

Nowoczesne technologie cyfrowe w projektowaniu i zarządzaniu realizacją przedsięwzięć budowlanych

Modern digital technologies in the design and management of construction projects



dr hab. inż. Krzysztof Zima, prof. PK

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki,
Wydział Inżynierii Lądowej,
ORCID 0000-0001-5563-5482,
krzysztof.zima@pk.edu.pl

Streszczenie

Celem pracy była identyfikacja aktualnych trendów i kierunków rozwoju technologii cyfrowych w budownictwie ze szczególnym uwzględnieniem ich integracji z metodologią BIM (building information modeling) na podstawie kompleksowego przeglądu literatury naukowej. Analizę przeprowadzono na bazie 22 876 artykułów naukowych z obszaru inżynierii, znajdujących się w bazie Scopus. Wyniki wskazują, że technologie AI, BIM oraz cyfrowe bliźniaki stanowią główne filary innowacji, wykazując najwyższą częstotliwość występowania i stopień integracji z innymi rozwiązaniami. Dynamicznie rozwijają się rzeczywistość rozszerzona (AR) i wirtualna (VR),

pełniąc rolę interfejsów wspierających wizualizację oraz interakcję z danymi. Analiza sieci współwystępowania pojęć ujawniła silną integrację ekosystemu technologicznego – centralną pozycję zajmują AI, internet rzeczy (IoT) i cyfrowe bliźniaki (centralność $>0,75$), podczas gdy AR/VR funkcjonują jako narzędzia wizualne, a technologie pomiarowe charakteryzuje niższa centralność ($\sim 0,45$). Na podstawie wyników zalekomendowano: dalszy rozwój integracji AI z BIM i cyfrowymi bliźniakami, rozszerzenie wykorzystania AR/VR, monitorowanie potencjału UAV i projektowania parametrycznego oraz wdrażanie IoT w celu poprawy efektywności operacyjnej.

Słowa kluczowe BIM, cyfrowy bliźniak, technologie cyfrowe, cyfrowe budownictwo, sztuczna inteligencja

Abstract

The aim of the study was to identify current trends and directions in the development of digital technologies in construction, with particular emphasis on their integration with BIM (building information modelling) methodology based on a comprehensive review of scientific literature. The analysis was conducted based on the Scopus database, covering 22,876 scientific articles in the field of engineering. The results indicate that AI, BIM and digital twin technologies are the main pillars of innovation, showing the highest frequency and degree of integration with other solutions. Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) are developing dynamically,

serving as interfaces that support visualisation and interaction with data. An analysis of the co-occurrence network revealed a strong integration of the technological ecosystem, with AI, IoT and digital twin occupying a central position (centrality > 0.75), while AR/VR function as visual tools and measurement technologies are characterised by lower centrality (~ 0.45). Based on the results, the following recommendations were made: further development of AI integration with BIM and digital twin, expansion of AR/VR use, monitoring of the potential of UAVs and parametric design, and implementation of IoT to improve operational efficiency.

Keywords BIM, digital twin, digital technologies, digital construction, artificial intelligence

WPROWADZENIE

Branża budowlana, jako fundamentalny element gospodarki narodowej, ma klu-

czowe znaczenie dla wzrostu gospodarczego i rozwoju społecznego w skali globalnej [1]. Stosowanie tradycyjnych

metod pracy, fragmentacja procesów oraz brak ich standaryzacji przyczyniają się do przekraczania harmonogramu



i budżetu oraz do niskiej jakości projektowania i realizacji robót budowlanych. W ostatnich latach obserwuje się jednak dynamiczny rozwój i wdrażanie technologii cyfrowych, które mają potencjał do zrewolucjonizowania branży przez podnoszenie efektywności, poprawę jakości i redukcję kosztów.

Współczesne budownictwo coraz częściej opiera się na technologii, np. BIM (building information modeling), która pozwala na wielowymiarowe, cyfrowe odwzorowanie przedsięwzięcia budowlanego, łącząc dane geometryczne z informacjami technicznymi, finansowymi, harmonogramami itp. Projektowanie, a właściwie modelowanie staje się coraz szybsze i prostsze dzięki wspomaganiu sztuczną inteligencją (AI – artificial intelligence), która umożliwia projektowanie parametryczne lub wręcz z wykorzystaniem opisów tekstowych (text to BIM).

