

POLITECHNIKA KRAKOWSKA IM. TADEUSZA KOŚCIUSZKI

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
KOMITET INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ

**INŻYNIERIA PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH
BUDOWNICTWA ZRÓWNOWAŻONEGO**

POD REDAKCJĄ
ANNY SOBOTKI, ELŻBIETY RADZISZEWSKIEJ-ZIELINY

KRAKÓW 2024

POLITECHNIKA KRAKOWSKA IM. TADEUSZA KOŚCIUSZKI

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
KOMITET INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ

STUDIA Z ZAKRESU INŻYNIERII

NR 107

INŻYNIERIA PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH BUDOWNICTWA ZRÓWNOWAŻONEGO

POD REDAKCJĄ

ANNY SOBOTKI, ELŻBIETY RADZISZEWSKIEJ-ZIELINY



KRAKÓW 2024

REDAKTOR NACZELNY SERII

„Studia z Zakresu Inżynierii”

Andrzej Szarata

RADA NAUKOWA

Katarzyna Adamska-Zabielska

Ewa Błazik-Borowa

Kazimierz Furtak

Izabela Hager

Maria Kaszyńska

Mariusz Kieć

Aleksander Kozłowski

Jacek Mąkinia

Piotr Moncarz

Vitalij Naumov

Tomasz Siwowski

Jacek Szer

RECENZENCI

Zdzisław Hejducki

Piotr Jaśkowski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Michał Stachowski

SKŁAD I ŁAMANIE

Anna Pawlik

Copyright by the authors, this edition © Cracow University of Technology
Polish Academy of Sciences. Committee of Civil Engineering



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>



Sponsorem monografii jest Piletest – Niezależny wykonawca próbnych obciążeń głębokich fundamentów

ISBN 978-83-67188-97-5

ISBN 978-83-66847-95-8

ISSN 0137-5393

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; tel. 12 628 37 25, fax 12 628 37 60

e-mail: wydawnictwo@pk.edu.pl □ www.wydawnictwo.pk.edu.pl

Adres do korespondencji: ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie. Elżbieta Radziszewska-Zielina, Anna Sobotka	5
2. Harmonizacja realizacji procesów budowlanych wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego. Michał Tomczak	23
3. Algorytm szacowania czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych. Krzysztof Kaczorek, Janusz Kulejewski, Nabi Ibadov	47
4. Harmonogramowanie inwestycji kolejowych w Polsce z uwzględnieniem ryzyka w trakcie ich realizacji. Jan Kowalski	75
5. Planowanie działań inżynieryjno-budowlanych realizowanych przez jednostki o zhierarchizowanych strukturach. Radosław Sekunda, Roman Marcinkowski	99
6. Proaktywne podejście do planowania przedsięwzięć budowlanych z wykorzystaniem teorii metasieci. Grzegorz Śladowski.....	125
7. Ocena i zwiększenie efektywności sieci komunikacyjnej przedsięwzięcia budowlanego. Roman Trach	145
8. Elastyczność w zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi w dynamicznie zmiennym otoczeniu na przykładzie inwestycji infrastrukturalnych. Maria Kośmiejka, Jerzy Paślowski	168
9. Ocena wpływu wybranych czynników na zdarzenia niebezpieczne w budownictwie. Marcin Kowalik, Wojciech Drozd	189
10. Modelowanie rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie. Mariusz Szóstak.....	204
11. Narzędzia wspomagające przeprowadzanie ocen środowiskowych inwestycji budowlanych. Jolanta Harasymiuk, Elżbieta Szafranko	228
12. Metoda oceny socjalnych właściwości użytkowych obiektów mieszkalnych. Aleksandra Radziejowska	253
13. Wspomaganie decyzji w logistyce odzysku odpadów betonowych. Joanna Sagan, Anna Sobotka.....	278
14. Analiza śladu węglowego w ocenie materiałów i technologii budowania. Grzegorz Śledź, Anna Sobotka	306
15. Model szacowania kosztów cyklu życia budynków (WLC) umożliwiający kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko. Damian Wieczorek	327
16. Badania ankietowe w budownictwie. Elżbieta Radziszewska-Zielina	357

1. WPROWADZENIE

1.1. DZIAŁALNOŚĆ SEKCJI IPB KILiW PAN

Pod patronatem Sekcji Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych KILiW PAN przygotowany został czwarty tom publikacji, zawierający teksty opracowane na podstawie badań naukowych z zakresu inżynierii przedsięwzięć budowlanych, stanowiącej specjalność naukową dyscypliny inżynierii lądowej, geodezji i transportu. Wiedza z zakresu tej specjalizacji znajduje praktyczne zastosowanie podczas realizacji przedsięwzięć budowlanych. Na wyższych uczelniach technicznych, na kierunku budownictwo, prowadzone jest kształcenie specjalistów posiadających kwalifikacje, tj. wiedzę, umiejętności i kompetencje, z zakresu inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Obserwuje się szybki rozwój tej specjalizacji w kontekście teoretycznym i praktycznym. Zasięg tematyki tej specjalizacji, której nazwa się zmieniała, jest wciąż rozszerzany. W strukturze organizacyjnej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk od początku jego istnienia jest ona reprezentowana przez członków sekcji działającej pod nazwą Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych.

