

# Prognozowanie przebiegu krzywych kosztów narastających w różnorodnych przedsięwzięciach budowlanych

Forecasting course of cumulative cost curves (CCC) in diverse construction projects

dr inż. Mariusz Szóstak (ORCID: 0000-0003-4439-6599), dr hab. inż. Jarosław Konior, prof. uczelni (ORCID: 0000-0002-3824-1948), Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1335

**Streszczenie:** Prawidłowe zaplanowanie kosztów inwestycji i skuteczne monitorowanie realizacji i ponoszonych nakładów finansowych jest istotnym problemem w zarządzaniu przedsięwzięciami inwestycyjnymi. Celem prowadzonych badań jest określenie kształtu i przebiegu krzywych kosztowych dla wybranych przedsięwzięć budowlanych. Na podstawie analizy przeprowadzonych badań własnych w 3 grupach badawczych obiektów (zbiorowego zamieszkania, hotelowych i handlowo-usługowych) podjęta została autorska próba wyznaczenia krzywej najlepszego dopasowania oraz pola krzywej, wskazująca obszar poprawnego planowania skumulowanych kosztów w przedsięwzięciach budowlanych.

**Słowa kluczowe:** przedsięwzięcie budowlane, analiza kosztowa, koszt skumulowany, krzywa S, metoda EVM.

**Abstract:** The correct planning of investment costs and the effective monitoring of both the implementation process and the incurred financial outlays are significant problems in the management of investment projects. The aim of the research is to determine the shape and course of the cost curves for selected construction projects. On the basis of the analysis of the author's own research carried out in 3 research groups of facilities (collective housing, hotels and retail-service facilities), an original attempt was made to determine the best-fit curve and the curve's area, which in turn indicates the area of the correct planning of cumulative costs of construction investments.

**Keywords:** construction project, cost analysis, cumulative cost, S curve, EVM method.

## 1. Wprowadzenie

Menedżer budowlany prognozując przebieg przedsięwzięć inwestycyjnych, podejmuje decyzje co do ich stanu przyszłego [1]. Decyzje te mogą być podejmowane hipotetycznie (poszukiwaniem heurystycznym), mogą być modelowane w oparciu o zdobytą wcześniej wiedzę (empirycznymi rozkładami zmiennych istotnych dla stanu rzeczywistego), dając menedżerowi określony poziom prawdopodobieństwa co do słuszności (prawidłowości, poprawności, prawdziwości) decyzji [2, 3]. Mogą też być podejmowane w wyniku stosowania określonych algorytmów, które dają pewność określonych skutków, jeśli tylko podjęte działania będą zgodne z algorytmami wypracowanymi dla danych procedur [4]. Ta ostatnia sytuacja ma bardzo ograniczony zasięg. Jest to ograniczenie wynikające z naszej wiedzy. Na podstawie stanów przeszłych można programować stany przyszłe tylko w kategoriach probabilistycznych [5].

## 2. Aktualny stan wiedzy

Realizacja każdego przedsięwzięcia budowlanego przebiega w określonych parametrach czasowych, kosztowych,

zgodnie z ustalonymi wymaganiami technicznymi i jakościowymi [6,7]. Terminowa realizacja przedsięwzięć budowlanych oraz redukcja czasu ich wykonania wpływa na efektywność ekonomiczną inwestycji [8]. Wpływ na płynność finansową przedsiębiorstwa ma również prawidłowe zaplanowanie kosztów i przepływów finansowych już w fazie planowania realizacji [9].

Istotnym elementem w planowaniu przedsięwzięć budowlanych jest prawidłowe zaplanowanie przebiegu realizacji w aspekcie czasu i kosztu, w szczególności prawidłowe opracowanie inwestorskiego harmonogramu rzeczowo-finansowego z określonymi terminami rozpoczęcia i zakończenia przedsięwzięcia, z odpowiednimi powiązaniem pomiędzy zadaniami, z określonymi czasami trwania poszczególnych zadań i kosztami ich realizacji [10]. Tylko solidny plan pracy, a mianowicie racjonalny do wykonania harmonogram rzeczowo-finansowy może zwiększyć wydajność pracy i umożliwić wykonawcom prawidłowe wykonanie umowy przy najniższych kosztach. Oczywiście weryfikacja poprawności zaplanowanych kosztów i czasu inwestycji następuje dopiero „post factum”, tj. w momencie zakończenia inwestycji, dlatego poszukuje się metod i narzędzi wspomagających planowanie.