Nie tylko BIM wspomaga projektowanie i realizację przedsięwzięć. Przykładowo drony skanują place budowy, tworząc modele 3D lub ortofotomapy, a wirtualna i rozszerzona rzeczywistość (VR/AR – virtual reality/augmented reality) umożliwia „spacer” po nieistnie-

jącym jeszcze obiekcie oraz precyzyjne nakładanie modelu BIM obiektu budowlanego na obraz rzeczywisty. Technologie korzystające z BIM, takie jak druk 3D, przyspieszają realizację, a internet rzeczy (IoT – internet of things) wspomagany sensorami umożliwia np. monitorowanie stanu konstrukcji i zużycia materiałów poprzez przekazywanie informacji z placu budowy do modelu BIM.

Celem niniejszego artykułu jest analiza tej transformacji oraz identyfikacja kluczowych technologii korzystających z BIM wraz z oceną ich powiązań i istotności.

PRZEGLĄD LITERATURY

Badania naukowe potwierdzają rosnące zainteresowanie technologiami cyfrowymi w budownictwie. Przykładowo: autorzy [2] podkreślają znaczenie BIM jako fundamentu transformacji cyfrowej, umożliwiającego tworzenie i zarządzanie cyfrowymi reprezentacjami fizycznych i funkcjonalnych charakterystyk obiektów budowlanych. W pracy [3] przeanalizowano wpływ IoT na zarządzanie budową, wskazując na możliwość monitorowania postępów prac, optymalizacji zużycia energii i poprawy bezpie-

czeństwa. Według [4] na popularności zyskuje również wykorzystanie AI oraz uczenia maszynowego (ML – machine learning), oferujących rozwiązania w zakresie automatyzacji procesów, analizy danych i prognozowania.

W literaturze naukowej od początku XXI w. obserwuje się rosnące zainteresowanie cyfryzacją w budownictwie. Kluczowe prace, takie jak [2] na temat BIM oraz [5] dotyczące integracji technologii informacyjnych w budownictwie, zainicjowały dyskusję na temat tej transformacji. W ostatnich latach badania koncentrują się na integracji BIM z IoT [6], wykorzystaniu AI do optymalizacji harmonogramów [7] oraz na roli cyfrowych bliźniaków (digital twins) w zarządzaniu infrastrukturą [8].

Według raportu McKinsey Global Institute [9] branża budowlana dzięki pełnemu wdrożeniu technologii cyfrowych ma potencjał do zwiększenia produktywności o 50–60%. Jednak badania przeprowadzone przez Dodge Data & Analytics [10] wskazują, że wdrożenie tych technologii napotyka na wiele przeszkód, takich jak brak wykwalifikowanej kadry, wysokie koszty implementacji i opór ze strony tradycyjnych uczestników rynku.

Tab. 1. Wyniki wyszukiwania par określeń w bazie Scopus (oprac. własne)

Słowa kluczowe	Wyszukiwanie	Liczba artykułów	Lata publikacji
AI + BIM	"Artificial Intelligence" + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	8133	1992–2026
Digital twin + BIM	„digital twin” + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	3813	2016–2026
VR + BIM	„VirtualReality” + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	3260	2004–2026
AR + BIM	„Augmented Reality” + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	2736	2009–2026
Laser scanning + BIM	„laser scanning” + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	2337	2008–2026
3D printing + BIM	„3D printing” + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	873	2014–2026
IoT + BIM	Internet of Things + BIM AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, „Building Information Modelling”) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, „Internet Of Things”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”))	864	2014–2026
Parametric design + BIM	„parametric design” + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	803	2006–2026
Orthophoto + BIM	„orthophoto” + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	56	2015–2026
Text to BIM + BIM	„text to BIM” + BIM AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”))	1	2023