W dniu 28 września 2022 roku, podczas cyklicznej konferencji Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych, zorganizowanej przez Politechnikę Poznańską, odbyło się uroczyste zebranie Sekcji Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk z okazji Jubileuszu 70-lecia powstania Sekcji.

Punktem wyjścia do tej uroczystości był Jubileusz 70-lecia powstania Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk, który odbył się 24 maja 2022 roku w Międzyzdrojach podczas 30. Jubileuszowej Konferencji Awarie Budowlane. Dokładnie 70 lat wcześniej, 24 maja 1952 roku, powstały pierwsze komitety naukowe Polskiej Akademii Nauk, a wśród nich również Komitet Inżynierii Lądowej.

Aktualnie w ramach Polskiej Akademii Nauk działa pięć wydziałów, które koordynują działalność instytutów i komitetów w danym obszarze tematycznym (I – Wydział Nauk Humanistycznych i Społecznych PAN, II – Wydział Nauk Biologicznych i Rolniczych PAN, III – Wydział Nauk Ścisłych i Nauk o Ziemi PAN, IV – Wydział Nauk Technicznych PAN, V – Wydział Nauk Medycznych PAN), skupiających członkinie i członków Akademii o określonych zainteresowaniach naukowych. W Wydziale IV Nauk Technicznych PAN działa 20 komitetów, wśród nich Komitet

Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Komitety Polskiej Akademii Nauk są krajową reprezentacją różnych środowisk i dyscyplin naukowych, a działalność merytoryczna odbywa się w sekcjach komitetów.

Działamy w takim obszarze wiedzy, że nasze badania i rozważania teoretyczne powinny w dużej mierze służyć rozwojowi gospodarki, w wymiarze lokalnym i globalnym. Taki charakter działalności reprezentują sekcje. Program ich działania obejmuje wszystkie obszary nauki i techniki właściwe dla KILiW PAN (wyszczególnione przez profesora Kazimierza Furtaka na Jubileuszu KILiW PAN w Międzyzdrojach). Od 1952 roku, od początku istnienia Komitetu Inżynierii Lądowej, działającego od 1972 roku pod nazwą Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, sekcji jest 11 (aktualne nazwy: Sekcja Ciepłownictwa i Klimatyzacji, Sekcja Fizyki Budowli, Sekcja Geotechniki i Infrastruktury Podziemnej, Sekcja Inżynierii Komunikacyjnej, Sekcja Inżynierii Materiałów Budowlanych, Sekcja Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych, Sekcja Inżynierii Sanitarnej, Sekcja Konstrukcji Betonowych, Sekcja Konstrukcji Hydrotechnicznych, Sekcja Konstrukcji Metalowych, Sekcja Mechaniki Konstrukcji i Materiałów).

Sekcja Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN powstała w 1952 roku. Nazwa Sekcji w kolejnych latach ewoluowała, począwszy od Organizacji i Mechanizacji Robót/Budowy, przez Organizację i Ekonomikę Budownictwa, Mechanizację, Organizację i Ekonomikę Budownictwa, Organizację i Zarządzanie w Budownictwie, aż po aktualną nazwę Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych, ustaloną ostatecznie w 2007 roku (tab. 1.1). Pierwszym przewodniczącym sekcji został w 1952 roku profesor Aleksander Dyżewski. Od 1975 roku przyznawana jest Nagroda PZiTb im. prof. Aleksandra Dyżewskiego za wybitne osiągnięcia naukowe i praktyczne z zakresu inżynierii przedsięwzięć inwestycyjnych i procesów budowlanych.

