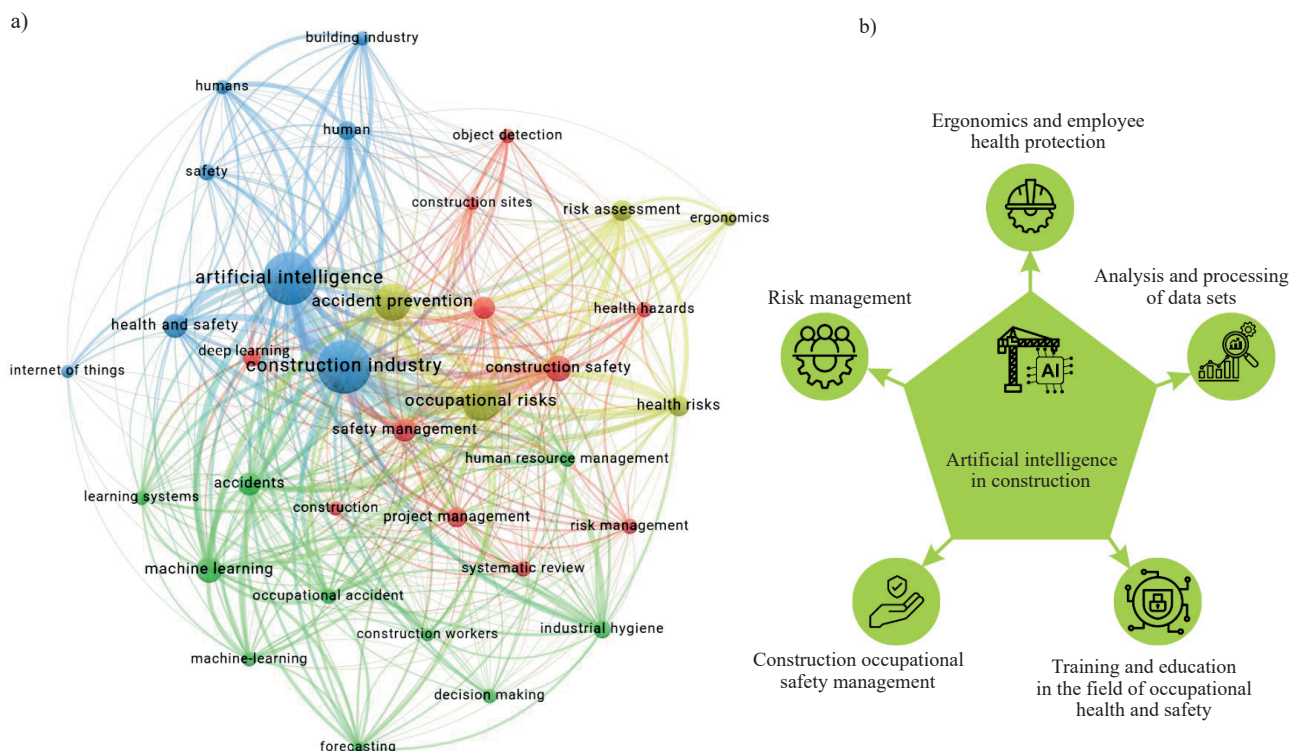


Fig. 2. Co-occurrence map of keywords related to the use of AI in construction, generated using VOSviewer (a); defined research areas where AI is used in construction (own work) (b)

Rys. 2. Mapa współwystępowania słów kluczowych dotyczących zastosowania AI w budownictwie, wygenerowana za pomocą programu VOSviewer (a); zdefiniowane obszary badawcze, w których wykorzystywana jest AI w budownictwie (opracowanie własne) (b)

to increased work efficiency [15]. In this context, wristbands, head-mounted sensors and smart clothing play an important role. They enable the collection of physiological and psychophysical data of employees. The collected information is then analysed by artificial intelligence algorithms, which allows for the identification of factors such as stress, fatigue and other potential threats affecting work safety and efficiency. It is also possible to reduce musculoskeletal injuries and increase the level of employee safety through early detection of irregularities, including the identification of high-risk areas. This approach allows for the adjustment of working conditions to the ergonomic needs of employees, minimizing workloads and improving their comfort and efficiency [16].