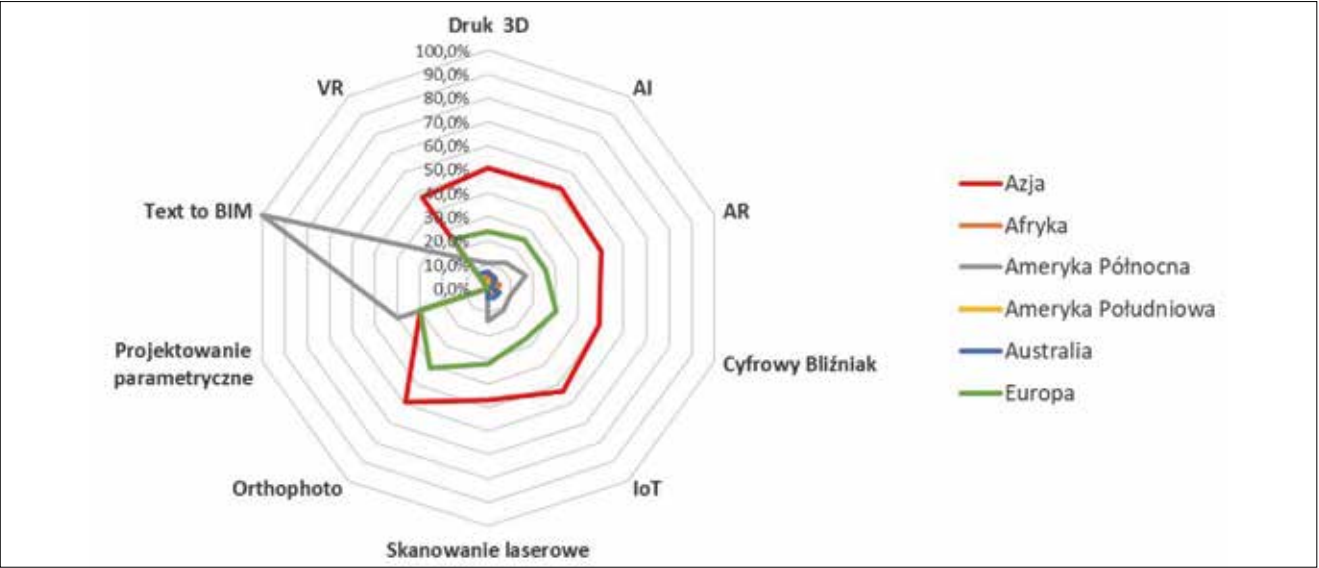
Kompleksowy przegląd literatury powinien dać odpowiedź na pytanie, jakie technologie są obecnie popularne, od kiedy, oraz jakie są wobec tego prognozy na przyszłość. Analizowana literatura pochodziła z bazy Scopus. Wybór ten można uzasadnić z jednej strony pojemnością i kompleksowością bazy zawierającej ar-

tykuły naukowe z danej tematyki, a z drugiej strony – gwarancją zachowania odpowiedniego poziomu naukowego.

Analiza polegała na wyszukiwaniu publikacji zawierających określenie BIM oraz nazwy popularnych technologii cyfrowych. Przeanalizowano 22 876 artykułów naukowych. Wyniki zawężono do obszaru związa-

nego z inżynierią i artykułów publikowanych w czasopiśmie naukowych (bez publikacji konferencyjnych). Dane w postaci plików .ris ściągnięto z bazy Scopus 24.10.2025 r.

W tab. 1 zebrano wyniki wyszukiwania par pojęciowych wraz z liczbą znalezionych artykułów oraz przedziałem określającym lata ich publikacji.



Rys. 1. Rozkład zainteresowania różnymi obszarami tematycznymi na kontynentach

Rys. autora

Badania empiryczne wskazały, że głównymi kierunkami cyfryzacji są:

- modelowanie informacji o budynku (BIM) jako podstawa cyfrowej współpracy;
- automatyzacja oraz robotyzacja, np. druk 3D;
- analiza danych oraz AI – wspierające decyzje menedżerskie;
- technologie mobilne i sensoryczne umożliwiające monitorowanie stanu obiektów w czasie rzeczywistym;

- VR/AR;
- projektowanie parametryczne.

ANALIZA SŁÓW KLUCZOWYCH I RELACJI MIĘDZY NIMI

Analiza rozkładu liczby publikacji na poszczególnych kontynentach pokazuje zdecydowaną przewagę Azji (rys. 1). Na drugim miejscu jest Europa, przed Ameryką Północną. Rozkład zainteresowania tematycznego generalnie jest podobny

(z zachowaniem odpowiedniej skali), z wyjątkiem projektowania – technologia projektowania parametrycznego i jedyny opisany przypadek wykorzystania text to BIM dominuje w publikacjach z Ameryki Północnej.