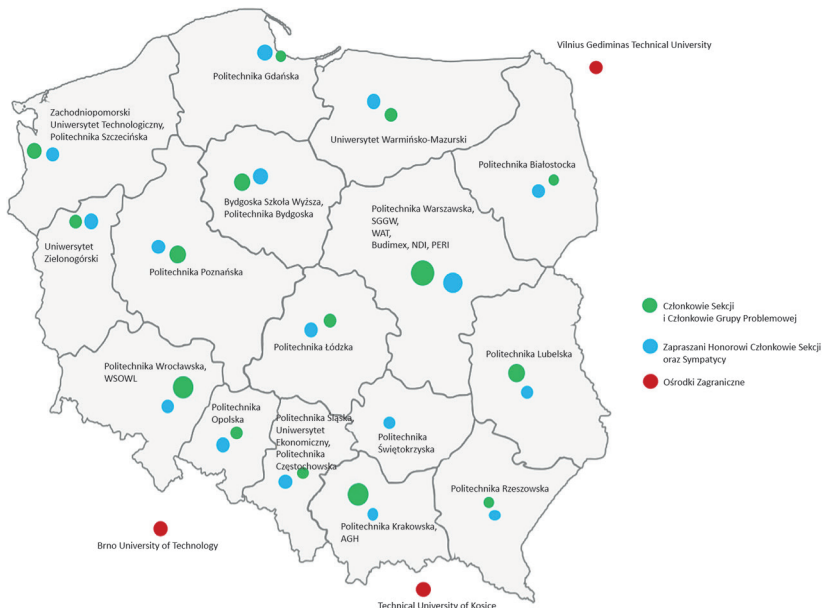
Internetowa strona Sekcji działa od 2012 roku, a została opracowana przez dr. hab. inż. Mieczysława Połońskiego, prof. SGGW. Znajdują się na niej m.in. informacje na temat składu, programu, historii Sekcji, sprawozdania z zebrań, monografie Sekcji, informacje o laureatach Nagrody PZiTb im. prof. Aleksandra Dyżewskiego, konferencjach, publikacjach i wydarzeniach. Logo Sekcji zostało opracowane przez profesora Tadeusza Kasprowicza na przełomie 2012 i 2013 roku.

Aktualnie Sekcja IPB składa się z 11 osób: sześciu członków KILiW PAN (trzech profesorów oraz trzech przedstawicieli praktyki budowlanej – prezesów dużych przedsiębiorstw związanych z wykonawstwem budowlanym), jednego członka stowarzyszonego z KILiW PAN oraz czterech profesorów spoza KILiW PAN. Ponadto w sekcji działa grupa problemowa licząca 20 osób, którą tworzą przedstawiciele środowiska naukowego inżynierii przedsięwzięć budowlanych z różnych ośrodków akademickich, reprezentujących 19 uczelni w kraju (rys. 1.1). W otwartych zebraniach Sekcji biorą także udział jej liczni sympatycy oraz zapraszani członkowie honorowi.

Tabela 1.1

Historia Sekcji IPB, kolejne nazwy i przewodniczący (<http://sipb.pk.edu.pl/>)

Lata kadencji	Nazwa sekcji	Nazwisko przewodniczącego sekcji
1952–1971	Sekcja Organizacji i Mechanizacji Robót Sekcja Organizacji i Mechanizacji Budowy (1957 r.) Sekcja Organizacji i Ekonomiki Budownictwa (1969 r.)	prof. dr hab. inż. Aleksander Dyżewski (zmarł pod koniec kadencji w 1970 r.), Politechnika Warszawska
1972–1974	Sekcja Mechanizacji, Organizacji i Ekonomiki Budownictwa	doc. dr inż. Andrzej Miączyński, Politechnika Warszawska
1975–1977	Sekcja Mechanizacji, Organizacji i Ekonomiki Budownictwa	prof. dr hab. inż. Andrzej Stefański, Politechnika Poznańska
1978–1986	Sekcja Mechanizacji, Organizacji i Ekonomiki Budownictwa	prof. dr hab. inż. Ryszard Ciołek, Politechnika Białostocka
1987–1989	Sekcja Mechanizacji, Organizacji i Ekonomiki Budownictwa	prof. dr hab. inż. Leon Rowiński, Politechnika Śląska
1990–1992	Sekcja Mechanizacji, Organizacji i Ekonomiki Budownictwa	prof. dr hab. inż. Kazimierz Cieszyński, Politechnika Warszawska
1993–1998	Sekcja Mechanizacji, Organizacji i Ekonomiki Budownictwa Sekcja Organizacji i Zarządzania w Budownictwie (1996 r.)	prof. dr hab. inż. Kazimierz Jaworski, Politechnika Warszawska
1999–2011	Sekcja Organizacji i Zarządzania w Budownictwie Sekcja Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych (2007 r.)	prof. dr hab. inż. Oleg Kapliński, Politechnika Poznańska
2012–2015	Sekcja Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych	prof. dr hab. inż. Tadeusz Kasprowicz, Wojskowa Akademia Techniczna
2016–2019	Sekcja Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych	prof. dr hab. inż. Anna Sobotka, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
2020–	Sekcja Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych	prof. dr hab. inż. Elżbieta Radziszewska-Zielina, Politechnika Krakowska

Rys. 1.1. Ośrodki, które reprezentują członkowie i sympatycy Sekcji Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych w aktualnej kadencji (<http://sipb.pk.edu.pl/>)

Ramowy program pracy Sekcji ewoluował w kolejnych kadencjach. Działalność Sekcji jest zgodna z celami i zadaniami Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, podobnie jak jej założenia programowe. Przyczyniają się one do realizacji następujących celów KILiW PAN: integracji środowiska, rozwoju kadr, działania na rzecz rozwoju szeroko rozumianego budownictwa, formułowania opinii naukowych, merytorycznych opinii w sprawach naukowych i technicznych związanych z zakresem kompetencji (<https://kiliw.pan.pl>).