There is great interest among scientists in monitoring compliance with occupational health and safety rules using camera images. You Only Look Once (YOLO) and other algorithms are used for this purpose. Rabbi and Jeelani [17] in their analysis of 153 publications emphasize the use of deep neural networks for real-time monitoring and threat detection. Systems using AI enable continuous monitoring of working conditions on construction sites, using data from Internet of Things (IoT) sensors and cameras. Machine learning algorithms analyse this data in real-time, detecting potential threats. Among others, detection of the absence of safety helmets [18] and safety harnesses and harnesses [19] has been developed.

Another area of research is **the use of AI for data analysis and processing** (the ability to analyse large sets used to ana-

nie algorytmów uczenia maszynowego do przewidywania ryzyka, optymalizacji procesów budowlanych lub prognozowania kosztów.

Jakościowa analiza treści publikacji. Kluczowym zastosowaniem sztucznej inteligencji w budownictwie jest **monitoring stanu bezpieczeństwa pracy w celu poprawy ergonomii i ochrony zdrowia pracowników** [14]. Oprócz bieżącej oceny kondycji fizycznej i psychicznej pracowników, technologie te mogą również przyczyniać się do zwiększenia wydajności pracy [15]. W tym kontekście istotną rolę odgrywają opaski na nadgarstek, czujniki montowane na głowie oraz inteligentna odzież. Umożliwiają one gromadzenie danych fizjologicznych i psychofizycznych pracowników. Zebrane informacje są następnie analizowane przez algorytmy sztucznej inteligencji, co pozwala na identyfikację czynników takich, jak stres, zmęczenie oraz inne potencjalne zagrożenia wpływające na bezpieczeństwo i efektywność pracy. Możliwa jest również redukcja urazów mięśniowo-szkieletowych oraz zwiększenie poziomu bezpieczeństwa pracowników przez wczesne wykrywanie nieprawidłowości, w tym identyfikację miejsc o wysokim poziomie ryzyka. Takie podejście umożliwia dostosowanie warunków pracy do ergonomicznych potrzeb pracowników, minimalizując obciążenia i poprawiając ich komfort oraz efektywność [16].

Dużym zainteresowaniem wśród naukowców cieszy się monitorowanie przestrzegania zasad bezpieczeństwa i higieny pracy z wykorzystaniem obrazów z kamer. Wykorzystywane w tym celu są algorytmy You Only Look Once (YOLO) i inne. Rabbi i Jeelani [17] w analizie 153 publikacji podkreślają

lyse accident reports [20]). Koc et al. [21] proposed a time series-based prediction model using automatic data processing to predict the number of accidents at work. Three machine learning methods were used. The analysis showed that the discrete wavelet transform (DWT) improved the accuracy of all models in different time intervals, which indicates the potential for precise prediction of the number of accidents at work based on the analysed data.

Training and education in the field of occupational health and safety are also very popular and bring tangible benefits [22]. Immersive training environments, realistically representing potential hazards typical on construction sites, can be effectively implemented using simulations in virtual reality (VR) [23]. Integration of ChatGPT in the educational process significantly improves students' ability to identify potential hazards on construction sites, which is confirmed by good results in hazard recognition tests [24]. In addition, ChatGPT effectively supports occupational health and safety education by offering access to information on hazards, practices and regulations, acting as an interactive tutor that adapts learning to individual needs. Using ChatGPT increases student engagement in occupational health and safety education, making it more interesting and effective in acquiring knowledge. It is also a cost-effective educational tool available to students and professionals, constituting an attractive alternative to traditional methods, especially in the context of high employee turnover in construction.