### 2.1. Metoda wartości wypracowanej

W literaturze istnieje wiele metod stosowanych do monitorowania przedsięwzięć budowlanych. I tak na przykład, powszechnie stosowaną i zweryfikowaną w budowlanej praktyce menedżerskiej stanowi metoda wartości wypracowanej (EVM) [11, 12]. Metoda ta pozwala na kontrolę postępu realizacji projektu w wymiarze zakresu, kosztu i czasu realizacji przedsięwzięcia. Założeniem tej metody jest porównanie planowanego postępu prac projektowych (planowanego zakresu) w kontekście czasu (harmonogramu) i kosztu (budżetu) do rzeczywistego wykonania [13].

Metoda wartości wypracowanej jest przystępna i zapewnia stosunkowo dokładną ocenę problemu jednak zauważalne są pewne nieścisłości i problemy z jej praktycznym wykorzystaniem. Istotnym problemem jest jakość uzyskanych danych finansowo-rzeczowych z placu budowy. Metoda jest bardzo wrażliwa na wprowadzane dane, a najbardziej newralgicznym punktem analiz są modyfikacje harmonogramu z uwagi na sytuacje losowe występujące na placu budowy oraz sposób klasyfikacji kosztów [14]. Dodatkowymi problemami, które pojawiają się w praktycznym zastosowaniu metody wartości wypracowanej są m. in.: trudność w prawidłowym i rzeczywistym określeniu procentowego zaawansowania wykonanych prac (szczególnie zadań, które zostały rozpoczęte, lecz nie są zakończone w momencie kontroli), niepełne dane o rzeczywistych kosztach poniesionych na dzień kontroli. Wskazane nieprawidłowości mogą prowadzić do błędnych interpretacji otrzymanych wskaźników, a także wnioskowania o skutkach odchyleń na ich podstawie, w tym szacowanych terminów zakończenia i kosztów projektu [15,16].

### 2.2. Krzywa kosztów skumulowanych – krzywa „S”

Innym, ale równie skutecznym narzędziem do pomiaru wykorzystania nakładów finansowych przedsięwzięcia budowlanego jest przedstawienie planowanych przepływów finansowych na osi czasu za pomocą wykresu kosztów skumulowanych [17]. Krzywa kosztów skumulowanych przedstawia postęp przedsięwzięcia inwestycyjnego od rozpoczęcia prac budowlanych, aż do ich zakończenia. Koszt skumulowany jest sumą kosztów poniesionych przez wszystkie zasoby przydzielone do danego zadania wraz z pozostałymi składnikami kosztotwórczymi (m.in. koszty pośrednie, narzuty kosztorysu itp.). Graficznie krzywa kosztów skumulowanych jest wypłaszczone w początkowej i końcowej fazie realizacji przedsięwzięcia budowlanego, natomiast w środkowej części jest stroma, tzn. nachylona pod dużym kątem w stosunku do osi czasu i przypomina kształt litery „S”, stąd nazwa krzywej kosztów skumulowanych – krzywa „S” [18]. Na podstawie gromadzonych na bieżąco danych finansowych możliwe jest generowanie i porównywanie krzywych planowanych kosztów, a także rzeczywistych kosztów. Krzywe kosztowe wyznaczają, w ramach pewnej obwiedni, obszar przepływów pieniężnych. W celu racjonalnej oceny terminu

końcowego przedsięwzięcia bądź jego rzeczywistych kosztów zastosowana może być metoda bieżącego poprawiania przebiegu krzywej kosztów rzeczywistych. I tak np. w literaturze znane jest zastosowanie wielomianów wyższego stopnia do bieżącego uaktualniania przebiegu wspomnianych krzywych. Dla właściwego dopasowania kształtu krzywej S istotne jest poprawne zdefiniowanie punktu przegięcia krzywej, tj. określenia momentu w czasie, w którym następuje zmiana przebiegu krzywej, z krzywej wypukłej we wklęsłą. Niestety w trakcie planowania przedsięwzięcia budowlanego, a także w trakcie wprowadzania zmian w budżecie w trakcie realizacji prac punkt ten jest trudny do określenia, a czasami wręcz jest niemożliwy do określenia [19].