Cele i formy pracy Sekcji IPB są następujące (podkreślono te, na które zwraca się szczególną uwagę w ocenie działalności dokonywanej przez władze KILiW):

1. Zapewnienie merytorycznego wsparcia Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN w realizacji prac podejmowanych w projektach interdyscyplinarnych.
2. Identyfikacja głównych problemów w praktyce budowlanej w zakresie przedsięwzięć budowlanych oraz określenie roli środowiska naukowego w ich rozwiązywaniu (aspekty naukowe i praktyczne).
3. Tworzenie warunków współpracy naukowców i praktyków w ramach specjalności IPB, informacja i wymiana doświadczeń w zakresie metodyki i wyników badań oraz wdrożeń praktycznych.
4. Rozszerzanie problematyki i metod badawczych, dostosowywanych do sytuacji rynkowej oraz współpracy międzynarodowej.
5. Propagowanie nowych technik i metod badawczych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych.
6. Zwiększenie aktywności w publikowaniu w czasopismach wysoko punktowanych, w tym „Archives of Civil Engineering” (KILiW PAN). Wsparcie polskich czasopism branżowych – „Przegląd Budowlany” (numery tematyczne wydania w zakresie problematyki IPB, np. PB 7-8/2021, PB 1-2/2023).
7. Wydanie kolejnej monografii IPB w serii „Studia z Zakresu Inżynierii KILiW PAN”, zawierającej wyniki badań naukowych z zakresu tematyki IPB (doktoraty, habilitacje, profesury).
8. Ocena uwarunkowań oraz możliwości i form wsparcia rozwoju kadry. Informacja o podejmowanych pracach naukowo-badawczych, zwłaszcza w zakresie prac promocyjnych (doktoraty, habilitacje), oraz prezentacja prac.
9. Udział członków Sekcji w organizacji wiodących konferencji oraz motywowanie do aktywnego uczestnictwa (cykliczna konferencja IPB, konferencja „krynicka” KILiW PAN i KN PZiTb). Patronat nad innymi konferencjami naukowymi i naukowo-technicznymi.
10. Współudział w kształtowaniu programów nauczania z zakresu inżynierii przedsięwzięć budowlanych i opracowywaniu nowatorskich materiałów dydaktycznych.
11. Zebrania Sekcji 3–5 razy w roku, na których wygłaszane są 1–2 referaty na temat aktualnych problemów naukowo-badawczych i technicznych (z prakty-

ki budowlanej) z zakresu IPB. Wizyty na wiodących budowach, np. przekopu Mierzei Wiślanej czy tunelu kolejowego w Łodzi.

12. Rozszerzenie współpracy międzynarodowej, wystąpienia gości z zagraniczej uczelni na zebraniach Sekcji.
13. Organizowanie międzyuczelnianych zespołów do przygotowywania i realizacji projektów badawczych i dydaktycznych w zakresie specjalności IPB.
14. Udział członków Sekcji w realizacji prac podejmowanych przez Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Współpraca z innymi sekcjami i komitetami (planowane wspólne zebrania i prezentacje).
15. Prowadzenie strony internetowej zawierającej informacje o pracy Sekcji oraz inne.

Tematyka prac badawczych podejmowanych w Sekcji IPB jest następująca:

1. Technologia robót budowlanych. Nowoczesne materiały i technologie w budownictwie.
2. Organizacja robót budowlanych. Harmonogramowanie i rozwój metod sieciowych.
3. Mechanizacja i automatyzacja robót budowlanych.
4. Zarządzanie procesem inwestycyjno-budowlanym z uwzględnieniem ryzyka i niepewności danych.
5. Bezpieczeństwo i ochrona zdrowia w budownictwie.
6. Organizacja i ekonomika procesu inwestycyjnego. Zarządzanie kosztami przedsięwzięcia budowlanego.
7. Technologia BIM w zarządzaniu przedsięwzięciem budowlanym.
8. Koncepcje, metody i modele zarządzania przedsiębiorstwem budowlanym. Analiza czynników otoczenia i rynku budowlanego, dobór strategii działania. Zarządzanie zasobami ludzkimi.
9. Koncepcje, metody i modele zarządzania przedsięwzięciem budowlanym. Systemy realizacji przedsięwzięć budowlanych, zarządzanie łańcuchami dostaw, zarządzanie jakością i komunikacją.
10. Eksploatacja (użytkowanie i utrzymanie) obiektów budowlanych. Modernizacje, remonty, rozbiórki obiektów budowlanych.
11. Metody wspomagające podejmowanie decyzji w budownictwie. Metody optymalizacji, analiza wielokryterialna, systemy ekspertowe, analizy sieciowe i inne.
12. W publikacjach widoczne jest podążanie za aktualnymi kierunkami w rozwoju światowej nauki oraz odniesienie ich do praktyki. Rozwijanie i wdrażanie nowoczesnych koncepcji społeczno-gospodarczych w realizacji przedsięwzięć budowlanych (ochrona środowiska, redukcja CO₂ i śladu węglowego, zrównoważony rozwój, analizy kosztowe i środowiskowe w cyklu życia, gospodarka cyrkulacyjna itd.).