Risk assessment is another area where artificial intelligence is used, including by identifying risk factors related to accidents at work. Random Forest algorithms and resampling techniques are used for this purpose. Sorbi et al. [25] conducted simulations enabling threat prediction and optimization of occupational safety management practices. Risk assessment was performed by developing an advanced simulation system combining Building Information Modelling (BIM) and Agent-Based Modelling and Simulation (ABMS). This system simulates various entities (agents) and their interactions on the construction site, providing a detailed picture of potential threats. The proposed system includes an automatic Prevention through Design (PtD) method that predicts threats by analysing the probability of occurrence, vulnerability and exposure value during the planning phase. This proactive approach allows safety managers to visualize potential threats and strategically organize actions to minimize the risk.

Discussion

The analysis of the keyword co-occurrence map reveals the existence of research gaps. Although the issues of ergonomics and the impact of AI on human factors (represented by the "human" node) appear in the network of connections, they seem to be less developed compared to the technical aspects of AI applications. This suggests the need for further research on the impact of AI systems on the workload, stress and satisfaction of construction workers. Moreover, issues related to ethical and legal aspects of AI use in construction are not represented in the analysed network. Along with the

wykorzystanie głębokich sieci neuronowych do monitorowania w czasie rzeczywistym i wykrywania zagrożeń. Systemy z zastosowaniem AI umożliwiają monitoring warunków pracy na terenie budowy w ciągłym trybie, wykorzystując dane z czujników Internetu Rzeczy (ang. Internet of Things – IoT) i kamer. Algorytmy uczenia maszynowego analizują te dane w czasie rzeczywistym, wykrywając potencjalne zagrożenia. Opracowano m.in. wykrywanie braku hełmów ochronnych [18] oraz szelek bezpieczeństwa i uprząży [19].

Kolejnym obszarem badań jest **wykorzystanie AI do analizy i przetwarzania danych** (możliwość analizy dużych zbiorów wykorzystywana do analizy raportów powypadkowych [20]). Koc i in. [21] zaproponowali model predykcyjny bazujący na szeregach czasowych, wykorzystujący automatyczne przetwarzanie danych do prognozowania liczby wypadków przy pracy. Zastosowano trzy metody uczenia maszynowego. Analiza wykazała, że dyskretna transformacja falkowa (ang. discrete cosine transform – DWT) poprawiła dokładność wszystkich modeli w różnych przedziałach czasowych, co wskazuje na potencjał precyzyjnego przewidywania liczby wypadków przy pracy na podstawie analizowanych danych.

Szkolenia i edukacja dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy cieszą się również dużym zainteresowaniem i przynoszą wymierne korzyści [22]. Immersyjne środowiska szkoleniowe, realistycznie odwzorowujące potencjalne zagrożenia typowe na placach budowy, mogą być skutecznie implementowane za pomocą symulacji w wirtualnej rzeczywistości (ang. Virtual Reality – VR) [23]. Integracja ChatGPT w procesie edukacyjnym znacznie poprawia zdolność studentów do identyfikacji potencjalnych zagrożeń na terenie budowy, co potwierdzają dobre wyniki w testach rozpoznawania zagrożeń [24]. Ponadto, ChatGPT efektywnie wspiera edukację BHP, oferując dostęp do informacji o zagrożeniach, praktykach i przepisach, pełniąc rolę interaktywnego tutora dostosowującego naukę do indywidualnych potrzeb. Wykorzystanie ChatGPT zwiększa zaangażowanie studentów w edukację BHP, czyniąc ją bardziej interesującą i efektywną w przyswajaniu wiedzy. Jest to również ekonomiczne narzędzie edukacyjne dostępne dla studentów i profesjonalistów, stanowiące atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnych metod, szczególnie w kontekście dużej rotacji pracowników w budownictwie.