W tab. 2 zamieszczono słowa kluczowe (10 z najwyższymi wynikami, ale min. dwoma powtórzeniami) występujące w analizowanych artykułach. Zestawiono częstotliwości pojawiania się słów

Tab. 2. Zestawienie słów kluczowych w analizowanych artykułach (oprac. własne)

Słowa kluczowe	Druk 3D	AI	AR	Cyfrowy bliźniak	IoT	Skanowanie laserowe	Orthophoto	Projektowanie parametryczne	Text to BIM	VR
3D concrete printing	39	-	-	1	-	-	-	-	-	-
3D printing	81	-	-	-	-	-	-	-	1	-
3D reconstruction	-	-	-	-	-	57	-	-	-	-
additive manufacturing	76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
artificial intelligence	-	352	70	123	37	-	-	-	-	-
augmented reality	-	-	259	-	-	-	-	-	-	269
big data	-	-	-	-	18	-	-	-	-	-
BIM	73	1202	656	781	390	389	5	6	-	740
blockchain	-	-	-	111	41	-	-	-	-	-
computer vision	-	169	-	-	-	-	-	-	-	-
construction	29	181	103	101	-	-	-	-	-	113
construction 4.0	27	-	-	-	-	-	-	-	-	67
construction industry	49	191	89	116	-	-	-	-	-	121
construction management	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61
construction safety	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78
cultural heritage	-	-	-	-	-	56	8	-	-	-
deep learning	-	442	86	143	-	123	10	-	-	-
digital twin	-	313	138	777	116	97	4	-	-	213
facility management	-	-	-	-	27	-	-	-	-	-
image processing	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-
industry 4.0	37	-	74	102	32	-	-	-	-	-
IoT	-	-	-	-	363	-	-	-	-	-
laser skanning	-	-	-	-	-	207	-	-	-	-
lidar	-	-	-	-	-	86	-	-	-	-
machine learning	22	463	-	131	48	-	-	-	-	-
mixed reality	-	-	68	-	-	-	-	-	-	66
ontology	-	165	-	-	-	-	-	-	-	-
photogrammetry	-	-	-	-	-	90	12	-	-	-
point cloud	-	-	-	-	-	307	3	-	-	-
semantic segmentation	-	-	-	-	-	63	3	-	-	-
structure-from-motion	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-
sustainable	42	158	-	97	22	-	-	-	-	-
UAV	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-
virtual reality	-	-	254	-	-	-	-	-	-	438

kluczowych i powiązania między nimi w obszarze zaawansowanych technologii w dziedzinie budownictwa i projektowania cyfrowego. Podano liczby wystąpień słów kluczowych lub powiązań między nimi w różnych kategoriach technologicznych, takich jak AI, IoT, AR/VR, cyfrowe bliźniaki i BIM.

Słowo kluczowe „AI” osiąga bardzo wysokie wyniki w kilku dziedzinach, jest silnie obecne w kategoriach „AR” (70) i „cyfrowe bliźniaki” (123), co pokazuje istotną rolę AI w różnych technologiach. Powiązane terminy, takie jak „uczenie maszynowe” i „uczenie głębokie” (odpowiednio: 463 i 442 w kategorii „AI”), potwierdzają dominację sztucznej inteligencji.

Słowo kluczowe „BIM” również osiąga wysokie wyniki, w tym 1202 pod hasłem „AI”, 656 pod hasłem „AR” i 781 pod hasłem „cyfrowy bliźniak”, co podkreśla znaczenie BIM jako technologii integracyjnej,

łączącej wiele innowacji. Występowanie słowa kluczowego „cyfrowy bliźniak” aż w 7 z 10 prezentowanych technologii wskazuje na szybkie przyjęcie przez rynek i duże znaczenie tej kategorii.