### 2.3. Wnioski

Oba zastosowane narzędzia (metoda wartości wypracowanej, krzywa kosztów skumulowanych) służą do monitorowania i kontrolowania przebiegu realizacji robót budowlanych. Należy zwrócić jednak uwagę, że przedmiotem badań nie jest monitorowanie realizacji prac, a etap planowania, poprzedzający etap wykonawstwa. Niemniej jednak, aby opracować model służący do planowania przebiegu krzywej kosztów skumulowanych odzwierciedlający rzeczywistość, należy zgromadzić niezbędne dane liczbowe zawierające wszystkie istotne z punktu widzenia badań informacje. Ponadto zbiór danych musi zawierać statystycznie dużą liczbę pomiarów, aby stanowić pewien wzorzec, punkt odniesienia, do uogólnienia badanego zagadnienia.

## 3. Metody i modele

Wypracowane podejście badawcze jest wynikiem wieloletnich badań nad rozwojem metod i narzędzi do modelowania wielokryterialnych procesów w inżynierii budowlanej [20–23]. W celu rozwiązania postawionego celu badań opracowano autorską metodykę badań składającą się z 7 etapów.

- Etap 1. Zgromadzenie danych do badań. W ramach prowadzonych badań zgromadzono dane dotyczące 28 przedsięwzięć budowlanych, należących do 3 grup badawczych, odpowiadającym 3 zróżnicowanym sektorom inwestycyjnym, tj. 434 raportów sporządzanych przez uczestniczących w przebiegu analizowanych przedsięwzięć budowlanych inspektorów nadzoru bankowego. Wszystkie zgromadzone dane dotyczą inwestycji zrealizowanych w Polsce w okresie 2006–2020.
- Etap 2. Opracowanie bazy danych. W wyniku przeprowadzonych analiz raportów opracowano bazę danych, tj. zbiorcze zestawienie danych (m.in. planowany koszt planowanych robót, rzeczywisty koszt zrealizowanych robót, planowany czas trwania przedsięwzięcia, rzeczywisty czas trwania przedsięwzięcia, planowany budżet, rzeczywisty budżet, itp.) w formie tabeli dwuwymiarowej w programie Microsoft Excel, charakteryzujące poszczególne przedsięwzięcia budowlane.

- Etap 3. Przetworzenie zgromadzonych danych. Zgromadzone dane w bazie danych charakteryzują pojedyncze przedsięwzięcia budowlane. Każde przedsięwzięcie charakteryzuje się innym czasem trwania oraz kosztem realizacji. Aby możliwe było porównanie zgromadzonych danych dla różnych przedsięwzięć budowlanych, konieczne jest odpowiednie przetworzenie zgromadzonych danych. W celu przeprowadzenia analizy porównawczej dane poddano normalizacji.

- Etap 4. Graficzne przedstawienie przetworzonych zgromadzonych danych. Korzystając z wyznaczonych na etapie 3 pomocniczych wartości niemianowanych, możliwe jest graficzne przedstawienie zgromadzonych danych dla każdego pojedynczego analizowanego przedsięwzięcia budowlanego oraz w odniesieniu do jednorodnych grup badawczych, odpowiadającym 3 zróżnicowanym sektorom inwestycyjnym (A-C), i w zróżnicowanej grupie różnorodnych sektorów inwestycyjnych.

- Etap 5. Wyznaczenie krzywych najlepszego dopasowania oraz przestrzeni krzywych kosztowych. Korzystając w krzywych kosztów skumulowanych opracowanych w etapie 4, możliwe jest analityczne określenie równania postaci krzywej, w postaci wielomianu, o najlepszym dopasowaniu. Aby opisać przebieg krzywych, wykorzystano dwa podejścia określenia przebiegu krzywej za pomocą: regresji wielomianowej i funkcji trendu, w postaci wielomianu wyższego (5., 6.) rzędu oraz wielomianu trzeciego stopnia i punktu przegięcia krzywej.

- Etap 6. Wyznaczenie przestrzeni krzywych kosztowych. Na podstawie zgromadzonych danych możliwe jest określenie przestrzeni krzywych kosztowych, w których znajdują się krzywe najlepszego dopasowania.

