

3. WNIOSKOWANIE Z PRZYPADKÓW W PROGNOZOWANIU KOSZTÓW ROBÓT BUDOWLANYCH OPARTYM NA MODELU BIM

Krzysztof Zima¹

3.1. WSTĘP

Jednym z kluczowych problemów występujących w trakcie realizacji przedsięwzięcia budowlanego jest prognozowanie kosztów. Wszelkie decyzje dotyczące podjęcia i sposobu realizacji przedsięwzięcia budowlanego podejmowane są w oparciu o skalkulowany koszt, który stanowi punkt wyjścia w każdym rachunku ekonomicznym. Zarówno inwestor, jak i wykonawca budowlany, pragną jak najwcześniej poznać szacunkowy koszt przedsięwzięcia budowlanego. Zadaniem kalkulacji kosztów jest więc uzyskanie danych, na podstawie których można ocenić ekonomiczną efektywność planowanego przedsięwzięcia.

Kalkulacje kosztów mogą być wykonywane praktycznie w każdej fazie i na każdym etapie realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Przykładowe fazy i etapy przedsięwzięcia budowlanego zostały pokazane w tabeli 1. Kalkulacja kosztów rozumiana jest jako kompleks operacji rachunkowych o charakterze prognostycznym, opartych o dostępne dane, prowadzących do ustalenia wartości obiektu budowlanego lub robót budowlanych w dowolnej fazie przedsięwzięcia budowlanego. W fazie przygotowania przedsięwzięcia budowlanego proponuje się używania określania oszacowania kosztowe w celu określenia wszystkich kalkulacji wykonywanych na tak wczesnym etapie przedsięwzięcia. W fazach późniejszych, przy dokładniejszych kalkulacjach opartych na dokumentacji projektowej używane będzie określenie kalkulacje kosztorysowe lub kosztorys.

¹Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, e-mail: kzima@L3.pk.edu.pl

Tabela 1.

Struktura przedsięwzięcia budowlanego z podziałem na fazy i etapy. Źródło: opracowanie własne na podstawie (KSZBPI, 2004).

	Faza			
	przygotowania	projektowania	budowy	użytkowania
Etapy	formułowanie przedsięwzięcia	opracowanie dokumentacji wstępnej	przygotowanie do rozpoczęcia budowy	działania w okresie gwarancji
	programowanie przedsięwzięcia	opracowanie dokumentacji podstawowej	wykonywanie robót budowlanych	odbiór końcowy
	planowanie przedsięwzięcia	opracowanie dokumentacji wykonawczej	odbiór końcowy i zakończenie przedsięwzięcia	użytkowanie w okresie pogwarancyjnym
	zawarcie umowy o prace projektowe lub o prace projektowe i wykonanie robót (opcja)	zawarcie umowy o wykonanie robót (opcja)		
Główny produkt	koncepcja przedsięwzięcia	projekt budowlany	obiekt budowlany	książka obiektu budowlanego
	program funkcjonalno-użytkowy	projekt wykonawczy	dokumentacja powykonawcza	
	budżet przedsięwzięcia	przedmiar robót	kosztorys powykonawczy	
	harmonogram dyrektywny	kosztorys inwestorski/ofertowy	instrukcja użytkowania obiektu	

Trudność kalkulacji kosztów robót budowlanych jest związana z mnogością zmiennych jakie wpływają na cenę roboty budowlanej. Pomimo indywidualnego charakteru przedsięwzięć budowlanych i nieograniczonej liczby przewidywalnych i nieprzewidywalnych czynników wpływających na jego ostateczny koszt, oczekuje się, że oszacowania kosztowe, budżety i kosztorysy będą wiarygodne – czyli podobne do kosztów, które „okażą się” po zakończeniu przedsięwzięcia (Czarnigowska, 2010). Zgodnie z wytycznymi AACE (American Association of Cost Engineers – AACE, 2011) dopuszczalne różnice pomiędzy kalkulacjami kosztów na poszczególnych etapach inwestycji budowlanej zależą od poziomu zdefiniowania projektu. W tabeli 2 przedstawiono pięć klas kalkulacji kosztów i cechy charakterystyczne każdej z nich w odniesieniu do dokładności kalkulacji.

Z przedstawionych informacji dotyczących dokładności kalkulacji kosztów wynikają dwie istotne konkluzje:

1. Istotnym elementem oceny dokładności kalkulacji kosztów jest sposób opisu dokumentacji projektowej przedstawiającej obiekt budowlany, który wpływa na oczekiwany przedział dokładności kalkulacji kosztów.
2. Dla każdej klasy kalkulacji kosztów określony powinien zostać sposób opisu dokumentacji projektowej, który wpływa na maksymalne dopuszczalne odchylenia procentowe między obliczonym prognozowanym kosztem przedsięwzięcia budowlanego a kosztami rzeczywistymi.

Tabela 2.

Dokładność kalkulacji kosztów w zależności od klasy wg AACE. Źródło: opracowanie własne na podstawie (AACE, 2011).

Klasa kalkulacji kosztów	Poziom zdefiniowania projektu (wyrażony jako % w stosunku do kompletnego opracowania)	Podstawa wykorzystania (typowy cel kalkulacji)	Metoda (typowy sposób kalkulacji)	Oczekiwany przedział dokładności (typowe odchylenie w zaniżonych L i zawyżonych H wartościach) ^a	Pracochłonność przygotowania (typowy stopień wysiłku w odniesieniu do najmniejszego wskaźnika równego 1) ^b
Klasa 1	0%–2%	prezentacja koncepcji	kalkulacja wskaźnikowa, modelowanie parametryczne, oszacowanie, analogia	L: –20% do –50% H: +30% do +100%	1
Klasa 2	1%–15%	studium wykonalności	kalkulacja wskaźnikowa, modelowanie parametryczne	L: –15% do –30% H: +20% do +50%	2 do 4
Klasa 3	10%–40%	budżet, autoryzacja lub kontrola	kalkulacja uproszczona	L: –10% do –20% H: +10% do +30%	3 do 10
Klasa 4	30%–70%	kontrola lub oferta/przetarg	kalkulacja szczegółowa	L: –5% do –15% H: +5% do +20%	4 do 20
Klasa 5	50%–100%	sprawdzenie kosztorysu lub oferta/przetarg	kalkulacja szczegółowa	L: –3% do –10% H: +3% do +15%	5 do 100

Uwagi: ^a wartości +/- reprezentują typowe odchylenie procentowe kosztów rzeczywistych od kosztów szacowanych;
^b pracochłonność kalkulacji uzależniona jest od wielkości inwestycji budowlanej, jakości danych kalkulacyjnych oraz wykorzystywanych narzędzi.

Celem publikacji jest zaprezentowanie metody wspomagania kalkulacji kosztów robót budowlanych w różnych fazach przedsięwzięcia budowlanego, opartej na rzeczywistych danych z już zrealizowanych przedsięwzięć budowlanych (kosztorysach ofertowych). Baza danych bazować będzie na modelu informacji o obiekcie budowlanym BIM, pozwalającym na gromadzenie niezbędnych informacji nim i jego elementach, a także ułatwiającym obliczenia przedmiarowe.

3.2. WNIOSKOWANIE Z PRZYPADKÓW

Metoda wnioskowania z przypadków (CBR – Case Based Reasoning) ma kilka zalet, które pozwalają na wykorzystanie w procesie wspomagania analiz kosztów w budownictwie. Metoda CBR pozwala na wykorzystanie mechanizmu ciągłego

uczenia, który jest niezależny od eksperta. Mechanizm ten ma więc stosunkowo niskie wymagania dotyczące pozyskanej wiedzy np. braku precyzji posiadanych informacji.

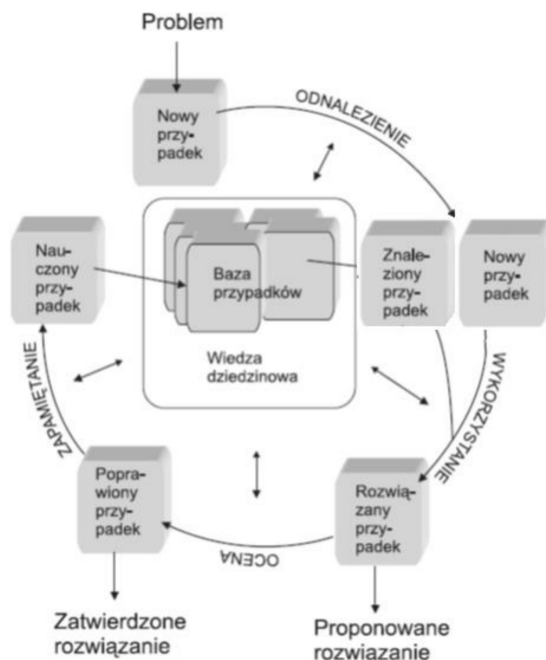
Analizując możliwość wspomagania kalkulacji kosztów robót budowlanych opartych na danych historycznych należy oprzeć się na danych przetworzonych (dane pozyskane na zasadzie dekompozycji kosztorysów ofertowych lub powykonawczych). Metoda CBR nie wymaga zastosowania wiedzy specjalistycznej opartej na regułach, a więc jest adekwatna do analizy i przetwarzania tak powstałych danych. Ilość zebranej wiedzy zależy od częstotliwości występowania procesów i możliwości gromadzenia danych o procesie. Cykl uczenia się na podstawie przykładów polega na wykorzystaniu danych z analogicznych przypadków, wdrażaniu rozwiązań i potencjalnych ulepszeń oraz zapisywaniu doświadczeń w bazie danych, z których można korzystać w przyszłości (Kończak i Paślowski, 2015).