Ocena ryzyka to kolejny obszar, w którym sztuczna inteligencja znajduje zastosowanie, m.in. przez identyfikację czynników ryzyka związanych z wypadkami przy pracy. Wykorzystywane są do tego m.in.: algorytmy Random Forest oraz techniki ponownego próbkowania. Sorbi i in. [25] przeprowadzili symulacje umożliwiające predykcję zagrożeń i optymalizację praktyk zarządzania bezpieczeństwem pracy. Ocena ryzyka została przeprowadzona przez opracowanie zaawansowanego systemu symulacji, łączącego Building Information Modeling (BIM) i Agent-Based Modeling and Simulation (ABMS). System ten symuluje różne podmioty (agentów) i ich interakcje na terenie budowy, oferując szczegółowy obraz potencjalnych zagrożeń. Proponowany system zawiera automatyczną metodę Prevention through Design (PtD), która przewiduje zagrożenia przez analizę prawdopodobieństwa wystąpienia, podatności i wartości narażenia podczas fazy planowania. To proak-

automation and autonomy of AI systems, it is important to consider the issue of responsibility for the decisions made by these systems and to ensure transparency and fairness in their operation.

A review of the literature on the role of technological innovations in reducing accidents at work in construction reveals the complexity and multifaceted nature of this issue. Analysis of 5 main research areas indicates their interconnections and potential for synergy. Research indicates that advanced technologies, including automation and robotics, contribute to increased productivity, improved construction work schedules, and safety. As many as 70% of contractors confirm the positive impact of these technologies [26]. The use of sensors and the Internet of Things (IoT) to monitor the condition of employees and conditions on the construction site allows for quick identification and response to potential threats.

AI-based tools such as ChatGPT can provide valuable support in raising awareness and knowledge of safety in the construction sector, as confirmed by the research conducted by Uddin et al. [24]. 95% of the students surveyed expressed a positive opinion on the potential of ChatGPT in the context of identifying risks in construction and its role in educational and training processes related to safety. The respondents also overwhelmingly considered that using ChatGPT is intuitive, and the system itself is characterized by high accessibility and ease of navigation.

Despite the unquestionable benefits, it should be remembered that the implementation of AI systems in the construction sector faces many ethical and practical challenges [27]. Issues related to the protection of data privacy and the transparency of algorithms pose a major challenge in the ethical implementation of AI in construction and other industries [2]. AI systems, processing a lot of data, can potentially violate the privacy of users, which requires the development of rigorous protocols for the protection of personal information. In addition, high implementation costs and a shortage of qualified personnel hinder the widespread implementation of AI technologies [28].

Conclusion

The potential of using artificial intelligence in accident prevention, developing and analysing construction reports and monitoring compliance with occupational health and safety regulations in construction by employees is visible. This technology offers great possibilities when combined with BIM technology, as well as digital technologies in the form of cameras, IoT and others. Implementation of artificial intelligence can lead to, among others, optimization of decision-making processes, real-time risk identification and analysis of accident reports.

Despite the rapid development and use of artificial intelligence in many areas of life, their implementation in the construction sector encounters many challenges that require in-depth analysis and development of effective strategies to overcome them. It is necessary to take into account the compliance of the use of artificial intelligence with ethical values and so-

tywnie podejście umożliwia menedżerom ds. bezpieczeństwa wizualizację potencjalnych zagrożeń i strategiczną organizację działań w celu zminimalizowania ryzyka.

Dyskusja

Analiza mapy współwystępowania słów kluczowych ujawnia istnienie luk badawczych. Mimo iż kwestie ergonomii i wpływu AI na czynniki ludzkie (reprezentowane przez węzeł „human”) pojawiają się w sieci powiązań, wydają się one mniej rozwinięte w porównaniu z technicznymi aspektami zastosowania AI. To sugeruje potrzebę przeprowadzenia dalszych badań nad wpływem systemów AI na obciążenie pracą, stres i satysfakcję pracowników budowlanych. Ponadto, w analizowanej sieci nie są reprezentowane kwestie związane z etycznymi i prawnymi aspektami wykorzystania AI w budownictwie. Wraz z automatyzacją i autonomią systemów AI, istotne jest uwzględnienie kwestii odpowiedzialności za decyzje podejmowane przez te systemy oraz zapewnienie transparentności i sprawiedliwości w ich działaniu.