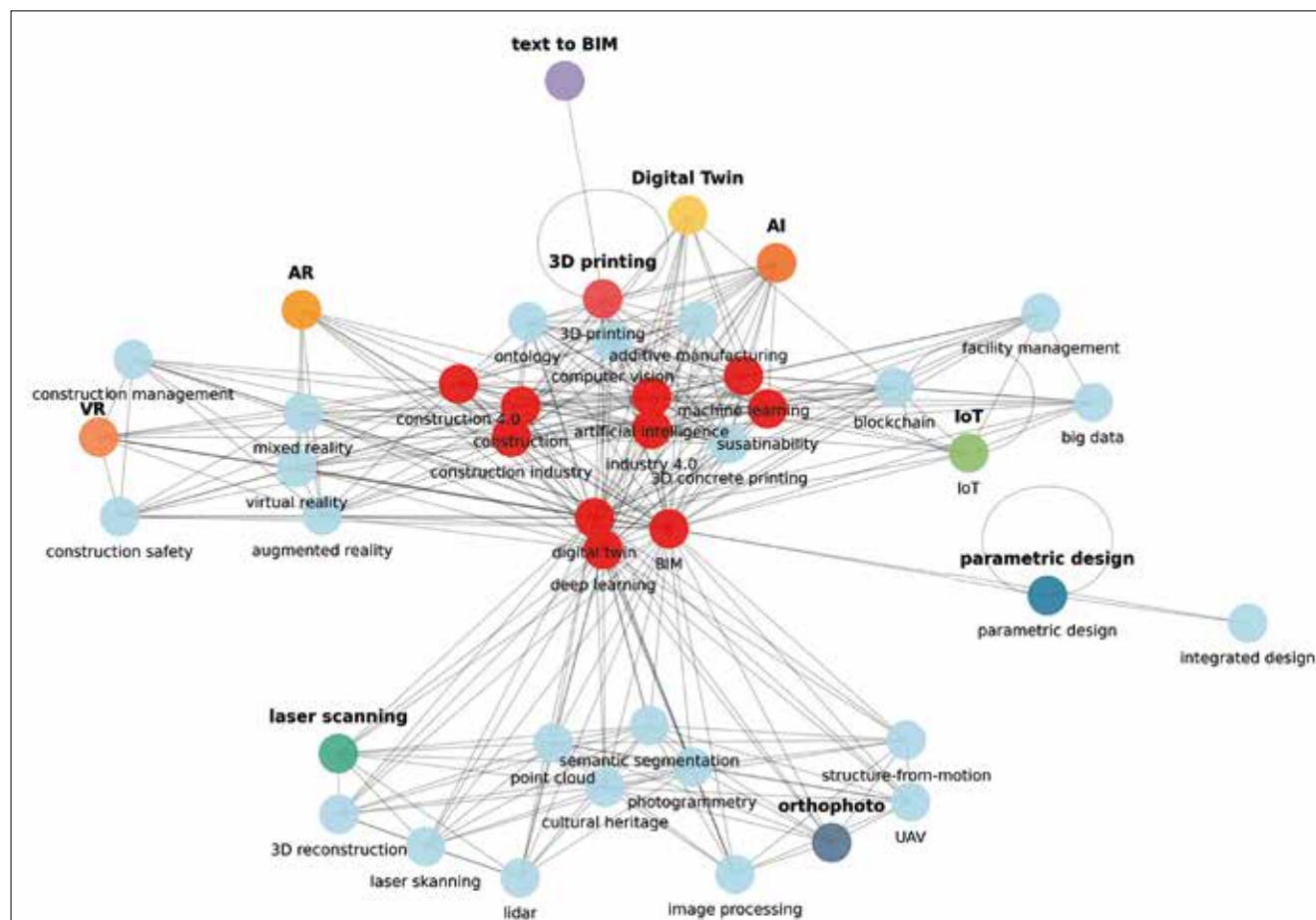
„AR” także osiąga znaczące wyniki: 259 dla słowa kluczowego „rzeczywistość rozszerzona” i 269 dla „VR” powiązanego z AR, co wskazuje na rosnące zainteresowanie technologiami immersyjnymi. „VR” również osiąga wysokie wyniki: 438 dla słów kluczowych związanych z „VR” i 254 dla „AR”. „Druk 3D” i „drukowanie 3D z betonu” pojawiają się jeszcze dość rzadko, odpowiednio z wynikiem 81 i 39, ale widać rosnące zainteresowanie tymi technologiami.