Metoda CBR spełnia także oczekiwania praktyków np. kosztorysantów, ponieważ jest prostym i szybkim mechanizmem do kalkulacji kosztów opartym na danych rynkowych. Zaletą wnioskowania na podstawie przypadków jest to, że źródłem wiedzy nie są reguły, lecz baza danych zawierająca zbiór przypadków rozwiązanych poprzednio problemów. Nowe problemy rozwiązywane są poprzez wyszukiwanie najbardziej podobnych przypadków i ewentualną adaptację wybranego przypadku. CBR można zdefiniować jako system, który ma za zadanie rozwiązać nowy problem poprzez adaptację rezultatów, które były wykorzystane podczas rozwiązywania starych problemów. System wnioskowania z przypadków podobny jest do czarnej skrzynki, która zawiera mechanizm rozumowania oraz dane wejściowe opisujące problem, dane wyjściowe stanowiące rozwiązanie problemu oraz pamięć o przeszłych przypadkach, do których odwołuje się mechanizm rozumowania (Pal i Shiu, 2004).

Większość systemów wnioskowania z przypadków ma wbudowany mechanizm wnioskowania podzielony na dwa podstawowe moduły: moduł poszukujący, odpowiedzialny za wyszukiwanie odpowiednich przypadków w bazie przypadków oraz moduł wnioskujący, odpowiedzialny za znalezienie rozwiązania rozpatrywanego problemu na podstawie znalezionych przypadków.

Mechanizm wnioskowania z przypadków próbuje naśladować proces myślenia i uczenia się człowieka. Mechanizm wnioskujący opiera sposób swojego działania na zgromadzonym doświadczeniu. Metoda CBR pozwala na rozwiązywanie istniejących problemów na zasadzie analogii pomiędzy nowym przypadkiem stanowiącym bieżący problem, a przypadkami zaistniałymi już w przeszłości. Nowy problem jest rozwiązywany poprzez odnalezienie podobnego rozwiązania w dostępnym zbiorze przypadków i zastosowaniu do niego rozwiązania skojarzonego z odnalezionym przypadkiem lub przypadkami (Zima, 2015).

Proces wnioskowania z przypadków został schematycznie przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Cykl działania CBR. Źródło: oprac. własne na podst. (Aamond i Plaza, 1994).

Proces działania metody CBR można w dużym uproszczeniu opisać za pomocą czterech R:

- Retrieve (ang. wyszukać).
- Reuse (ang. ponownie wykorzystać).
- Revise (ang. korygować).
- Retain (ang. zachować).

Kolejne kroki postępowania w metodzie CBR mogą wyglądać następująco:

1. Analiza zaistniałego problemu (Nowy Przypadek) oraz wyodrębnienie zmiennych objaśniających opisujących przypadek, koniecznych do oceny podobieństwa pomiędzy przypadkami.
2. Wyszukanie (Retrieve) w bazie danych przypadku (Stary Przypadek) lub przypadków najbardziej zbliżonych do Nowego Przypadku spośród zbioru przypadków zgromadzonych w bazie danych.
3. Ponowne wykorzystanie (Reuse) wiedzy zawartej w znalezionym Starym Przypadku lub przypadkach do rozwiązania problemu.
4. Korekta (Revise) wybranego rozwiązania. Zaproponowane rozwiązanie jest testowane lub oceniane. Zdarza się, że stare rozwiązanie nie pasuje idealnie do nowego (np. podobieństwo między przypadkami jest mniejsze niż 100%)

lub przypadki są zróżnicowane pod względem czynników, które nie były rozpatrywane w trakcie porównania przypadków. Konieczna jest wówczas korekta rozwiązania tak, aby spełniało oczekiwania użytkownika.

5. Zachowanie znalezionej metody (Retain), czyli zapamiętanie nowego skorygowanego rozwiązania w bazie danych w celu ponownego wykorzystania. Celem uczenia jest pozyskiwanie użytecznych przypadków poprzez dodawanie nowych sytuacji i rozwiązań.

Jakość oraz skuteczność metody CBR zależy głównie od czterech czynników:

1. Dokładności metody dokonywania porównań przypadków. Celem pomiaru jest wyznaczenie całkowitego podobieństwa między dwoma przypadkami – nowym (rozpatrywanym), a starym (zaistniałym). Dokładność pomiaru zależy od wybranej miary odległości, rodzaju funkcji podobieństwa oraz rodzaju i typu atrybutów opisujących badany problem.
2. Metod adaptacji rozwiązań. Wybór sposobu adaptacji, tak aby wprowadzona korekta znalezionej metody ulepszyła wynikowy rezultat ze względu na czynniki nie uwzględnione w procesie wnioskowania.
3. Dokładności opisywanych przypadków gromadzonych w bazie danych. Na dokładność opisywanych przypadków ma wpływ wybór zmiennych objaśniających opisujących kryteria wpływające na rozwiązanie problemu. Kryteria te powinny być silnie skorelowane z rozwiązaniem oraz słabo skorelowane między sobą, zapewniając przy tym odpowiedni poziom nośności informacyjnej.
4. Wielkości i zakresu bazy danych. Dodanie przypadków do bazy danych zwiększy liczbę przypadków w bazie danych, co spowoduje zmniejszenie średniej odległości pomiędzy wektorem wejściowym i najbliższym wektorem przechowywanych przypadków. W przypadku małej bazy danych problemem może być możliwy brak pokrycia przez przypadki danej dziedziny wiedzy ze względu na niewielką ich liczbę w bazie przypadków (Dohn, Gumiński, Matusek i Zoleński, 2013).

Trudno jest zmierzyć podobieństwo, a także podać jego formalną definicję. Podobieństwo można opisać matematycznie jako relację lub funkcję. Wykorzystanie relacji do opisywania podobieństwa polega jedynie na określeniu, czy porównywane obiekty są podobne, czy nie. Bardziej wyrafinowane podejście pozwala na ocenę jakościową np. dwa obiekty są bardziej podobne niż inne. Można wyróżnić więc trzy modele relacji (Richter i Weber, 2013):

- Binarny predykat podobieństwa

$$\text{SIM}(xy) \Leftrightarrow x \text{ i } y \text{ są podobne.} \quad (1)$$

- Binarny predykat odmienności (niepodobieństwa)

$$\text{DISSIM}(xy) \Leftrightarrow x \text{ i } y \text{ są odmienne.} \quad (2)$$

- Podobieństwo jako relacja częściowego porządku

$$R(x, y, z) \iff x \text{ jest tak podobne do } y, \text{ jak } x \text{ do } z. \quad (3)$$

Podobieństwo wyrażane jako funkcja jest wyrażeniem numerycznym podobieństwa dwóch przypadków i jest trudniejsze w obliczeniach. Pomiar podobieństwa polega na przyjęciu przez funkcję podobieństwa dwóch argumentów i określenie zgodnie z przyjętym rodzajem funkcji ich podobieństwa.

Celem pomiaru podobieństwa między przypadkami jest wyznaczenie całkowitego podobieństwa dla rozpatrywanego problemu między dwoma przypadkami – nowym, a starym. Prosty i wiarygodny sposobem, aby to zrobić, jest użycie ważonych sum lokalnych podobieństw za pomocą wag jako współczynników (Richter i Weber, 2013). Dla porównywanych przypadków, które są opisane przez n atrybutów:

- dla nowego przypadku $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,
- dla starego przypadku $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$.

oblicza się wstępnie podobieństwa lokalne

$$\text{sim}_1(x_1, y_1), \text{ sim}_2(x_2, y_2), \dots, \text{ sim}_n(x_n, y_n).$$

Kolejnym krokiem jest obliczenie tzw. podobieństwa globalnego $\text{SIM}(x, y)$ ze wzoru:

$$\text{SIM}(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i \text{sim}_i(x_i, y_i), \quad (4)$$

gdzie:

- $\text{SIM}(x, y)$ – podobieństwo globalne między przypadkami x i y ,
- $\text{sim}_i(x, y)$ – podobieństwo lokalne między wartościami x_i i y_i zmiennej i ,
- ω_i – waga podobieństwa lokalnego i .

Podobieństwo może być mierzone dla różnych rodzajów i typów zmiennych:

- Ilościowych (mierzalnych) – dających się wyrazić w pewnej skali w założonej jednostce. Zmiennymi mierzalnymi są np koszt [zł], masa [kg], długość [m] itp.
- Jakościowych (niemierzalnych) – nie dają się jednoznacznie scharakteryzować za pomocą liczb, nie można ich zmierzyć. Przykładem zmiennych jakościowych są np. kolor materiału, estetyka, stan elementu itp.
- Porządkowych – pozwalających na uporządkowanie wszystkich elementów zbioru. Zmienne porządkowe określa się przymiotnikami, np. „mały”, „średni” lub „duży”.

Podobieństwo przypadków dla zmiennych ilościowych oraz zmiennych porządkowych można wyliczać zgodnie ze wzorem (za: (Traczyk, 2010)):

$$\text{sim}(x_i, y_i) = 1 - \frac{|x_i - y_i|}{w_{\max} - w_{\min}}, \quad (5)$$

gdzie:

x_i – wartość zmiennej objaśniającej dla nowego przypadku;

y_i – wartość zmiennej objaśniającej i -tego starego przypadku;

w_{\max} , w_{\min} – wartości minimalne i maksymalne dla wszystkich starych przypadków zawartych w bazie.