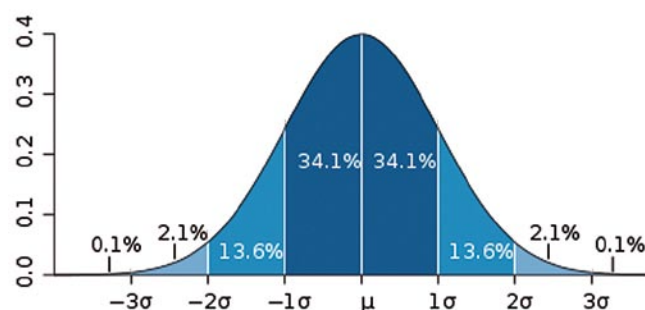
- Etap 7. Wyznaczenie obszarów. Korzystając z wyznaczonych na etapie 6 przestrzeni krzywych kosztowych możliwe jest dla planowanych inwestycji – wyznaczenie kształtu, przebiegu w czasie, krzywej planowanego kosztu dla planowanych prac, dla oszacowanego przez decydenta kosztu inwestycji (budżetu zadania) oraz wyznaczonego czasu trwania zadania inwestycyjnego, a dla realizowanych inwestycji – monitorowanie przebiegu inwestycji i odpowiednie reagowanie na powstałe odchylenia od założonych parametrów realizacji robót (odchylenie kosztowe, odchylenie od harmonogramu).

Menedżer budowlany, w zależności od pełnionej roli, przygotowując się do realizacji inwestycji, określa pewne parametry charakteryzujące przedsięwzięcie inwestycyjne. Inwestor planując przedsięwzięcie inwestycyjne, określa dostępny budżet inwestycji i termin realizacji. Z kolei wykonawca robót opracowuje harmonogram rzeczowo-finansowy, który pozwala na zaplanowanie wartości robót budowlanych i określić niezbędny czas na ich zrealizowanie. Istotny wpływ na płynność finansową decydenta oraz na osiągnięcie sukcesu w realizacji danego przedsięwzięcia ma prawidłowe zaplanowanie przepływów pieniężnych w czasie.

Menedżer budowlany mając określony budżet inwestycji i określony czas jej trwania, korzystając z krzywej kosztowej najlepszego dopasowania będzie miał możliwość odpowiedniego zaplanowania przepływów finansowych w czasie.

Wiedza na temat planowanego przebiegu skumulowanych nakładów finansowych w czasie i kształtu krzywej S i jej odchylen pozwala na racjonalne podejmowanie działań zmierzających do osiągnięcia zamierzonego celu i sukcesu w realizacji przedsięwzięcia budowlanego.

Do monitoringu inwestycji i analizy kontrolowanej inwestycji zastosowano regułę trzech sigm, przedstawioną na rysunku 1. Powszechnie wiadomo, że w praktyce reguła trzech sigm wykorzystywana jest jako system ostrzegania o niebezpieczeństwie, o anormalnym zachowaniu, o czymś niespotykanym. Opracowując algorytm oparty na zasadzie trzech sigm możliwe jest skonstruowanie systemu „ostrzegania” o nieprawidłowościach.



Rys. 1. Reguła trzech sigm

Przestrzenie krzywych kosztowych wyznaczone przez 3 krzywe: krzywą najlepszego dopasowania, krzywą ograniczającą przestrzeń krzywych kosztowych „z góry” oraz krzywą ograniczającą przestrzeń krzywych kosztowych „z dołu” podzielono zgodnie z regułą trzech sigm na trzy obszary:

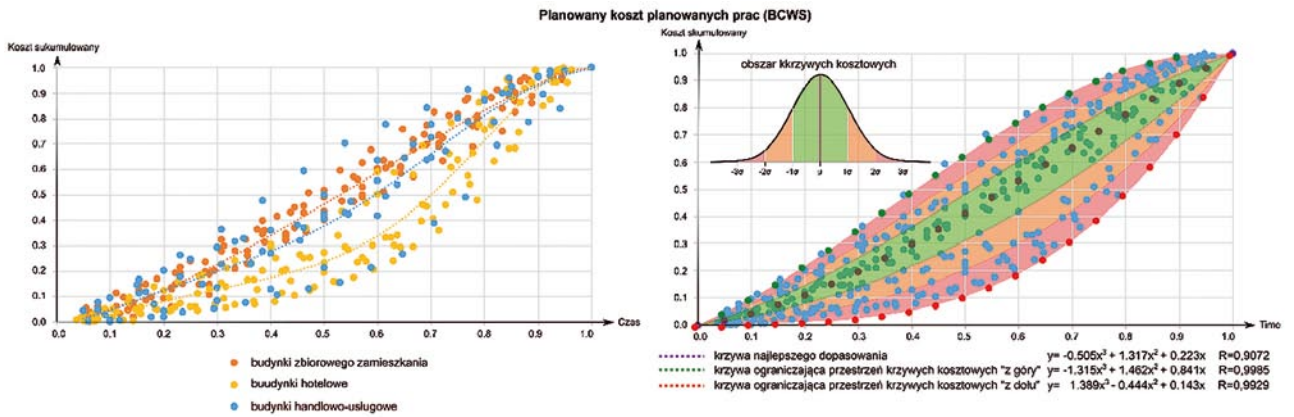
- obszar z zakresu  $<-\sigma, \sigma>$  – zakres akceptowalny,
- obszar z zakresu  $<-\sigma, 2\sigma>$  U  $<-\sigma, 2\sigma>$  – zakres tolerowalny,
- obszar z zakresu  $<-\sigma, 3\sigma>$  U  $<-\sigma, 3\sigma>$  – zakres nieakceptowalny.