„IoT” ma znaczącą częstotliwość – 363 w swojej dziedzinie i jest powiązane z „przemysłem 4.0” (74 w kategorii „AI”, 102 w kategorii „cyfrowy bliźniak”), odzwierciedlając trendy integracji cyfrowej w budownictwie.

Średnia częstotliwość występowania słów kluczowych „skanowanie laserowe” (207) i „lidar” (86) świadczy o ich kluczowej, ale wyspecjalizowanej roli w pozyskiwaniu danych przestrzennych.

Niższa liczba wystąpień terminów „projektowanie parametryczne” (5), „projektowanie zintegrowane” (2) i „UAV” (14) wskazuje na nowo pojawiające się obszary badań lub technologie, które wciąż zyskują na popularności.

Na rys. 2 pokazano powiązania między terminami określającymi główne technologie cyfrowe a słowami kluczowymi występującymi w publikacjach na dany temat. Celem prezentacji jest analiza znaczenia i nakładających się zastosowań tych terminów w najnowszych badaniach lub dokumentacji branżowej, z podkreśleniem kluczowych trendów technologicznych i powiązań międzydyscyplinarnych.



Rys. 2. Schemat powiązań między poszczególnymi terminami określającymi główne technologie cyfrowe a słowami kluczowym występującymi w publikacjach

Tab. 3. Metryki oceny siły połączeń i znaczenia badanych technologii (oprac. własne)

Technologia	Liczba powiązanych słów	Centralność (0–1)	Wnioski
AI	22–25	0,85	Najbardziej powiązana – występuje w większości kontekstów
IoT	20–22	0,80	Silnie powiązana z AI i digital twin – wspólna baza w obszarze danych i łączności
digital twin	18–20	0,75	Łącznik między światem rzeczywistym i cyfrowym
AR/VR	15–18	0,70	Bliskie tematycznie; współdziela słowa dotyczące immersji i modelowania 3D
3D printing/parametric design	12–14	0,60	Powiązane głównie z fizycznym projektowaniem i prototypowaniem
Laser scanning/orthophoto	8–10	0,45	Technologie pomocnicze – dostarczają dane, ale nie integrują wielu pojęć
Text to BIM	10–12	0,50	Most między automatyzacją danych a modelowaniem budynków

Technologie zaznaczone pogrubioną czcionką na rys. 2 tworzą centralne węzły, wokół których skupiają się powiązane słowa-klucze. Słowa-klucze często łączą się z wieloma technologiami, co oznacza ich interdyscyplinarność (np. te same koncepcje pojawiają się w AR, VR, AI oraz IoT). Czerwone węzły (top keywords) mają najwyższą liczbę połączeń – to najbardziej ogólne lub kluczowe pojęcia w całym zestawie (np. construction, BIM, digital twin). Te węzły występują w kontekście kilku technologii – pełnią więc rolę łączników między obszarami. Technologie takie jak AR, VR i digital twin są silnie połączone wspólnymi słowami-kluczami (np. „visualization”, „3D”, „simulation”), co sugeruje bliskie powiązanie w obszarze cyfrowych reprezentacji przestrzennych. Z kolei AI i IoT dzielą wiele wspólnych pojęć (np. „big data”, „digital twin”), co wskazuje na ich integrację w ramach inteligentnych systemów i analityki danych. Projektowanie parametryczne i 3D printing tworzą bardziej wyspecjalizowany podzbiór – łączą się z terminami związanymi z projektowaniem, materiałami oraz produkcją.

Gęstość połączeń wokół niektórych technologii (np. AI, IoT, digital twin) oznacza, że integrują one większą liczbę tematów i zastosowań. Technologie o mniejszej liczbie powiązań (np. ortho-

photo, laser scanning) pełnią raczej rolę źródeł danych niż integratorów procesów. Gęstość połączeń to stosunek liczby istniejących połączeń do maksymalnej możliwej liczby, co pokazuje, jak silnie zintegrowany jest ekosystem technologii. Jak widać, zintegrowany jest mocno – nie ma izolowanych grup, co sugeruje postępującą konwergencję w kierunku kompleksowych systemów cyfrowych (digital twin, smart systems). AI, IoT i AR/VR pełnią rolę węzłów spinających ten system, natomiast technologie takie jak druk 3D czy projektowanie parametryczne są bardziej dziedzinowe, choć równie ważne.