Podobieństwo przypadków dla zmiennych jakościowych można wyliczać zgodnie ze wzorem:

$$\text{sim}(x_i, y_i) = 1 - \frac{|n(x_i) - n(y_i)|}{M - 1}, \quad (6)$$

gdzie:

$n(x_i)$, $n(y_i)$ – ocena rozwiązania w uporządkowanym szyku wartości $n = 1, 2, \dots, M$,

M – liczba określająca wielkość przyjętej skali.

W przypadku gdy jedna wartość lub obie wartości zmiennych są nie znane wartość podobieństwa równa jest zero:

$$\text{sim}(x_i, \text{brak danych}) = 0 \quad \text{lub} \quad \text{sim}(\text{brak danych}, \text{brak danych}) = 0. \quad (7)$$

W przypadku kiedy mamy do czynienia z danymi niejasnymi lub nieprecyzyjnymi przy obliczaniu podobieństwa przypadków należy skorzystać z teorii zbiorów rozmytych. Na wstępie zapisuje się niedokładne informacje w postaci liczby rozmytej i określa kształt funkcji przynależności. Formuła obliczeniowa podobieństwa dwóch zmiennych wyrażonych w formie liczb rozmytych zależy od przyjętego kształtu funkcji przynależności. Przykładowo dla dwóch trapezoidalnych liczb rozmytych $A_{NC} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ i $B_{Ci} = (b_1, b_2, b_3, b_4)$, podobieństwo $\text{SIM}(A_{NC}, B_{Ci})$ może zostać określone następującą formułą (Chen i Chen, 2003):

$$\text{sim}(x_i, y_i) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^4 |a_i - b_i|}{4}, \quad (8)$$

gdzie:

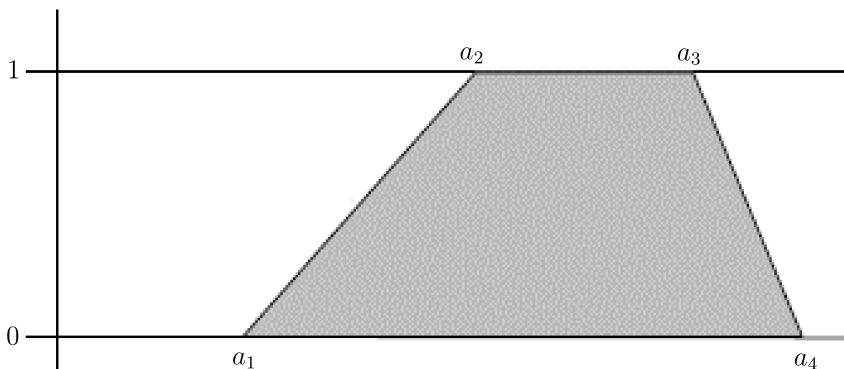
$\text{sim}(x_i, y_i)$ – podobieństwo między liczbami rozmytymi,

x_i – rozmyta wartość zmiennej i dla nowego przypadku,

y_i – rozmyta wartość zmiennej i dla starego przypadku,

a_i , b_i – punkty charakterystyczne dla liczb rozmytych x_i i y_i .

Nadmienić trzeba, że wzorów matematycznych pozwalających na obliczenie podobieństw przypadków jest dużo, większość jednak bazuje na obliczaniu odległości pomiędzy zmiennymi objaśniającymi analizowany problem. Najbardziej znane formuły obliczeniowe to na przykład odległość Euklidesowa, odległość Manhattan lub odległość Czebyszewa. Przykładowe miary odległości zostały pokazane w tabeli 3.



Rys. 2. Punkty charakterystyczne a_1, a_2, a_3 i a_4 dla trapezowego kształtu funkcji przynależności. Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3.

Podstawowe miary odległości. Źródło: opracowanie własne.

Miary odległości	Formuła	Uwagi
Odległość Euklidesowa	$\sqrt{\sum_{k=1}^n (i_k - j_k)^2}$	Pierwiastek kwadratowy z sumy odległych przypadków minimalna wartość 0, nie ma górnego limitu.
Kwadratowa odległość Euklidesowa	$\sum_{k=1}^n (i_k - j_k)^2$	Suma odległych przypadków, minimalna wartość 0, nie ma górnego limitu.
Odległość Manhattan	$d_{ij} = \sum_{k=1}^n i_k - j_k $	Suma wartości bezwzględnych różnic ich współrzędnych, minimalna wartość 0, nie ma górnego limitu.
Odległość Czebyszewa	$d_{ij} = \max_k i_k - j_k $	Stosowna w tych przypadkach, w których chcemy zdefiniować dwa przypadki różniące się między sobą w jednym dowolnym wymiarze.
Podobieństwo cosinusowe	$d_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n i_k \cdot j_k}{\left(\sum_{k=1}^n i_k^2 \cdot j_k^2\right)^{1/2}}$	Podobieństwo cosinusowe jest miarą podobieństwa między dwoma niezerowymi wektorami kąta między nimi. Dwa wektory o kącie 0° mają podobieństwo równe 1, o kącie 90° mają podobieństwo równe 0, a dwa wektory przeciwne mają podobieństwo -1 .
Dywergencja Kullbacka-Leibera	$\sum_{k=1}^n i_k \log \left(\frac{i_k}{j_k}\right)^2$	Jest miarą określającą rozbieżności między dwoma rozkładami prawdopodobieństwa. Dywergencja przyjmuje wartości nieujemne, a wartość 0 oznacza, że porównywane rozkłady są identyczne.

i, j – przypadki opisane przez wektor wartości zmiennych objaśniających,
 n – liczba zmiennych.

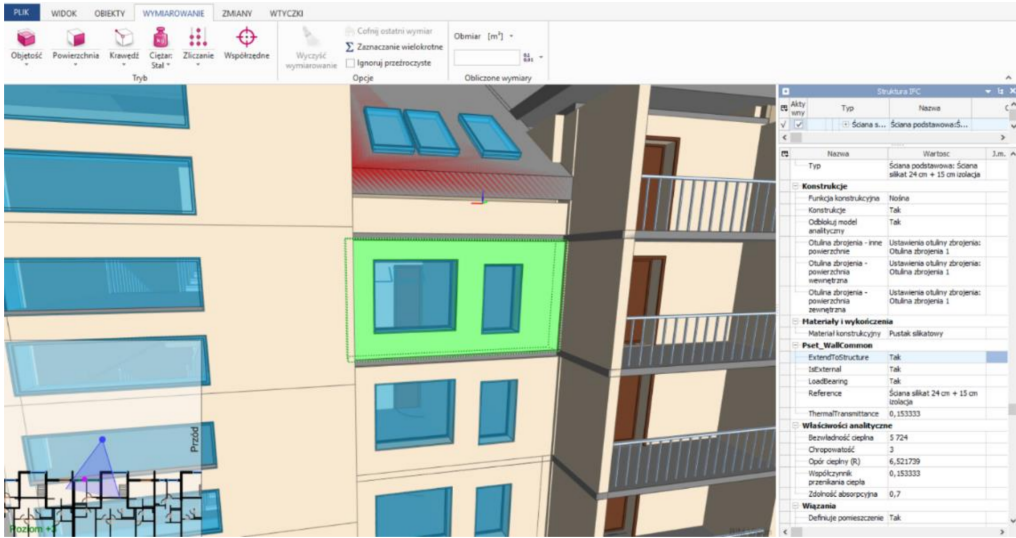
3.3. MODEL INFORMACJI O OBIEKCIE BUDOWLANYM

We wszystkich krajach można zaobserwować dynamiczny rozwój m.in. metod podejmowania decyzji, a ich rozwój całkowicie zależny jest od rozwoju IT (Kapliński, 2008). Jedną z najbardziej popularnych i skupiających uwagę w sektorze budowlanym technologii jest technologia BIM (ang. Building Information Modeling – modelowanie informacji o obiekcie budowlanym).

Charles Eastman w swojej książce (Eastman, 1999) definiuje BIM jako cyfrową reprezentację procesu budowlanego ułatwiającą wymianę informacji i współdziałanie przy użyciu formatu cyfrowego. Koncepcja modelowania informacji o obiekcie budowlanym jest więc budową wirtualnego budynku przed budową fizyczną, w celu rozwiązania problemów, które mogą wystąpić w trakcie realizacji oraz symulowania i analizowania potencjalnych skutków podjętych działań. Centrum modelowania informacji o obiekcie budowlanym jest autorytatywnym modelem informacji o obiekcie (Smith, 2007). Modelowanie informacji o obiekcie budowlanym to koncepcja oparta przede wszystkim na skutecznej komunikacji pomiędzy wszystkimi uczestnikami procesu inwestycyjnego z wykorzystaniem nowoczesnych technologii informatycznych. Rozwiązanie to, wciąż nowatorskie dla polskiego budownictwa, jest obszarem wielu ciekawych wdrożeń (Araszkiewicz, 2016). Korzystanie z wiedzy zawartej w modelu BIM może znacznie poprawić m.in. dokładność opracowań kosztowych, przyspieszyć proces przedmiarowania, umożliwić lepszą koordynację branż, a także wspomagać projektowanie oparte na nowoczesnych koncepcjach np. zrównoważonego rozwoju, lean management lub agile management.

Jednym z podstawowych zadań BIM jest gromadzenie i współdzielenie danych o obiekcie budowlanym. Zaletą modelu BIM jest to, że wszystkie dane o obiekcie budowlanym są zgromadzone i dostępne przez cały cykl życia obiektu (Jernigan, 2007). Przykładowe informacje gromadzone w modelu BIM na przykładzie elementu ściana zostały pokazane na rys. 3.