Nauka stanowi siłę napędową rozwoju cywilizacji i ma kluczowe znaczenie dla naszej przyszłości. Podstawowym jej celem jest pełnienie funkcji poznawczej z wykorzystaniem metod badań naukowych, ale odgrywa ona również ważną rolę praktyczną, a wyniki badań powinny być wykorzystane w praktyce. Kluczowa w działalności Sekcji IPB jest współpraca naukowców i praktyków, co jest widoczne podczas zebrań Sekcji oraz na konferencjach organizowanych pod patronatem Sekcji. Naukowcy prowadzą badania w ramach m.in. doktoratów (np. doktoraty wdrożeniowe), współpracując z praktykami z przedsiębiorstw.

Rozwiązywanie problemów budownictwa wymaga wyjścia poza tradycyjny zakres, związany bezpośrednio z budowaniem nowych obiektów oraz utrzymaniem, przebudową i renowacją istniejących. Potrzebne jest korzystanie z nauk podstawowych (np. matematyka, informatyka) oraz nauk pokrewnych (np. inżynieria materiałowa). W pracy zawodowej i naukowej działający w obszarze aktywności KILiW PAN muszą również brać pod uwagę aspekty ekonomiczne, humanistyczne, socjologiczne, przyrodnicze (środowiskowe), a także szeroko rozumiane bezpieczeństwo. Ten szeroki wachlarz zagadnień powoduje, że zawód inżyniera budownictwa jest trudny i odpowiedzialny (co podkreślił przewodniczący KILiW PAN, profesor Kazimierz Furtak, podczas Jubileuszu KILiW PAN 24 maja 2022 roku w Międzyzdrojach). Stoją przed nami wyzwania, które staramy się osiągnąć w ramach prac Sekcji IPB. Dzięki naszej współpracy i zbiorowej aktywności działalność naszej Sekcji – mamy nadzieję – jest stale widoczna i ceniona zarówno przez innych członków KILiW, jak i praktyków.

1.2. PROBLEMATYKA MONOGRAFII

Prezentowane w niniejszej monografii zagadnienia obejmują szeroką tematykę związaną z realizacją przedsięwzięć budowlanych, począwszy od pomysłu inwestycji budowlanej do oddania jej do eksploatacji, jak również użytkowania i utrzymania obiektów budowlanych. Zainteresowaniem tej specjalności naukowej są zjawiska i zagadnienia obejmujące pełny cykl życia obiektów budowlanych, w tym ich rozbiorę oraz logistykę zwrotną w ramach gospodarki cyrkulacyjnej wraz z zagospodarowaniem odpadów. Jest to już czwarty tom serii monografii Sekcji IPB KILiW PAN, w których prezentowane są osiągnięcia członków i sympatyków tej sekcji.

Zamieszczone w monografii artykuły, opracowane przede wszystkim na podstawie prac naukowych realizowanych w ramach postępowań awansowych, zwłaszcza doktoratów, przedstawiają badania i rozwiązania problemów powstających na różnych etapach cyklu przedsięwzięcia budowlanego. I jakkolwiek niektóre problemy nie są nowe w działalności budowlanej i od lat badane mają już opracowane różne metody rozwiązywania, to przedstawione w poszczególnych rozdziałach

ich rozwiązania uwzględniają wymagania zmieniających się koncepcji społeczno-gospodarczych, jak też wykorzystywane są w nich nowe, rozwijane metody i narzędzia badawcze.

Koncepcja społeczno-gospodarcza zrównoważonego rozwoju została sformułowana na podstawie Agendy 21, przyjętej na Szczycie Ziemi w Rio de Janeiro w 1992 roku. Jej sygnatariuszami są 172 kraje ONZ, w tym Polska. Agenda jest wszechstronnym planem działania dla Narodów Zjednoczonych, rządów i grup społecznych w każdym obszarze, w którym człowiek ma wpływ na środowisko.

Agenda 21 domaga się nowych sposobów inwestowania w przyszłość, aby w XXI wieku osiągnąć globalny zrównoważony rozwój. Zakres jej zaleceń waha się od nowych metod nauczania po nowe metody wykorzystania surowców i uczestniczenia w tworzeniu zrównoważonej gospodarki. Ambicją Agendy 21 jest bezpieczny i sprawiedliwy świat, w którym każda żywa istota będzie w stanie zachować swoją godność (<https://www.unic.un.org.pl/johannesburg/>). Ustalenia (dokumenty) kolejnych konferencji międzynarodowych zmierzają do bardziej intensywnego wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju (a także gospodarki cyrkulacyjnej), z myślą o globalnym zrównoważonym rozwoju.