Przegląd literatury dotyczącej roli innowacji technologicznych w ograniczaniu wypadków przy pracy w budownictwie ujawnia złożoność i wieloaspektowość tego zagadnienia. Analiza pięciu głównych obszarów badawczych wskazuje na ich wzajemne powiązania i potencjał synergii. Badania wskazują, że zaawansowane technologie, w tym automatyzacja i robotyzacja, przyczyniają się do zwiększenia produktywności, poprawy harmonogramów robót budowlanych oraz bezpieczeństwa. Aż 70% wykonawców potwierdza pozytywny wpływ tych technologii [26]. Zastosowanie czujników i Internetu Rzeczy (IoT) do monitorowania stanu pracowników oraz warunków panujących na budowie pozwala na szybką identyfikację i reakcję na potencjalne zagrożenia.

Narzędzia bazujące na sztucznej inteligencji, takie jak ChatGPT, mogą stanowić wartościowe wsparcie w podnoszeniu świadomości i wiedzy z dziedziny bezpieczeństwa w sektorze budowlanym, co potwierdzają badania przeprowadzone przez Uddin i in. [24]. 95% ankietowanych przez nich studentów wyraziło pozytywną opinię na temat potencjału ChatGPT w kontekście identyfikacji zagrożeń w budownictwie oraz jego roli w procesach edukacyjnych i szkoleniowych związanych z bezpieczeństwem. Respondenci w przeważającej części uznali również, że korzystanie z ChatGPT jest intuicyjne, a sam system charakteryzuje się dużą dostępnością i łatwością nawigacji.

Pomimo niekwestionowanych korzyści należy pamiętać, że implementacja systemów sztucznej inteligencji w sektorze budownictwa napotyka wiele wyzwań etycznych i praktycznych [27]. Kwestie związane z ochroną prywatności danych i przejrzystością algorytmów stanowią duże wyzwanie w etycznym wdrażaniu sztucznej inteligencji w budownictwie i w innych branżach [2]. Systemy AI, przetwarzając wiele danych, mogą potencjalnie naruszać prywatność użytkowników, co wymaga opracowania rygorystycznych protokołów ochrony informacji osobowych. Ponadto wysokie koszty wdrożenia i deficyt wykwalifikowanego personelu utrudniają powszechne implementacje technologii sztucznej inteligencji [28].

cial norms. Despite the creation of the first regulations on AI [29], there are still no clear legal regulations for the use of artificial intelligence in the construction sector. Data protection when using artificial intelligence is also important. Economic studies assessing the long-term return on investment in new security technologies are necessary. It is also necessary to explore the psychological aspects of employee adaptation to new technologies, including potential fears and resistance to change, and develop methods for building a positive attitude towards innovation.

Received: 12.11.2024 r.

Revised: 03.12.2024 r.

Published: 21.03.2025 r.

Wnioski

Widoczny jest potencjał wykorzystania sztucznej inteligencji w prewencji wypadkowej, opracowywaniu i analizie raportów budowlanych oraz monitorowaniu przestrzegania przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy w budownictwie przez pracowników. Technologia ta oferuje duże możliwości w połączeniu z technologią BIM, a także technologiami cyfrowymi w postaci kamer, IoT i innymi. Wdrożenie sztucznej inteligencji może spowodować m.in. optymalizację procesów decyzyjnych, identyfikację ryzyka w czasie rzeczywistym, analizę raportów powypadkowych.