Jedną z kluczowych zalet BIM dla przedsięwzięcia jest efektywne zarządzanie danymi i wzrastające zaangażowanie uczestników przedsięwzięcia (Pittard i Sell, 2016). BIM jest często uznawany za odpowiednie narzędzie do wspomaganie planowania, kalkulacji kosztów i wymiany informacji pomiędzy uczestnikami procesu budowlanego, co prowadzi do maksymalizacji wydajności, poprawy jakości dokumentacji oraz redukcji czasu i wysiłku (Sebastian i Berlo, 2010). Idea gromadzenia w jednym modelu BIM danych geometrycznych, gdzie każdy element jest cyfrowym prototypem fizycznych komponentów obiektu budowlanego oraz niezbędnych informacji o obiekcie i jego elementach, stanowi wspaniałe źródło wiedzy m.in. dla kosztorysantów. Dzięki temu model BIM pozwala dokonać analizy budynku jeszcze zanim zacznie się jego budowa, a także znaleźć błędy w projekcie nim dojdzie do jego realizacji (Jończy i Zima, 2016). Informacje opisujące element są w zasadzie nieograniczone i bardzo różnorodne. Mogą



Rys. 3. Model BIM budynku wielorodzinnego i zawarte w nim przykładowe informacje o ścianie zewnętrznej – widok w przeglądarce BIM Vision. Źródło: opracowanie własne.

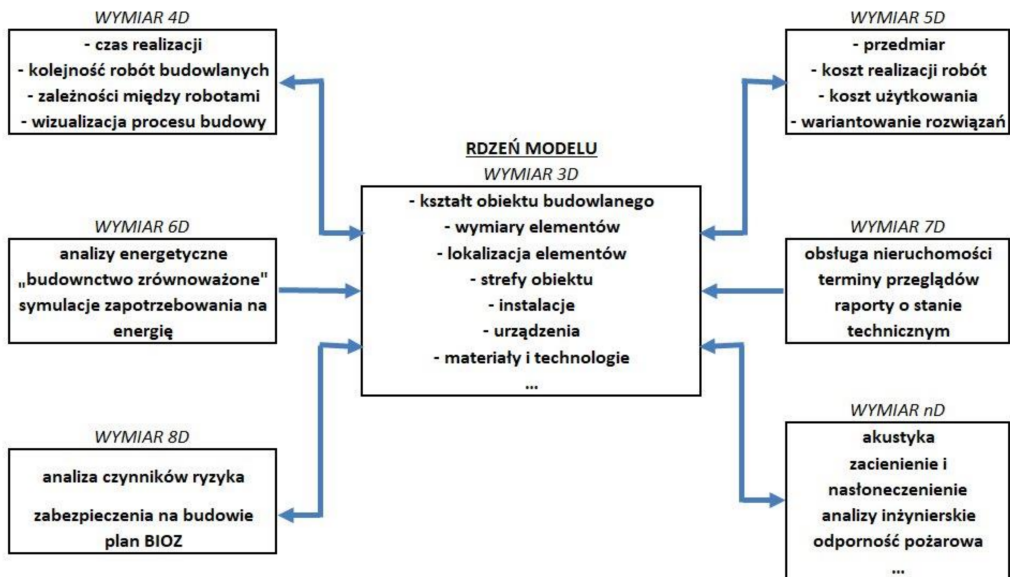
pochodzić z wielu źródeł: wtycznych inwestorskich, informacji od projektanta, wykonawcy budowlanego, przepisów prawnych, badań, opinii, ekspertyz, analiz inżynierskich itp.

Technologia BIM definiowana jest często jako n-wymiarowy zapis informacji o przedsięwzięciu budowlanym, począwszy od wymiaru 3D, prezentującego trójwymiarowy model obiektu budowlanego, nakładając kolejne wymiary zawierające informacje związane z czasem (4D), kosztami (5D), analizami energetycznymi (6D) itd. Kolejne wymiary modelu BIM wraz z przykładowymi informacjami zawartymi w danym wymiarze modelu zostały pokazane na rys. 4. W prezentowanym rozdziale zajęto się wymiarem 5D dotyczącym analiz kosztowych.

Opracowania kosztowe wykonywane w fazie koncepcji lub przygotowania przedsięwzięcia budowlanego bazują na modelu Macro BIM, a opracowania w późniejszych fazach oparte są na modelu Micro BIM. Model Macro BIM można opisać jako model informacji o obiekcie budowlanym o niskim stopniu szczegółowości geometrii oraz informacji w nim zawartych, stosowany do analiz na poziomie makro.

Model Micro BIM to model informacji o obiekcie budowlanym o dużym stopniu szczegółowości, wykorzystywany w fazach projektowania oraz budowy, stosowany do analiz na poziomie mikro, w tym kalkulacji kosztów, planowania czasowego itp.

Klasyfikacja modelu obiektu budowlanego ze względu na szczegółowość geometrii i zawartość informacyjną może być przykładowo opisywana za pomocą



Rys. 4. Przykładowe rodzaje informacji zawartych w modelu BIM z podziałem na wymiary.
Źródło: opracowanie własne.

stopnia rozwoju LOD (Level of Development) określającego poziom rozwoju modelu informacji o obiekcie budowlanym. LOD można określić zatem jako poziom szczegółowości zamodelowania elementów geometrii oraz zawartości informacji. LOD wprowadza więc systematykę, precyzując w jakim stopniu elementy modelu zostały opisane i zamodelowane, od fazy przygotowania aż do fazy budowy. Stopień rozwoju modelu obiektu budowlanego jest elementem pozwalającym na zdefiniowanie poziomu opisu elementów modelu przez np. inwestora w całym procesie projektowania i budowy.

Stopień rozwoju modelu budynku jako koncepcja jest sumą różnych aspektów, które określają informacje i geometrię każdego elementu obiektu budowlanego, w tym (New Zealand BIM Handbook, 2014):

- LOd (Level of detail) – poziom szczegółowości,
- LOa (Level of accuracy) – poziom dokładności,
- LOi (Level of information) – poziom informacji,
- LOc (Level of coordination) – poziom koordynacji.

Poziom szczegółowości LOd określa poziom precyzji geometrycznej w stosunku do rzeczywistego obiektu. Zgodnie z protokołem PAS1192-2 sekcja 9.9 (za: (AEC, 2015)) podział modelu BIM ze względu na parametry graficzne może wyglądać następująco:

- G LOD 1 – grafika symboliczna – elementy budowlane są odwzorowane w sposób symboliczny, nie muszą być zamodelowane w skali.

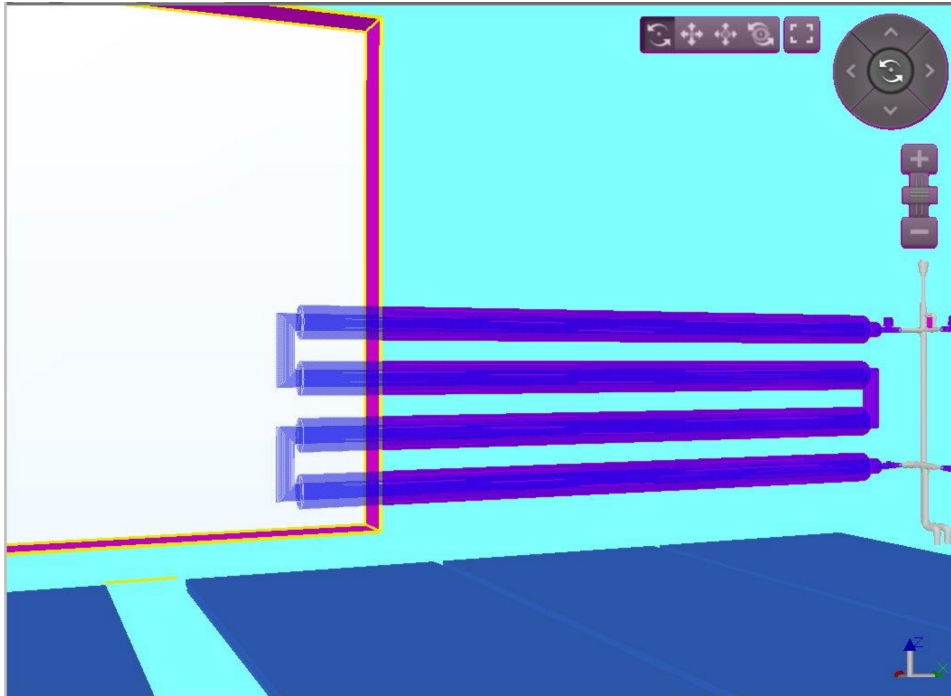
- G LOD 2 – koncepcja – grafika z minimalną ilością szczegółów identyfikujących element np. symbol okna umiejscowionego w ścianie bez doprecyzowania rodzaju okna, materiałów itp.
- G LOD 3 – model ogólny – model wystarczający do celów identyfikacji rodzaju elementów budowlanych, materiału. Zawiera przybliżone wymiary elementów.
- G LOD 4 – grafika szczegółowa – model odpowiadający wymaganiom projektu budowlanego, odpowiedni do przeprowadzenia analiz kosztowych i postępowania przetargowego.
- G LOD 5 – model odpowiadający wymaganiom projektu wykonawczego, prezentujący szczegółowe, doprecyzowane wymagania budowlane.
- G LOD 6 – model powykonawczy, precyzyjnie odwzorowujący wykonany obiekt budowlany.

Autor proponuje aby pozostałe poziomy dokładności LOa, LOi, LOc oceniać w oparciu o podobny podział.