Obecne megatrendy rozwojowe ukierunkowane są na odnajdywanie równowagi pomiędzy ekonomią a aspektami społecznymi oraz środowiskowymi. Efektem wspomnianej równowagi powinno być zaspokajanie potrzeb społecznych przy jednoczesnej dbałości o środowisko, a zwłaszcza ograniczanie emisji dwutlenku węgla. Komisja Europejska dąży do osiągnięcia do 2050 roku w Europie gospodarki neutralnej pod względem emisji dwutlenku węgla, zrównoważonej, nietoksycznej i w pełni cyrkularnej. W przypadku sektora budowlanego plan działania na rzecz gospodarki cyrkulacyjnej przewiduje, że począwszy od 2020 roku 70% wszystkich odpadów musi być poddawanych recyklingowi.

W badaniach naukowych zagadnień inżynierii przedsięwzięć budowlanych kanonem jest rozważanie zjawisk z uwzględnieniem cyklu życia obiektu budowlanego i obiegów zamkniętych (energii, wody i innych zasobów), zgodnie z koncepcją budownictwa zamkniętego, logistyki zwrotnej, analizy całkowitych kosztów cyklu życia przedsięwzięcia i obiektu budowlanego, minimalizacji „śladu węglowego” itd.

Monografia zawiera 16 rozdziałów. W każdym w większym lub mniejszym stopniu uwzględniono koncepcję zrównoważonego rozwoju.

W **rozdziale 1** zawarto informacje na temat działalności Sekcji IPB KILiW PAN z racji Jubileuszu 70-lecia jej powołania. Przedstawiono krótką charakterystykę Sekcji, jej dotychczasowych przewodniczących oraz założenia programowe kontynuowana działalności. W tym rozdziale przedstawiono także krótką charakterystykę zawartości pozostałych zasadniczych rozdziałów monografii.

W czwartym tomie monografii Sekcji IPB kontynuowana jest tematyka planowania budowy z uwzględnieniem ryzyka. Jest to bardzo ważne zagadnienie, zwłaszcza ze względu na warunki niepewności i ryzyka, w jakich odbywa się produkcja bu-

dowlana (rozdziały 2–6). W przedstawionych badaniach autorzy rozważają dodatkowe czynniki, które oddziałują na przebieg procesów budowlanych, oraz rozwijają metody, które pozwalają na zmniejszenie lub w pewnym stopniu uniezależnienie się od przyczyn i skutków losowych zjawisk zakłócających starannie zaplanowany przebieg budowy.

„Harmonizacja realizacji procesów budowlanych wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego” to tytuł i przedmiot badań opisanych w **rozdziale 2**. Ze względu na trudności występujące w trakcie planowania przedsięwzięć zaproponowano kompleksowy system wspomagania harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, który może dostosować się elastycznie do preferencji kierownictwa budowy i ograniczeń realizacyjnych powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego. Opracowany system uwzględnia preferencje kierownictwa budowy, różnorytmiczność brygad, procesy niepowtarzalne lub realizowane tylko na części działek roboczych, a także dobór optymalnej kolejności obiektów budowlanych. Dąży się w nim również do zapewnienia ciągłości pracy brygad roboczych – przerwy w ich pracy generują problemy organizacyjne, obniżają ich produktywność oraz negatywnie wpływają na morale pracowników. Do znalezienia suboptymalnego rozwiązania sformułowanego problemu opracowano algorytm optymalizacji rojem cząstek. W algorytmie tym wprowadzono parametr wszczynający zamieszki (ang. *Riot Factor*), będący kompilacją istniejących w literaturze sposobów zapobiegania stagnacji rozwiązania. Do weryfikacji poprawności otrzymywanego rozwiązania zastosowano pięcioetapową procedurę. W celu przedstawienia sposobu funkcjonowania opracowanego systemu zharmonizowano realizację robót budowlanych przykładowego przedsięwzięcia budowlanego.

W **rozdziale 3**, pt. „Algorytm szacowania czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych”, autorzy proponują wykorzystanie teorii zbiorów rozmytych do modelowania skumulowanego wpływu czynników ryzyka na opóźnienia robót budowlanych. Czynnikiem, który najczęściej uruchamia sekwencję negatywnych zdarzeń na budowie, jest źle oszacowany czas realizacji inwestycji. Autorzy proponują metodę szacowania czasów wykonywania robót budowlanych z algorytmem będącym implementacją zaproponowanej metody. Zdefiniowano podstawowe pojęcia, tj. ryzyko, czynnik ryzyka oraz interakcje pomiędzy czynnikami. Dokładne przeanalizowanie problemu poskutkowało propozycją dodatkowego parametru „podatność”, który pozwala uwzględnić wzajemne oddziaływanie czynników ryzyka. Stanowi to uzupełnienie dotychczas stosowanych podejść w analizie jakościowej oraz ilościowej czynników. Algorytm rozpoczyna się określeniem zakresu przedsięwzięcia: sporządzenie przedmiaru, oszacowanie czasów nominalnych realizacji poszczególnych robót budowlanych oraz opracowanie modelu sieciowego. Omówiono oraz porównano narzędzia służące do identyfikacji oraz oceny jakościowej czynników ryzyka. W opracowanej metodzie rekomendowane jest wykorzystanie trójwymiarowej macierzy ocen prawdo-

podobieństwa z uwzględnieniem parametru „podatność”. Zaproponowano autorską metodykę wnioskowania rozmytego, czego efektem jest dyskretny rozkład prawdopodobieństwa czasu wykonywania poszczególnych robót budowlanych. Opisane propozycje oraz rozważania przedstawiono na przykładzie. W obszernym podsumowaniu tematyki rozdziału wypunktowano najważniejsze wnioski płynące z pracy oraz zaproponowano kierunki przyszłych badań.