Pomimo szybkiego rozwoju i wykorzystania sztucznej inteligencji w wielu dziedzinach życia, ich implementacja w sektorze budownictwa napotyka wiele wyzwań, które wymagają dogłębnej analizy i opracowania skutecznych strategii ich przewyższania. Należy mieć na uwadze zgodność wykorzystania sztucznej inteligencji z wartościami etycznymi oraz normami społecznymi. Pomimo powstania pierwszych przepisów dotyczących AI [29], nadal nie ma jednoznacznych regulacji prawnych wykorzystania sztucznej inteligencji w obszarze budownictwa. Istotna jest również ochrona danych podczas korzystania ze sztucznej inteligencji. Konieczne są badania ekonomiczne oceniające długoterminowy zwrot z inwestycji w nowe technologie bezpieczeństwa. Należy również zgłębić psychologiczne aspekty adaptacji pracowników do nowych technologii, w tym potencjalne obawy i opór przed zmianami oraz opracować metody budowania pozytywnego nastawienia do innowacji.

Wpłynął do redakcji: 12.11.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.12.2024 r.

Opublikowano: 21.03.2025 r.

Literature

- [1] Samovia J. "Facts On Safety At Work. International Labour Organization" 2021.
- [2] Usama M, Ullah U, Muhammad Z, Islam T, Hashmi SS. "Ai-enabled risk assessment and safety management in construction" Ethical Artificial Intelligence in Power Electronics, pp. 105–132, 2024, eBook ISBN: 9781032648323
- [3] Kamal ISM, Ahmad IN, Ma'arof MIN. "Review on Accidents Related to Human Factors at Construction Site," Advanced Engineering Forum, vol. 10, pp. 154–159, 2013, DOI: 10.4028/www.scientific.net/aef.10.154.
- [4] Woźniak Z, Hoła B, Ciszewski J, Stelmaszczyk M. "Significance of near misses for work safety in construction" Przegląd Budowlany. 2022, vol. 9/10, s. 90–93.
- [5] Woźniak Z, Hoła B, Ciszewski J, Stelmaszczyk M., "Accident prevention index based on the number of dangerous events in a Polish construction company" Przegląd Budowlany, vol. R. 94, nr. no. 9–10, pp. 184–189, 2023, DOI: 10.5604/01.3001.0053.9396.
- [6] "GUS – Bank Danych Lokalnych." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/start>
- [7] Woźniak Z and Hoła B, "The structure of near misses and occupational accidents in the Polish construction industry," Heliyon, vol. 10, no. 4, 2024, DOI: 10.1016/J.HELIYON.2024.E26410.
- [8] Sultanov R, Sulaiman S, Li H, Meshcheryakov R, Magid E. "A Review on Collaborative Robots in Industrial and Service Sectors," 2022 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2022 – Proceedings, 2022, DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10003014.
- [9] Chen S, Zheng Y, Cattani C, Wang W. "Modeling of Biological Intelligence for SCM System Optimization," Comput Math Methods Med, vol. 2012, no. 1, p. 769702, 2012, DOI: 10.1155/2012/769702.
- [10] Lu P, Chen S, and Zheng Y. "Artificial Intelligence in Civil Engineering," Math Probl Eng, vol. 2012, no. 1, p. 145974, 2012, DOI: 10.1155/2012/145974.
- [11] "Classification of the educational texts styles with the methods of artificial intelligence" Journal of Baltic Science Education, vol. 16, no. 3, pp. 324–336, 2017.
- [12] Butler-Adam J. "The Fourth Industrial Revolution and education" South African Journal of Science, vol. 114, no. 5–6, pp. 1–1, 2018, DOI: 10.17159/SAJS.2018/A0271.
- [13] Walicka M, Czemieli-Grzybowska W. "Artificial intelligence and working capital management in the prism of Industry 5.0" Management Academy, vol. 7, no. 4, p. 2023, DOI: 10.24427/AZ-2023-0058.
- [14] Jeelani I, Ramshankar H, Han K, Albert A, Asadi K. "Real-Time Hazard Proximity Detection–Localization of Workers Using Visual Data," Computing in Civil Engineering 2019: Data, Sensing, and Analytics - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019, pp. 281–289, 2019, DOI: 10.1061/9780784482438.036.
- [15] Chen H, Mao Y, Xu Y, Wang R. "The Impact of Wearable Devices on the Construction Safety of Building Workers: A Systematic Review" Sustainability (Switzerland), vol. 15, no. 14, p. 11165, 2023, DOI: 10.3390/SU151411165/S1.
- [16] Sardinha L, Baleiras JV, Sousa S, Lima TM, Gaspar PD. "Decision Support System (DSS) for Improving Production Ergonomics in the Construction