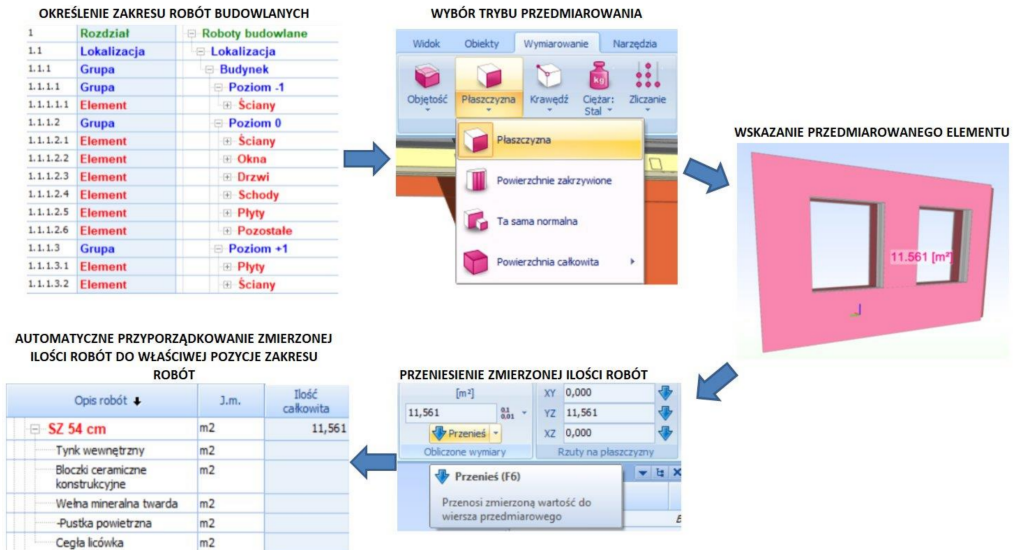
Poziom dokładności LOa opisuje precyzję określenia wymiarów elementu budowlanego oraz jego lokalizację w modelu (A LOD 1–A LOD 6). Poziom informacji LOi jest często nazywany poziomem danych i określa jakie informacje mają opisywać element budowlany na danym etapie przedsięwzięcia (I LOD 1–I LOD 6). Poziom koordynacji LOc odnosi się do poziomu współpracy z innymi elementami modelu i ich przestrzennej koordynacji (C LOD 1–C LOD 6). LOc ma pomagać w określeniu poziomu koordynacji między branżami, np. przez wykrywanie kolizji przestrzennych (clash detection) między obiektami w modelu budynku, przesunięć branż względem siebie w przestrzeni projektowej (rys. 5), oraz poprzez określenie, oznaczenie i umieszczenie wszelkich zmian i braków dla danego projektu.

Zastosowanie klasyfikacji LOD określającej stopień rozwoju modelu obiektu budowlanego ma za zadanie ułatwić komunikację i współpracę między uczestnikami procesu budowy poprzez precyzyjne sformułowanie wymagań dotyczących modelu w każdej fazie przedsięwzięcia budowlanego.

Szybkość i prostota opracowania przedmiaru i kalkulacji kosztów zależy w dużej mierze od informacji zawartych w modelu BIM oraz przyporządkowania elementów do odpowiednich warstw i typów. Aplikacje wykorzystujące modele BIM pozwalają obecnie na automatyczne tworzenie zakresu robót oraz odczytanie wskazanej wielkości określającej ilość robót do wykonania. Zakres robót automatycznie zostaje eksportowany do programu kosztorysowego z modelu BIM zapisanego np. w formacie IFC. Ilości robót są obliczane poprzez wskazanie danego elementu lub grupy elementów i wybór trybu obliczeń (np. objętość, powierzchnia, pojedynczy wymiar, masa elementu itp.). Osoba wykonująca przedmiar zaznacza przedmiarowany element lub elementy, a po zatwierdzeniu właściwej pomierzonej wartości, wynik przenosi do tabeli przedmiarowej. Zatwierdzony wynik



Rys. 5. Przykład błędnej koordynacji modelu architektury z modelem CO – grzejnik wystający poza światło ściany. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Sposób przedmiarowania oparty na modelu BIM. Źródło: opracowanie własne.

pomiaru automatycznie jest przyporządkowany do właściwego elementu występującego w zakresie robót. Na rysunku 6 pokazany został sposób przedmiarowania wykorzystujący opisany schemat.

Kosztorysanci powinni rozważyć wykorzystanie technologii BIM w celu ułatwienia pracochłonnej czynności przedmiarowania oraz szybkiej wizualizacji, identyfikacji, oceny stanu i zapewnienia większej ilości czasu na proces optymalizacji cen od podwykonawców i dostawców (Eastman, Teicholz, Sacks i Liston, 2011). Wykorzystanie modelu BIM jako podstawy do obliczeń kosztów pozwoli na przyspieszenie i dużą precyzję obliczeń przedmiarowych. Zastosowanie z kolei standardu LOD umożliwi dokładne określenie stanu, w którym znajduje się model obiektu budowlanego oraz określenie niezbędnego poziomu szczegółowości modelu BIM przygotowanego przez projektantów do celów wykonania precyzyjnych kalkulacji kosztów.

3.4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY ILUSTRUJĄCY ZASTOSOWANIE METODY CBR OPARTEJ NA MODELU BIM

Przykład obliczeniowy oparty będzie na modelu MicroBIM (poziom rozwoju modelu LOD 3, LOD 4, LOD 5) i dotyczy będzie kalkulacji kosztów budowy boiska sportowego. Podstawą do przeprowadzenia obliczeń jest baza danych IFC-DB. Baza danych zawiera dane dotyczące inwestycji polegających na wybudowaniu boisk piłkarskich w latach 2014–2015. W celu uporządkowania i sformalizowania danych, baza danych IFC-DB określona została za pomocą formuły:

$$\text{IFC} - \text{DB} = \bigcup_{i=1}^m \text{Przypadek}_i \{G_i, R_i, OS_i, O_i\}, \quad (9)$$

gdzie:

Przypadek_{*i*} {*G_i*, *R_i*, *OS_i*, *O_i*} – *i*-ty przypadek ekstraktowany z modelu IFC,

G_i – graficzna reprezentacja elementów modelu dla *i*-tego przypadku,

R_i – rozwiązanie dla *i*-tego przypadku,

OS_i – opis sytuacji dla *i*-tego przypadku,

O_i – zmienne objaśniające dla *i*-tego przypadku,

m – liczba przypadków w bazie.

W bazie znajduje się zbiór przypadków, w którym zawarte są struktury funkcji składowych, określone dla nich konkretne rozwiązania, które zrealizowano w przeszłości (Radziejowska i Zima, 2015). Baza danych boisk sportowych IFC-DB zawiera 4 grupy informacji: rozwiązanie *R_i*, opis sytuacji *OS_i*, zmienne objaśniające *O_i* oraz informacje dotyczące graficznej reprezentacji elementów modelu *G_i*. Rozwiązaniem *R_i* jest cena jednostkowa elementu budowlanego lub roboty budowlanej w zł/jednostkę odniesienia. Opis sytuacji *OS_i* zawiera informacje nie

rozpatrywane w toku wyszukiwania podobnych przypadków, a wykorzystywane do adaptacji rozwiązania, takie jak:

- lokalizacja obiektu,
- data oferty.

Zmienne objaśniające O_i to dane jakościowe, specyficzne dla poszczególnych elementów lub robót budowlanych, wykorzystywane w celu ich opisu. Przykładowo dla roboty budowlanej polegającej na usunięciu wierzchniej warstwy ziemi urodzajnej, wyróżniono tylko jedną zmienną objaśniającą (na podstawie opisów stosowanych w kosztorysach budowlanych wynikających z opisów robót w katalogach zawierających nakłady rzeczowe): technologia.

Informacje dotyczące graficznej reprezentacji elementów modelu G_i przedstawiają dane ilościowe. Dla przykładowej roboty polegającej na usunięciu wierzchniej warstwy ziemi urodzajnej wyróżniono dwie takie informacje charakteryzujące robotę budowlaną:

- grubość warstwy humusu [cm],
- ilość robót w [m²].

Zmienne objaśniające O_i oraz informacje dotyczące graficznej reprezentacji elementów modelu G_i zostaną wykorzystane w procesie wnioskowania z przypadków, w celu wyszukania najbardziej podobnego przypadku z bazy danych do nowego rozpatrywanego przypadku.

Prezentowany model wspomagania kosztorysowania UCE-MICRO (Unit Cost Estimation-MICRO) oparty jest na modelu Micro BIM i kalkulacji cen jednostkowych elementów budowlanych zawartych w modelu BIM. Ceny jednostkowe są wyznaczone w wyniku zastosowania metody CBR, a więc znalezienia najbardziej podobnego przypadku realizacji danego elementu budowlanego w bazie danych IFC-DB.

Problemem do rozwiązania jest wyznaczenie kosztów realizacji nowobudowanego boiska sportowego. Koszt realizacji boiska sportowego będzie obliczony jako suma kosztów poszczególnych robót budowlanych wchodzących w skład zakresu robót do zrealizowania pogrupowanych zgodnie z klasyfikacją OmniClass.