W **rozdziale 4**, pt. „Harmonogramowanie inwestycji kolejowych w Polsce z uwzględnieniem ryzyka w trakcie ich realizacji”, przedstawiono kompleksową, autorską metodę planowania inwestycji kolejowych, uwzględniającą warunki ich realizacji w Polsce. Metodę nazwano Railway Matrix of Risk Factors (RMRF). Prognozowanie realnych terminów zakończenia inwestycji kolejowych zostało oparte na wiarygodnej bazie danych charakteryzujących czynniki ryzyka. Czynniki te zidentyfikowano w skali całego kraju na podstawie literatury, analizy dokumentów kontraktowych jednej z największych inwestycji kolejowych w Polsce, realizowanej w latach 2012–2016, oraz ogólnopolskiego badania ankietowego. Badanie zostało przeprowadzone wśród starannie wyselekcjonowanych inżynierów, uczestniczących w procesach budowy obiektów kolejowych. Uzyskane dane zostały odpowiednio pogrupowane w zbiory i analizowane z zastosowaniem odpowiednich modeli statystycznych dostępnych w pakiecie IBM SPSS Statistics 23.

Podstawowym celem metody jest zwiększenie dokładności prognozy terminu zakończenia przedsięwzięcia, z uwzględnieniem problemów realizacyjnych planowanej inwestycji.

Prezentowano implementację metody RMRF w rzeczywistym procesie realizacji inwestycji kolejowej, co umożliwiło weryfikację metody pod względem możliwości praktycznego zastosowania. Nie brano pod uwagę zagrożeń dla typowych inwestycji budowlanych (np. nieprzewidzianych warunków gruntowych czy pogodowych, katastrof naturalnych, awarii sprzętu budowlanego, wpływu zewnętrznych interesariuszy oraz problemów BHP). Skoncentrowano się wyłącznie na zagrożeniach wynikających ze specyfiki inwestycji kolejowych. Na zakończenie przedyskutowano otrzymane wyniki i sformułowano wnioski.

Przedmiotem badań zaprezentowanych w **rozdziale 5**, pt. „Planowanie działań inżynieryjno-budowlanych realizowanych przez jednostki o zhierarchizowanych strukturach”, jest analiza działalności inżynieryjno-budowlanej jednostek zmilitaryzowanych oraz innych jednostek mających złożoną strukturę zasobów w realizacji zadań budowlanych na addytywnych frontach robót. Działalność taka prowadzona jest z reguły w sytuacjach kryzysowych w ramach utrzymania infrastruktury budowlanej przez wydzielone, zorganizowane w struktury sztabowo-liniowe jednostki organizacyjne.

Podjęty temat związany jest z praktyką planowania działań inżynieryjno-budowlanych, z użytecznym dla planistów zarządzających złożoną strukturą zasobów celem. Zaproponowany sposób planowania działalności jednostek zasobowych

o hierarchicznie zorganizowanej strukturze bazuje na normalizacji zadań inżyniersko-budowlanych, takiej jaką stosuje się powszechnie w budownictwie. Sposób ten dedykuje się planowaniu działań w sytuacjach kryzysowych, w których potencjalne (przewidywane) zadania powinny być również znormowane, uzupełniając bazę KNR. Charakter przedmiotu planowania wymusił potrzebę uwzględnienia w opracowanej metodzie niepewności danych ilościowych wykorzystywanych w planowaniu. W tym aspekcie zaprezentowano koncepcję zarządzania ryzykiem, zwłaszcza zaś sposób przeciwdziałania zagrożeniom niedotrzymania terminów dyrektywnych na etapie planowania i podczas realizacji robót inżyniersko-budowlanych na frontach roboczych.

W rozwiązaniu badanych zagadnień zastosowano metody analizy matematycznej i badań operacyjnych oraz współczesne osiągnięcia teorii harmonogramowania procesów pracy.

Podjęty temat oraz zaprezentowane w pracy podejście do planowania operacyjnego, zwłaszcza wyrażanie możliwości wykonania zadań przez pryzmat jednostek złożonych (z różnych poziomów globalnej struktury) w realizacji rozproszonych frontów robót, stanowi nowy problem w obszarze harmonogramowania pracy zasobów czynnych.