#### 4. Wyniki badań

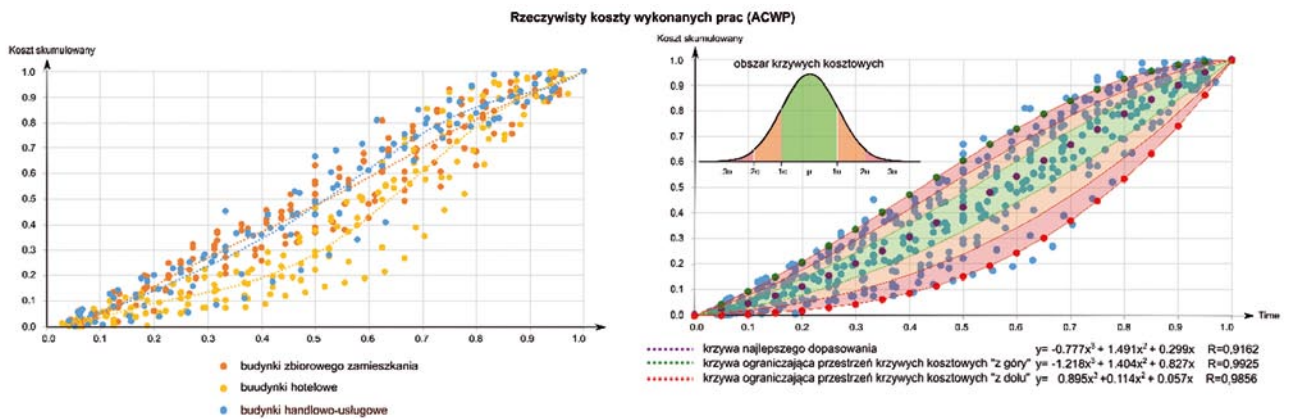
Po przeprowadzeniu obliczeń, zgodnych z zaproponowaną metodyką badań, na rysunkach 2, 3 przedstawiono uzyskane wyniki dla analizowanych wszystkich przedsięwzięć budowlanych, z podziałem na 3 grupy badawcze. Wyznaczono krzywą najlepszego dopasowania oraz krzywe ograniczające otrzymany obszar krzywymi „z góry” oraz „z dołu”. Dla każdej krzywej wyznaczono wielomian trzeciego stopnia i punkt przegięcia krzywej.

Kolejnym elementem badań było porównanie otrzymanych obszarów i analiza otrzymanych wyników. Otrzymane wyniki i ich interpretację graficzną przedstawiono na rysunku 4.