Poniżej przedstawiono i krótko scharakteryzowano kolejne kroki postępowania w modelu UCE-MICRO:

1. Wybór i opisanie robót budowlanych (Robota budowlana - Rb) i elementów budowlanych (Element budowlany - E) składających się na pełny zakres prac za pomocą zmiennych objaśniających O_i ,
2. Wybór i odczytanie z modelu BIM informacji dotyczących graficznej reprezentacji elementów modelu G_i ,
3. Określenie wag dla wybranych zmiennych jakościowych i ilościowych,
4. Wyliczenie podobieństw lokalnych $\text{sim}(x_i, y_i)$ każdej roboty i każdego elementu budowlanego stanowiącego zakres prac dla odpowiednio dobranych

- zmiennych objaśniających O_i , charakteryzujących roboty lub elementy budowlane. Wyliczeń dokonuje się poprzez obliczanie podobieństwa parami przypadku nowego i przypadków starych z bazy danych,
5. Obliczenie podobieństwa globalnego $SIM(x, y)$ jako sumy iloczynów podobieństw lokalnych dla poszczególnych zmiennych objaśniających oraz ich wag (dla każdej roboty oraz elementu budowlanego),
 6. Wyszukanie 3 przypadków o najwyższym podobieństwie - dla większej ilości przypadków o najwyższym podobieństwie, wszystkie są przyjmowane do analizy. W powyższych sytuacjach rozwiązanie jest wstępnie zatwierdzone, a cena roboty lub elementu wyliczana ze średniej ważonej wybranych starych przypadków, gdzie waga jest wyliczana na podstawie wartości podobieństwa przypadków. W przypadku braku podobieństwa spełniającego oczekiwania decydenta (np. podobieństwo wyższe niż 70%), wykonywana jest klasyczna kalkulacja kosztorysowa metodą szczegółową i wynik tej kalkulacji traktowany jest jako zatwierdzone rozwiązanie.
 7. Dla trzech lub więcej przyjętych rozwiązań wybranych przypadków, cena jednostkowa roboty lub elementu wyliczana jest z wykorzystaniem średniej ważonej uwzględniającej wartość wyliczonego podobieństwa.
 8. W przypadku znalezienia i przyjęcia rozwiązań z bazy danych IFC-DB rozwiązania są korygowane przez uwzględnienie współczynnika regionalnego w_R i współczynnika waloryzacyjnego w_W .
 9. Ceny jednostkowe dla poszczególnych robót są przemnażane przez automatycznie wygenerowany w modelu BIM Nowego Przypadku przedmiar dla każdej z analizowanych robót lub elementów budowlanych i sumowane,
 10. Wyznaczenie ostatecznej szacowanej ceny nowego przypadku zgodnie ze wzorem:

$$\begin{aligned}
 C_k^{NC} = & Cj_1'(Rb1) \cdot L_1(Rb1) + Cj_2'(Rb2) \cdot L_2(Rb2) + \dots \\
 & + Cj_n'(Rbn) \cdot L_n(Rbn) + Cj_1'(E1) \cdot L_1(E1) + Cj_2'(E2) \cdot L_2(E2) \\
 & + \dots + Cj_m'(Em) \cdot L_m(Em) + \text{inne koszty}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

gdzie:

C_k^{NC} – cena kosztorysowa nowego przypadku,

$Cj_i(Rbi)$ – zatwierdzona w toku analizy cena jednostkowa i -tej roboty budowlanej Ri ,

$Cj_k(Ek)$ – zatwierdzona w toku analizy cena jednostkowa k -tego elementu budowlanego Ek ,

$L_i(Ri)$ – ilość robót dla i -tej roboty budowlanej nowego przypadku,

$L_k(Ek)$ – ilość robót k -tego elementu budowlanego nowego przypadku,

i – liczba rodzajów robót budowlanych wchodzących w zakres prac zgodnie z modelem BIM obiektu budowlanego ($i = 1, \dots, n$),

k – liczba elementów budowlanych wchodzących w zakres prac zgodnie z modelem BIM obiektu budowlanego ($k = 1, \dots, m$),

inne koszty – cena wykonania robót i elementów budowlanych, których nie znaleziono w bazie danych i zachodzi konieczność wykonania klasycznej szczegółowej kalkulacji kosztorysowej.

11. Wiedza nowo powstała jest wykorzystywana w praktyce. Po korekcie wynikającej z weryfikacji praktycznej, nowy przypadek jest zapamiętywany i dołączany do istniejącej bazy IFC-DB.

Zakres robót budowlanych może zostać zidentyfikowany automatycznie w programie BIMestiMate na podstawie modelu BIM boiska sportowego zapisanego w formacie IFC. Zidentyfikowane składowe zakresu prac zostały pokazane w tabeli 4.

Tabela 4.

Przykładowe roboty lub elementy budowlane wchodzące w zakres wykonania przykładowego boiska sportowego. Źródło: opracowanie własne.

Numer wg klasyfikacji Omniclass	Nazwa roboty budowlanej lub elementu
21-07 10 10 50	Usunięcie humusu
21-07 10 70 20	Wykopy i zasypy
21-01 40 90 60	Podłoża i podbudowy
21-07 20 30 20	Krawężniki i wodościeki chodników
21-07 20 30 10	Nawierzchnie chodników
21-06 10 60 30	Nawierzchnie boisk sportowych
21-07 20 60 20	Ogrodzenia i bramy
21-06 10 60 20	Osiatkowanie ochronne – tzw. piłkochwyty
21-05 10 70 50	Elementy wyposażenia sportowego

Przykład danych dla grupy robót „21-06 10 60 30 Nawierzchnie boisk sportowych” wraz z Nowym Przypadkiem i przyjętymi wagami zmiennych objaśniających został przedstawiony w tabeli 5. Zostały określone wagi $\omega_i(21-06 10 60 30)$ dla kolejnych zmiennych objaśniających. Wykorzystano w tym celu współczynniki korelacji poszczególnych zmiennych objaśniających z ceną wykonania nawierzchni.

Tabela 5.

Przykładowe rekordy bazy danych dla grupy robót „21-06 10 60 30 Nawierzchnie boisk sportowych”. Źródło: opracowanie własne.

Kryterium/Przypadek	Waga $\omega_i(21-06 10 60 30)$	Nowy Przypadek	Przypadek 1	Przypadek 2	Przypadek 3
Typ nawierzchni	28,59%	poliuretanowa			
Grubość warstwy [mm]	39,05%	47	49	51	19
Ilość robót [m ²]	32,36%	1402,90	1196,00	613,1	207
Cena jednostkowa [zł/m ²]	–	?	149,00 zł	160,00 zł	135,00 zł

ni boisk sportowych. Korelacje wyliczono dla zmiennych o charakterze ilościowym stosując współczynnik korelacji liniowej Pearsona, a dla zmiennych mających charakter jakościowy współczynnik korelacji kolejnościowej Spearmana. Przyjęto też założenie o odrzuceniu zmiennych objaśniających o nikłej korelacji lub całkowitym braku korelacji według skali Guilford'a.

Waga zmiennych objaśniających została określona ze wzoru:

$$\omega_i(21-06\ 10\ 60\ 30) = \frac{|r_i|}{\sum_{i=1}^n |r_i|}, \quad (11)$$

gdzie:

$\omega_i(21-06\ 10\ 60\ 30)$ – waga i -tej zmiennej objaśniającej dla roboty budowlanej „Wykopy i zasypy”,

r_i – współczynnik korelacji dla i -tej zmiennej objaśniającej,

n – liczba zmiennych objaśniających dla roboty budowlanej „Wykopy i zasypy”.

W tabeli 6 pokazano wyniki obliczeń podobieństw lokalnych dla roboty „21-06 10 60 30 Nawierzchnie boisk sportowych”. Obliczeń podobieństw lokalnych dokonuje się stosując wzory (4), (5), (6) i (7) zgodnie z opisanymi wcześniej założeniami, porównując parami Nowy Przypadek ze wszystkimi kolejnymi starymi przypadkami z bazy danych IFC-DB.

Tabela 6.

Obliczenia podobieństw lokalnych dla roboty „21-06 10 60 30 Nawierzchnie boisk sportowych”.
Źródło: opracowanie własne.

Zmienne objaśniające	Przypadek			
	Przypadek 1	Przypadek 2	Przypadek 3	Przypadek n
$\text{sim}_{\text{typ nawierzchni}}^{\text{nawierzchnie}}$	1,00	1,00	1,00	...
$\text{sim}_{\text{grubość warstwy}}^{\text{nawierzchnie}}$	0,96	0,93	0,49	...
$\text{sim}_{\text{ilość robót}}^{\text{nawierzchnie}}$	0,97	0,89	0,84	...
$\text{SIM}^{\text{nawierzchnie}}$	0,98	0,94	0,77	...

Przykładowe obliczenia zaprezentowano dla porównania Nowego Przypadku z Przypadkiem 1. Podobieństwo lokalne dla zmiennych objaśniających ilościowych wyliczone zgodnie z formułą (4) jest równe:

$$\text{sim}_{\text{grubość warstwy}}^{\text{nawierzchnie}} (\text{Nowy przypadek, Przypadek 1}) = 1 - \frac{|47 - 49|}{55 - 0} = 0,96,$$

$$\text{sim}_{\text{ilość robót}}^{\text{nawierzchnie}} (\text{Nowy przypadek, Przypadek 1}) = 1 - \frac{|1402,90 - 1196|}{7500 - 0} = 0,97.$$

Podobieństwo lokalne dla zmiennych objaśniających jakościowych wyliczone zgodnie z formułą (5) jest równe:

$$\text{sim}_{\text{typ nawierzchni}}^{\text{nawierzchnie}}(\text{Nowy przypadek, Przypadek 1}) = 1 - \frac{|1 - 1|}{4 - 1} = 1.$$

W bazie danych zidentyfikowano 4 rozwiązania dotyczące zastosowanych nawierzchni: poliuretanowa, trawa naturalna, trawa sztuczna i mączka ceglana. Liczba wartości M jest więc równa 4.