Centralność stopnia to inaczej stopień węzła (liczba bezpośrednich połączeń danego węzła wskazująca, które technologie albo słowa są najbardziej uniwersalne) przeskalowany do zakresu 0–1, co ułatwia porównanie ważności między różnymi typami węzłów. AI, IoT i digital twin są zatem technologicznie najbardziej centralne – spajają ekosystem.

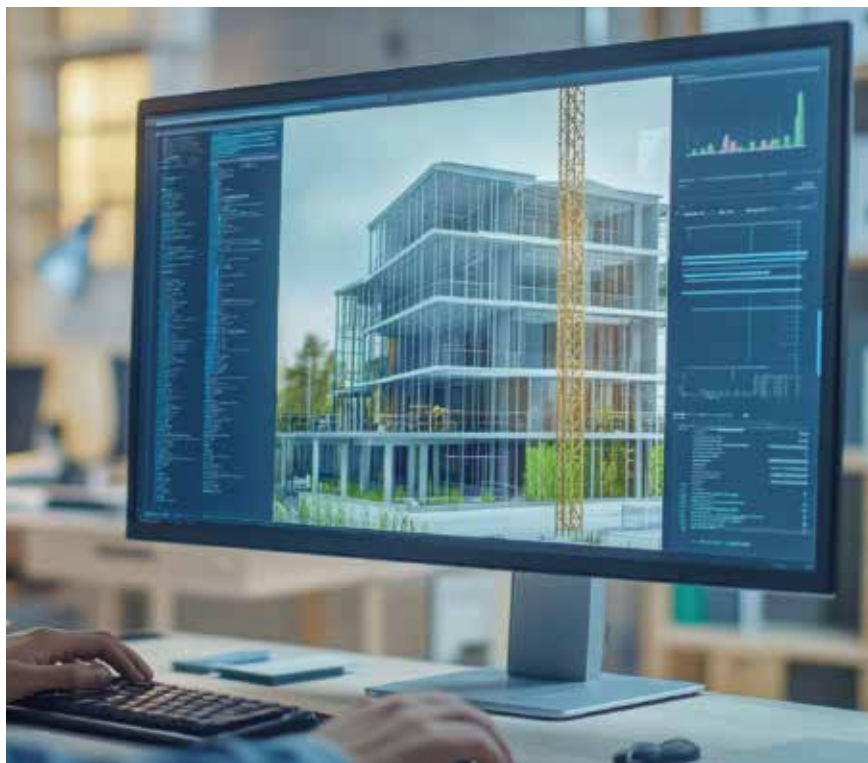
Z tab. 1 wynika, że niektóre kombinacje pojęć (technologie i słowa kluczowych) są wyjątkowo częste. I tak pojęcie „BIM” występuje w powiązaniu z praktycznie wszystkimi technologiami, a w co najmniej 7 z 10 technologii występuje także digital twin.

Technologie AI, BIM i cyfrowych bliźniaków są filarami napędzającymi innowacje w budownictwie oraz dziedzinach pokrewnych.

Na podstawie tej samej mapy (i struktury grafu) można wyciągnąć konkretne metryki opisujące siłę połączeń i znaczenie poszczególnych technologii oraz słów-kluczy. Po przeliczeniu współwystąpień między słowami-kluczami w ramach każdej technologii można wyciągnąć pewne wnioski. Wyniki centralności, liczby powiązanych słów oraz krótkie wnioski przedstawiono w tab. 3.

PODSUMOWANIE

Dane wskazują, że technologie AI, BIM i cyfrowych bliźniaków są filarami napędzającymi innowacje w budownictwie oraz dziedzinach pokrewnych, co znajduje odzwierciedlenie w ich bardzo wysokiej częstotliwości występowania. Rzeczywistość rozszerzona i wirtualna to szybko rozwijające się dziedziny, o czym świadczy duża liczba wyników i powiązań międzydyscyplinarnych.



Koncepcje IoT i przemysłu cyfrowego są mocno zakorzenione w obecnym dyskursie, podkreślając trend cyfryzacji oraz automatyzacji.