Rys. 2. Krzywa planowanych kosztów skumulowanych



Rys. 3. Krzywa poniesionych kosztów skumulowanych

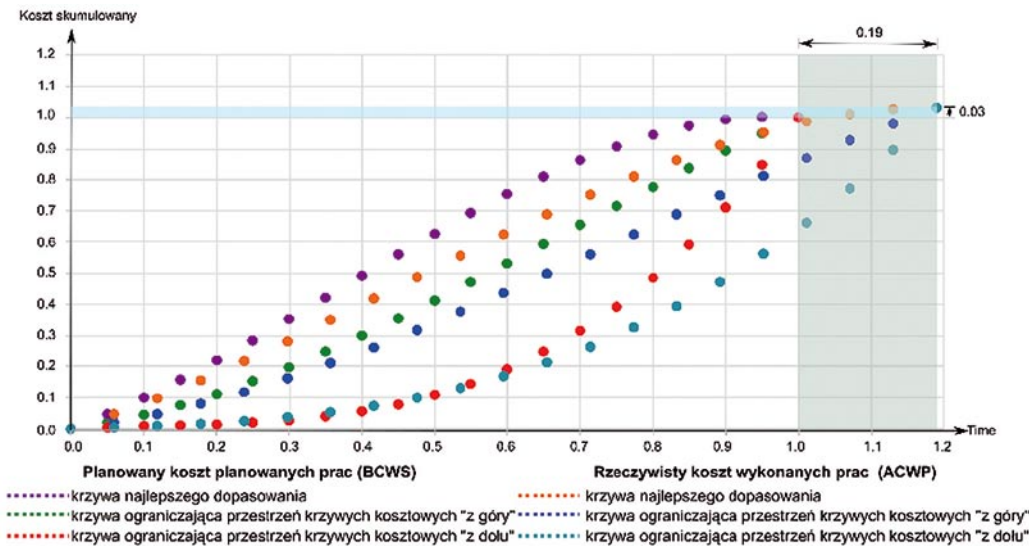
W ramach prowadzonych badań podjęto również próbę opisanie przebiegu krzywych kosztowych za pomocą matematycznych zależności między zmiennymi parametrami, tj. czasem i kosztem.

I tak, zastosowanie wielomianu 1-stopnia (funkcji liniowej) i 2-stopnia (trójmianu kwadratowego) możliwe jest tylko przy założeniu, że przebieg procesu inwestycyjnego może zostać

podzielony na krótsze okresy, np. 3 okresy. Wykres kosztów skumulowanych jest krzywą o zmiennym nachyleniu i z występującym charakterystycznym punktem przegięcia, tj. przejścia z funkcji wypukłej we wklęsłą, dlatego zastosowanie wykresu parabolicznego stanowi duże uogólnienie.

W związku z powyższym do opisu przebiegu krzywej kosztowej zasadne uznaje się stosowanie tylko wielomianów wyż-

szego rzędu, minimum 3-stopnia. Co prawda wykorzystanie trendu wielomianowego 6-stopnia pozwala na uzyskanie wysokiej wartości współczynnika korelacji (bliskiego jedności, świadczącym o występowaniu bardzo silnej zależności



Rys. 4. Porównanie planowanych i poniesionych kosztów skumulowanych

korelacyjnej i bardzo dobrym opisanie badanego zjawiska) i niskiej wartości współczynnika zmienności (świadczącym o małej zmienności cechy i jednorodności badanej populacji) to jego praktyczne zastosowanie może być trudne i skomplikowanego dla decydentów i można uznać je za niewłaściwe. Z praktycznego punktu widzenia inwestora, wykonawcy robót lub oferentów stosowanie wielomianów wyższych rzędów (wyższych niż wielomian 4-stopnia) może być trudne do zastosowania.

## 5. Podsumowanie

Badaniom poddano bazowe harmonogramy rzeczowo-finansowe opracowane przez inwestorów przed rozpoczęciem prac oraz własne comiesięczne wyniki pomiarów poniesionych i wypracowanych kosztów/przerobów robót budowlanych. Takie dane były gromadzone i przetwarzane w okresie 15 ostatnich lat pracy zawodowej autorów artykułu przez prowadzenie comiesięcznych, bezpośrednich inspekcji techniczno-finansowych na placach budów realizowanych inwestycji. Narastające wartości przerobów prac na budowie stanowiły skumulowany koszt, który określany cyklicznie i spójnie wyznaczał przebieg krzywej S, odpowiadającej monitorowanej i kontrolowanej inwestycji budowlanej. Pomierzona ilość wypracowanych robót budowlanych i przetworzone według zstandaryzowanej metodyki techniczno-finansowej dane o zrealizowanych przedsięwzięciach budowlanych trzeba uznać jako wiarygodne, spójne i czytelne. Można z nich wyodrębnić typologiczne próby badawcze dla inwestycji zbliżonym profilu. Wyniki pomiarów opracowano w jednakowy, standaryzowany sposób gromadzenia i przetwarzania danych o przedsięwzięciach budowlanych.