Zakładając, że decydent dysponuje danymi niepewnymi dotyczącymi przykładowo grubości warstwy nawierzchni boisk (tabela 7) można wykorzystać w obliczeniach wzór (8).

Tabela 7.

Przykładowe dane dotyczące zmiennej „grubość warstwy” dla roboty budowlanej „21-06 10 60 30 Nawierzchnie boisk sportowych”. Źródło: opracowanie własne.

Zmienna	Przypadek						
	Nowy	1	2	3	4	5	6
gr. warstwy [mm]	min. 30	min. 40	60–80	około 40	40–60	ponad 60	60–80

W tabeli 8 pokazano punkty charakterystyczne dla Nowego Przypadku i Przypadku 5, dla przyjętego trapezowego kształtu funkcji przynależności zgodnie z rys. 2.

Tabela 8.

Wartości charakterystyczne dla zmiennej „grubość warstwy” Nowego Przypadku i Przypadku 5. Źródło: opracowanie własne.

$m(x)$	Punkty charakterystyczne	
	Nowy Przypadek	Przypadek 5
0	$a_1 = 30$	$a_1 = 43$
1	$a_2 = 40$	$a_2 = 50$
1	$a_3 = 60$	$a_3 = 60$
0	$a_4 = 60$	$a_4 = 60$

Obliczenia bazują na wartościach punktów charakterystycznych i są wykonywane z wykorzystaniem wzoru (8). Wyniki obliczeń zostały przedstawione w tabeli 9.

Przykładowe obliczenie podobieństwa lokalnego Nowego Przypadku do Przypadku 1 zostało pokazane poniżej:

$$\text{sim}_{\text{grubość warstwy}}^{\text{nawierzchnie}}(\text{Nowy przypadek, Przypadek 1}) = 1 - \frac{|0,3 - 0,48| + |0,4 - 0,49| + |0,6 - 0,49| + |0,6 - 0,5|}{4} = 0,88.$$

Wyniki obliczeń podobieństwa Nowego Przypadku i Przypadków 1–6. Źródło: opracowanie własne.

Punkty charakterystyczne	Przypadek 1	Przypadek 2	Przypadek 3	Przypadek 4	Przypadek 5	Przypadek 6
0	0,48	0,6	0,3	0,4	0,6	0,6
1	0,49	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6
1	0,49	0,8	0,4	0,6	0,8	0,8
0	0,5	0,8	0,5	0,6	1	0,8
S(A,B) =	0,88	0,775	0,925	0,975	0,725	0,775

Podobieństwo globalne $SIM^{nawierzchnie}$ jest sumą iloczynu wag i podobieństw lokalnych poszczególnych zmiennych objaśniających:

$$SIM^{nawierzchnie}(V_N, V_j) = \sum_{i=1}^n \omega_i(21-06 \ 10 \ 60 \ 30) \cdot sim_i(V_{Ni}V_{ji}), \quad (12)$$

gdzie:

$\omega_i(21-06 \ 10 \ 60 \ 30)$ – waga i -tej zmiennej objaśniającej dla roboty budowlanej „Nawierzchnie boisk sportowych”;

$SIM^{nawierzchnie}(V_N, V_j)$ – podobieństwo globalne dla roboty budowlanej „Nawierzchnie boisk sportowych”,

$sim_i(V_{Ni}, V_{ji})$ – podobieństwo lokalne dla i -tej zmiennej objaśniającej między starym V_j , a nowym przypadkiem V_N .

Wracając do przykładu i danych z tabeli 6, częściowe podobieństwo globalne $SIM^{nawierzchnie}$ dla Przypadku 1 jest równe $SIM^{nawierzchnie}(\text{Przypadek 1}) = 0,2859 \cdot 1 + 0,3905 \cdot 0,96 + 0,3236 \cdot 0,97 = 0,98$.

Podobne obliczenia zostały wykonane dla wszystkich przypadków w bazie danych. Najwyższe podobieństwo $SIM^{nawierzchnie}(\text{Przypadek 1}) = 0,98$ osiągnięto dla Przypadku 1, a następnie dla Przypadku 7 (podobieństwo = 0,97) i dla Przypadku 11 (podobieństwo = 0,97). Kolejnym krokiem jest przeprowadzenie adaptacji rozwiązań ze względu na różnice lokalizacji i czasu sporządzenia oferty. W celu adaptacji cen wybranych trzech przypadków ze względu na lokalizację wykorzystano współczynniki regionalne, wyliczone przez autora na podstawie biuletynu cen regionalnych Sekocenbud (Sekocenbud BCR). W celu zaktualizowania cen inwestycji budowlanych wyliczonych w przeszłości na czas kalkulacji nowego przypadku wykorzystano biuletyn wskaźników waloryzacyjno-prognostycznych Sekocenbud (Sekocenbud ZWW). Ostateczna cena jednostkowa będąca średnią ważoną cen jednostkowych i wag dla wybranych przypadków po adaptacji wynosi 186,64 zł/m².

W tabeli 10 pokazano wyniki obliczeń podobieństw lokalnych dla roboty sklasyfikowanej zgodnie z klasyfikacją OmniClass jako „21-06 10 60 20 Osiatkowanie ochronne”. Robotą budowlaną polega na wykonaniu siatek sportowych, ochronnych zabezpieczających boiska sportowe nazywanych popularnie piłkochwytyami.

Tabela 10.

Obliczenia podobieństw lokalnych dla roboty „21-06 10 60 20 Osiatkowanie ochronne”.

Źródło: opracowanie własne.

Zmienne objaśniające	Przypadek				
	Nowy Przypadek	Przypadek 1	Przypadek 2	Przypadek 3	Przypadek n
Typ	siatka	siatka	panele	panele	...
Materiał	polopropylenowa	z drutu ocynkowanego	beton	beton	...
Ilość robót (długość) [m]	46	145	52	53	...
Wysokość [m]	6	1,5	6	3	...
$\text{sim}_{\text{typ}}^{\text{piłkochwyty}}$	–	1	0	0	...
$\text{sim}_{\text{materiał}}^{\text{piłkochwyty}}$	–	0	0	0	...
$\text{sim}_{\text{ilość robót}}^{\text{piłkochwyty}}$	–	0,87	0,99	0,99	...
$\text{sim}_{\text{wysokość}}^{\text{piłkochwyty}}$	–	0,25	1	0,5	...
$\text{SIM}^{\text{nawierzchnie}}$	–	0,58	0,57	0,46	...

Przykładowe obliczenia zaprezentowano dla porównania Nowego Przypadku z Przypadkiem 1. Podobieństwo lokalne dla zmiennych objaśniających ilościowych wyliczone zgodnie z formułą (2) jest równe:

$$\text{sim}_{\text{ilość robót}}^{\text{piłkochwyty}} (\text{Nowy przypadek, Przypadek 1}) = 1 - \frac{|145 - 46|}{750 - 0} = 0,87,$$

$$\text{sim}_{\text{wysokość}}^{\text{piłkochwyty}} (\text{Nowy przypadek, Przypadek 1}) = 1 - \frac{|1,5 - 6|}{6 - 0} = 0,25.$$

Podobieństwo lokalne dla zmiennych objaśniających jakościowych wyliczone zgodnie z formułą (3) jest równe:

$$\text{sim}_{\text{typ}}^{\text{piłkochwyty}} (\text{Nowy przypadek, Przypadek 1}) = 1 - \frac{|1 - 1|}{2 - 1} = 1.$$

W bazie danych zidentyfikowano 2 rozwiązania dotyczące zastosowanych piłkochwyty: siatka i panele. Liczba wartości M jest więc równa 2.

$$\text{sim}_{\text{materiał}}^{\text{piłkochwyty}} (\text{Nowy przypadek, Przypadek 1}) = 1 - \frac{|1 - 4|}{4 - 1} = 0.$$

W bazie danych zidentyfikowano 4 rozwiązania dotyczące zastosowanych materiałów: polopropylenowa, z drutu ocynkowanego, beton, żelbet. Liczba wartości M jest więc równa 4.