Sector,” *Processes* 2024, Vol. 12, Page 2503, vol. 12, no. 11, p. 2503, 2024, DOI: 10.3390/PR12112503.

[17] Rabbi ABK, Jeelani I. “AI integration in construction safety: Current state, challenges, and future opportunities in text, vision, and audio based applications,” *Autom Constr*, vol. 164, p. 105443, 2024, DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105443.

[18] Kisaiezehra MU, Farooq M, A. Bhutto, Kazi AK. “Real-Time Safety Helmet Detection Using Yolov5 at Construction Sites,” *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 36, no. 1, pp. 911–927, 2023, DOI: 10.32604/iasc.2023.031359.

[19] Shanti MZ et al., “A Novel Implementation of an AI-Based Smart Construction Safety Inspection Protocol in the UAE,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166603–166616, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3135662.

[20] Pandithawatta S, Ahn S, Rameezdeen R, Chow CWK, Gorjian N. “Systematic Literature Review on Knowledge-Driven Approaches for Construction Safety Analysis and Accident Prevention,” *Buildings*, vol. 14, no. 11, 2024, DOI: 10.3390/buildings14113403.

[21] Koc K, Ekmekcioglu Ö, Gurgun AP. “Accident prediction in construction using hybrid wavelet-machine learning” *Autom Constr*, vol. 133, p. 103987, 2022, DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103987.

[22] Klempos R, Kluwak K, Idzikowski R, Nowobilski T, Zamojski T. “Possibility analysis of danger factors visualization in the construction environment based on Virtual Reality model” 8th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, *CogInfoCom 2017 - Proceedings*, vol. 2018-January, 2017, DOI: 10.1109/COGINFocom.2017.8268271.

[23] Jacobsen EL, Solberg A, Golovina O, Teizer J. “Active personalized construction safety training using run-time data collection in physical and virtual reality work environments” *Construction Innovation*, vol. 22, no. 3, pp. 531–553, 2022, DOI: 10.1108/CI-06-2021-0113/FULL/PDF.

[24] Uddin SMJ, Albert A, Ovid A, Alsharif A. “Leveraging ChatGPT to Aid Construction Hazard Recognition and Support Safety Education and Training” *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 7121, vol. 15, no. 9, p. 7121, 2023, DOI: 10.3390/SU15097121.

[25] Getuli V et al., “Agent-based simulation framework for enhanced construction site risk estimation and safety management” *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, vol. 29, 2024, DOI: 10.36680/j.itcon.2024.054.

[26] Szruba M. “Modern technologies and innovations are changing construction” *Technologies and innovations in construction*.

[27] Kaczorek K. “Possibilities of implementing the Construction 4.0 concept in the area of occupational health and safety” *Przegląd Budowlany*, vol. 94, no. 9–10, pp. 105–109, 2023, DOI: 10.5604/01.3001.0053.9372.

[28] Ho K, Tang D. “Artificial Intelligence in Occupational Health and Safety Risk Management of Construction, Mining, and Oil and Gas Sectors: Advances and Prospects” *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 26, no. 6, pp. 241–253, 2024, DOI: 10.9734/JERR/2024/V26I61177.

[29] “Regulation – EU – 2024/1689 – EN – EUR-Lex.” Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1689>