Przeprowadzono ocenę rzeczywiście/faktycznie poniesionych kosztów zadań inwestycyjnych, których trend krzywych skumulowanych przepływów pieniężnych można z dużym dopasowaniem estymować prognozując proces budowlany. Wyznaczono przestrzenie krzywych S planowanych kosztów wielomianami, które wskazują obszar spodziewanych kosztów w przedsięwzięciu budowlanym i szacowane wartości ich odchylenia.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Szafranko E., Harasymiuk J., Modelling of Decision Processes in Construction Activity, *Applied Sciences* 12/2022, str. 3797
- [2] Plebankiewicz E., Zima K., Wieczorek D., Modelling of time, cost and risk of construction with using fuzzy logic, *Journal of Civil Engineering and Management* 27, 2021, str. 412–426
- [3] Radziszewska-Zielina E., Adamkiewicz D., Szewczyk B., Kania O., Decision-Making Support for Housing Projects in Post-Industrial Areas, *Sustainability* 14, 2022, str. 3573
- [4] Hsieh T., Hsiao-Lung Wang M., Chen C., A Case Study of S-Curve Regression Method to Project Control of Construction Management via T-S Fuzzy Model, *Journal of Marine Science and Technology* 12/2004, str. 209–216
- [5] Konior J., Fuzziness over randomness in unforeseen works of construction projects, *Civil Engineering and Architecture* 7/2019, str. 42–48
- [6] Kerzner H., *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, John Wiley&Sons, Inc., New York, USA, 2003
- [7] Połoński M., *Kierowanie budowlanym procesem inwestycyjnym*, Wydawnictwo SGGW, 2018
- [8] Jaśkowski P., Biruk S., Krzemiński M., Planning repetitive construction processes to improve robustness of schedules in risk environment, *Archives of Civil Engineering* 66, 2020, str. 643–657
- [9] Leśniak A., Kubek D., Plebankiewicz E., Zima K., Belniak S., Fuzzy AHP Application for Supporting Contractors' Bidding Decision, *Symmetry (Basel)* 10/2018, str. 642
- [10] Konior J., Enterprise's risk assessment of complex construction projects, *Archives of Civil Engineering* 61, 2015, str. 63–74
- [11] *A guide to the project management body of knowledge (PMOK guide) 6th Edition*, Project Management Institute (PMI), 2017
- [12] IPMA, *IPMA Individual Competence Baseline*, 2015
- [13] Przywara D., Rak A., Monitoring of Time and Cost Variances of Schedule Using Simple Earned Value Method Indicators, *Applied Sciences* 11(4)2021, str. 1357.
- [14] Dziadosz A., Kapliński O., Rejment M., Usefulness and fields of the application of the Earned Value Management in the implementation of construction projects, *Budownictwo i Architektura* 13, 2014, str. 357–364
- [15] Czarnigowska S., Earned value method as a tool for project control, *Budownictwo i Architektura* 3/2008, str. 15–32
- [16] Czarnigowska A., Monitoring of project progress using the Earned Value, *Przegląd Budowlany* 2/2009, str. 50–55
- [17] Chao L., Chen H., Predicting project progress via estimation of S-curve's key geometric feature values, *Automation in Construction* 57, 2015, str. 33–41
- [18] Cristóbal J., The S-curve envelope as a tool for monitoring and control of projects, *Procedia Computer Science* 121, 2017, str. 756–761
- [19] Kozień E., Application of approximation technique to on-line updating of the actual cost curve in the earned value method, *Czasopismo Techniczne* 9/2017, str. 181–195
- [20] Konior J., Monitoring of Construction Projects Feasibility by Bank Investment Supervision Approach, *Civil Engineering and Architecture* 7/2019, str. 31–35
- [21] Konior J., Szóstak M., The S-curve as a tool for planning and controlling of construction process-case study, *Applied Sciences (Switzerland)*, 10/2020
- [22] Szóstak M., Planning the time and cost of implementing construction projects using an example of residential buildings, *Archives of Civil Engineering* 67, 2021, str. 243–259
- [23] Konior J., Determining Cost and Time Performance Indexes for Diversified Investment Tasks, *Buildings* 8/2022

**Zapraszamy serdecznie do publikowania w "Przeglądzie Budowlanym".**

Przypisane dyscypliny naukowe: inżynieria lądowa, geodezja i transport;  
inżynieria materiałowa; inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka;  
architektura i urbanistyka;

Za publikację autor otrzymuje **70** punktów.