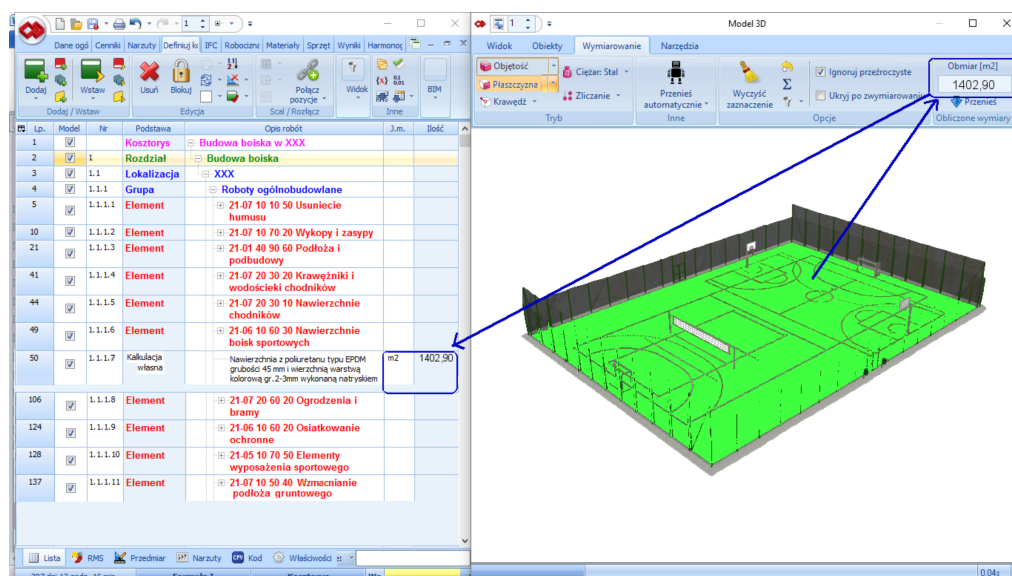
Częściowe podobieństwo globalne $SIM^{pilkochwyty}$ dla Przypadku 1 jest równe

$$SIM^{pilkochwyty}(\text{Przypadek 1}) = 0,2172 \cdot 1 + 0,2062 \cdot 0 + 0,3553 \cdot 0,87 + 0,2214 \cdot 0,25 = 0,58.$$

Podobne obliczenia zostały wykonane dla wszystkich przypadków w bazie danych. Najwyższe podobieństwo $SIM^{pilkochwyty}$ (Przypadek 1) = 1 osiągnięto dla Przypadku 68, a następnie dla Przypadku 23 i Przypadku 24 (podobieństwo 0,99). Ostateczna cena jednostkowa będąca średnią ważoną cen jednostkowych i wag dla wybranych przypadków po adaptacji wynosi 370,51 zł/m².

Podobne obliczenia zostały wykonane dla wszystkich robót stanowiących pełny zakres robót dla Nowego Przypadku.

Ostatnim elementem jest odczytanie dla Nowego Przypadku z pliku IFC poszczególnych ilości robót i elementów budowlanych. Przykład ekstrakcji ilości robót z wykorzystaniem systemu składającego się z dwóch aplikacji: BIMestiMate i BIM Vision dla obliczenia powierzchni boiska pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Ekstrakcja ilości robót dla roboty budowlanej „nawierzchnie boisk sportowych” – Nowy Przypadek. Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 11 pokazano obliczenia ceny Nowego Przypadku. Prognozowana cena ostateczna jest sumą iloczynów ilości robót i cen jednostkowych po adaptacji poszczególnych robót wchodzących w zakres robót budowlanych Nowego Przypadku. Ostateczna prognozowana cena robót budowlanych dla Nowego Przypadku wynosi 518 516,77 zł.

Tabela 11.

Obliczenie prognozowanej ceny Nowego Przypadku 1. Źródło: opracowanie własne.

Roboty budowlane/ Element budowlany	Cena jednostkowa po adaptacji	Ilość robót w jedn. odniesienia	Cena całkowita po adaptacji
21-07 10 10 50 Usunięcie humusu	0,41 zł/m ²	1157,00 m ²	476,76 zł
21-07 10 70 20 Wykopy i zasypy	36,01 zł/m ³	1029,00 m ³	37.058,81 zł
21-01 40 90 60 Podłoża i podbudowy	26,08 zł/m ²	1895,90 m ²	49.448,22 zł
21-07 20 30 20 Krawężniki i wodościeki chodników	27,64 zł/m	250,18 m	6.916,10 zł
21-07 20 30 10 Nawierzchnie chodników	67,18 zł/m ²	438,00 m ²	29 423,35 zł
21-06 10 60 30 Nawierzchnie boisk sportowych	186,64 zł/m ²	1402,90 m ²	261 835,01 zł
21-07 20 60 20 Ogrodzenia i bramy	465,00 zł/m	220,00 m	102 300,94 zł
21-06 10 60 20 Osiatkowanie ochronne	370,51 zł/m	46,00 m	17 043,51 zł
21-05 10 70 50 Elementy wyposażenia sportowego	10 890,02 zł/kpl.	1 kpl.	10 890,02 zł
21-07 10 50 40 Wzmacnianie podłoża gruntowego	3 124,06 zł	3 124,06 zł	3 124,06 zł
SUMA			518 516,77 zł

3.5. WNIOSKI

Metoda wnioskowania z przypadków CBR jest metodą bardzo użyteczną i prostą w prognozowaniu cen robót budowlanych. Sprawdza się nawet w przypadku niezbyt dużych baz danych. Pozwala jednocześnie na ocenę znalezionej metody rozwiązania poprzez wynik określający podobieństwo przypadków nowego i starych. Zaletą CBR jest więc możliwość odrzucenia istniejących przypadków w bazie, które nie spełniają oczekiwań użytkownika, na podstawie wiedzy o wielkości podobieństwa. Większość metod opartych na danych z przeszłości i wymagających procesu uczenia (np. sieci neuronowe) potrzebuje znacznie większej liczby przypadków niż metoda CBR i nie potrafi pokazać błędów dopasowania znalezionych wyników. Wyniki mogą być analizowane jedynie przez weryfikację prognoz w porównaniu do realnych danych.

Wykorzystanie technologii BIM w obliczeniach pozwala na łatwe przechowywanie informacji o obiekcie budowlanym i pozwala na szybkie generowanie podstawowych wskaźników powierzchniowych, czy kubaturowych. Wspomaganie kalkulacji kosztów oparte na modelu BIM jest zdaniem autora rozwiązaniem perspektywicznym, przyspieszającym przede wszystkim obliczenia przedmiarowe: obliczenie ilości prac oraz proces generowania zakresu robót.

W prezentowanym przykładzie obliczeniowym zanotowano bardzo dobre wyniki weryfikacji dokładności prezentowanej metody obliczeniowej, zarówno całkowitego błędu MAEE (4,7%), jak i maksymalnego błędu procentowego (poniżej 20%), co pozwala stwierdzić, że model może być zastosowany do wspomagania kalkulacji kosztorysowych.

3.6. BIBLIOGRAFIA

- AACE International Recommended Practice No. 18R-97 (2011), Cost estimate classification system – as applied in engineering, procurement, and construction for the process industries, TCM Framework: 7.3 – Cost Estimating and Budgeting.
- AAMODT, A., PLAZA, E. (1994). Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI communications*, 7(1), 39–59.
- AEC (UK), BIM Technology Protocol Practical implementation of BIM for the UK Architectural, Engineering and Construction (AEC) industry. Version 2.1.1 June 2015.
- ARASZKIEWICZ, K. (2016). Green BIM Concept–Scandinavian Inspirations. *Archives of Civil Engineering*, 62(1), 99–110.
- CHEN, S.J., CHEN, S.M. (2003). Fuzzy risk analysis based on similarity measures of generalized fuzzy numbers. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 11(1), 45–56.
- CZARNIGOWSKA, A. (2010). Struktura podziału prac w planowaniu kosztów budowy. *Czasopismo Techniczne*, No. 2, 11–22.
- Dohn, K., Gumiński, A., Matuszek, M. Zoleński, W. (2013). *Model wspomagania zarządzania w zakresie zarządzania wiedzą w polskich przedsiębiorstwach budowy maszyn*. Difin.
- EASTMAN, C. (1999). *Building product models: computer environments, supporting design and construction*. CRC press.
- EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R., LISTON K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- JERNIGAN, F. (2007). *BIG BIM little bim*. 4SitePress: Salisbury.
- JOŃCZY, A. ZIMA, K. (2016). Analysis of solutions for exterior walls in the bim model using the ahp method. *Czasopismo Techniczne*, No. 28, 175–183.
- KAPLIŃSKI, O. (2008). Trendy rozwoju i przydatność technik planowania i podejmowania decyzji-polskie doświadczenia. *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, 91(20), 69–77.
- KOŃCZAK, A., PASLAWSKI, J. (2015). Decision support in production planning of precast concrete slabs based on simulation and learning from examples. *Procedia Engineering*, 122, 81–87.

- Krajowy system zarządzania budowlanymi przedsięwzięciami inwestycyjnymi finansowanymi z udziałem środków publicznych i pomocowych Unii Europejskiej (KSZBPI). Projekt celowy Nr 6T07 2004 C/6413.
- New Zealand BIM Handbook – Appendix C – Levels of Development, definitions, July 2014.
- PAL, S.K., SHIU, S.C. (2004). *Foundations of soft case-based reasoning*, Vol. 8. John Wiley & Sons.
- PITTARD, S. SELL, P. (Eds.) (2016). *BIM and Quantity Surveying*. Routledge.
- RADZIEJOWSKA, A. ZIMA, K. (2015). The concept of a knowledge base to aid in cost estimating of sports facilities. *International Journal of Contemporary Management*, Numer 14 (3), 99–113.
- RICHTER, M.M., WEBER, R.O. (2016). *Case-based reasoning*. Springer-Verlag Berlin An.
- SEBASTIAN, R., VAN BERLO, L. (2010). Tool for benchmarking BIM performance of design, engineering and construction firms in the Netherlands. *Architectural Engineering and Design Management*, 6(4), 254–263.
- Sekocenbud, Biuletyn cen regionalnych w budownictwie BCR. Wyd. Promocja sp. z o.o.
- Sekocenbud, Zagregowane wskaźniki waloryzacyjno-prognostyczne. Prognozy i zmiany cen ZWW, wyd. Promocja sp. z o.o.
- SMITH, D. (2007). An Introduction to Building Information Modeling (BIM). *Journal of Building Information Modeling*, Fall 2007, 12–14.
- TRACZYK, W. (2010). *Inżynieria wiedzy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT.
- ZIMA, K. (2015). The use of fuzzy case-based reasoning in estimating costs in the early phase of the construction project. In *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1648, No. 1, p. 600010. AIP Publishing.