Niszowe technologie, takie jak skanowanie laserowe, druk 3D i UAV (bezzałogowy statek powietrzny – ang. Unmanned Aerial Vehicle), są ważne, ale obecnie mają drugorzędne znaczenie pod względem skali i mogą stanowić obszary przyszłej ekspansji.

Wzorce występowania sugerują wysoką integrację sztucznej inteligencji z wieloma nowymi technologiami, co wskazuje na strukturalne przesunięcie w kierunku inteligentnych, połączonych cyfrowych procesów budowlanych.

Na bazie zaprezentowanych wyników można rekomendować następujące działania:

- Skoncentrowanie działań badawczo-rozwojowych i inwestycyjnych na pogłębianiu integracji sztucznej inteligencji w ramach BIM i cyfrowych bliźniaków, aby wykorzystać ich kluczową rolę.
- Rozszerzenie zastosowania technologii AR i VR w celu usprawnienia wirtualnego prototypowania, szkoleń oraz

podejmowania decyzji bezpośrednio na placu budowy.

- Monitorowanie i wspieranie nowych technologii, takich jak projektowanie parametryczne oraz UAV, pod kątem potencjalnych przyszłych korzyści.
- Wykorzystanie IoT w celu poprawy wydajności operacyjnej i monitorowania w czasie rzeczywistym w środowiskach budowlanych.

Te uporządkowane informacje mogą stanowić wskazówki dla interesariuszy w zakresie badań, rozwoju i planowania strategicznego w dziedzinie technologii budowlanych.

Wnioski szczegółowe pokazują, że:

- AI, IoT i digital twin to kluczowe węzły integrujące ekosystem technologiczny. Ich centralność powyżej 0,75 świadczy o tym, że są one trzonem współczesnych rozwiązań cyfrowych.
- AR i VR są zintegrowane głównie przez wspólne pojęcia wizualne, ale nie tak mocno związane z warstwą danych jak AI/IoT – pełnią więc niejako funkcję interfejsu użytkownika.
- Laser scanning i orthophoto są technologiami źródłowymi – ich słowa-klu-

cze łączą się z innymi, lecz nie tworzą centralnych węzłów (niska centralność ok. 0,45).

- Cała sieć jest dość gęsta (gęstość ok. 0,38) – to oznacza, że pojęcia i technologie często współwystępują, co potwierdza trend konwergencji cyfrowych technologii (łączenia danych, modeli, wizualizacji oraz automatyzacji).

Z badań wynika, że ekosystem technologii jest silnie zintegrowany – zwłaszcza wokół AI, IoT i digital twin. To one tworzą rdzeń cyfrowych transformacji, łącząc dane, modele, automatyzację i wizualizację. Technologie takie jak AR/VR, druk 3D printing oraz projektowanie parametryczne stanowią ważne, ale bardziej wyspecjalizowane ogniwa. ■

Literatura

- [1] Ertuğrul H.M., Pirgaip B., „The nexus between construction investment and economic development: Evidence from MENA countries” w *Construction Management and Economics*, t. 39, 2021, s. 932–947.
- [2] Eastman C. i in., *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
- [3] Volkmann C., Stöcker M., Schlegel T., „Internet of Things in Construction: A Review” w *Automation in Construction*, t. 72, 2016, s. 136–149.
- [4] El-Diraby T., „Artificial Intelligence in Construction: A Review” w *Automation in Construction*, t. 103, 2019, s. 1–18.
- [5] Azhar S., „Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry” w *Leadership and Management in Engineering*, t. 11, nr 3, 2011, s. 241–252.
- [6] Lu Y. i in., „BIM and IoT integration for smart construction” w *Automation in Construction*, t. 107, 2019, art. 102926.
- [7] Zhao H. i in., „Artificial intelligence in construction: A review” w *Advanced Engineering Informatics*, t. 49, 2021, art. 101333.
- [8] Grieves M., Vickers J., „Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems” w Rosen R. (red.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2017, s. 85–113.
- [9] McKinsey Global Institute, *Reinventing Construction Through a Productivity Revolution*. McKinsey & Company, 2022.
- [10] Dodge Data & Analytics, *SmartMarket Report: Digital Transformation in Construction*. Dodge Data & Analytics, 2018.
- [11] NBS, *National BIM Report 2023*. Newcastle upon Tyne: NBS, 2023.