Podejście systemowe do planowania przedsięwzięć przedstawiono w **rozdziale 6** pt. „Proaktywne podejście do planowania przedsięwzięć budowlanych z wykorzystaniem teorii metasieci”. W uzasadnieniu zaproponowanej metody autor na podstawie szerokiego przeglądu literatury analizuje intensywny rozwój metod planowania w warunkach ryzyka i niepewności. Zauważa, że klasyczne podejście do oceny jakościowej i ilościowej ryzyka zaniedbuje analizę złożoności przedsięwzięcia i roli jego emergentnych właściwości jako formy odpowiedzi systemu na czynniki ryzyka oraz skutki, jakie one wywołują. Zwraca uwagę na zasadność stosowania tzw. myślenia (podejścia) systemowego do analizy ryzyka przedsięwzięć budowlanych. Przedsięwzięcia te traktowane są jako złożone systemy, w których wzajemnie powiązane i dynamicznie oddziaływujące na siebie elementy zorientowane są na osiągnięcie określonych celów. Ocena odporności systemowej przedsięwzięć budowlanych na wpływ ryzyka determinowana jest poziomem podatności tych systemów na zakłócenia oraz ich zdolności adaptacyjnej do zmieniających się warunków realizacji. W ramach myślenia systemowego zwraca uwagę na różne strategie takie jak np.: redundancja systemowa, decentralizacja procesów, alternatywne technologie, współpraca, które potencjalnie przyczyniają się do zwiększania odporności systemowej przedsięwzięć budowlanych na wpływ ryzyka. Proces decyzyjny doboru tych strategii wymaga rozwijania skutecznych ilościowych metod optymalizacji. Zaprezentowana przez autora metoda stanowi rozwinięcie dotychczasowych koncepcji, wykorzystujących teorię heterogenicznych sieci do modelowania i analizy strukturalnej złożonych systemów. Wykorzystanie tych sieci pozwala na uchwycenie emergentnych właściwości/złożonych systemów. Przedstawiony

w artykule przykład zastosowania tej metody potwierdza jej potencjał aplikacyjny. Należy zwrócić uwagę, że uniwersalny charakter proponowanego podejścia umożliwia zastosowanie go do badania odporności na wpływ ryzyka także innych niż przedsięwzięcia budowlane złożonych systemów socjotechnicznych, zorientowanych na realizację procesów.

W planowaniu przedsięwzięć budowlanych, ale też w ich realizacji, monitorowaniu, proponowaniu rozwiązań i podejmowaniu decyzji, ważny jest właściwy przepływ informacji pomiędzy uczestnikami przedsięwzięcia budowlanego.

Problem ten przedstawiono w **rozdziale 7** pt. „Ocena i zwiększenie efektywności sieci komunikacyjnej przedsięwzięcia budowlanego”. Specyfika realizacji przedsięwzięcia budowlanego polega na tym, że zmiany w trakcie jego realizacji prawie zawsze są nieuniknione. Hipoteza wstępna zakłada, że efektywna komunikacja pomiędzy uczestnikami przedsięwzięcia pozwoli na skrócenie czasu przestojów, zminimalizowanie ilości wykonanych poprawek, polepszenie jakości produktu końcowego oraz obniżenie kosztów.

Celem badań opisanych w tym rozdziale była propozycja podejścia, pozwalającego na zwiększenie efektywności funkcjonowania komunikacji uczestników przedsięwzięcia budowlanego, które obejmuje etapy zbierania danych, obliczania miar centralności, grupowania i optymalizacji sieci komunikacyjnej oraz może być stosowane na każdym etapie realizacji przedsięwzięcia budowlanego.

Metodą badawczą stosowaną do realizacji celów i zadań była analiza sieci społecznościowych SNA (ang. *Social Network Analysis*). Wyniki obliczeń miar centralności, bazujących na metodzie SNA, pozwalają na identyfikację kluczowych uczestników sieci komunikacyjnej, poznanie znaczenia wszystkich uczestników i relacji między nimi oraz wykrycie różnych anomalii.

Kierownictwo przedsięwzięcia powinno szczegółowo przeanalizować sytuację (niskie wartości centralności węzła, gdy te miary powinny być wysokie; wysokie wartości centralności węzła, gdy te miary powinny być niskie; wysokie/niskie obciążenie komunikacji; obecność w pewnym klastrze węzła, które nie powinno się tam znajdować) przy identyfikowaniu różnego rodzaju dysfunkcji i odchyłeń.

W trakcie prowadzonych badań zidentyfikowano zaprezentowanych w przykładzie uczestników sieci o największym obciążeniu komunikacyjnym. Obciążenie komunikacyjne oznacza, że komunikator otrzymuje więcej treści komunikacyjnych, niż może opracować, więc doświadcza przeciążenia komunikacyjnego. Przeciążenie komunikacji może stanowić prawdziwy problem i prowadzić do utraty sygnałów informacyjnych, pojawienia się błędów i spadku wydajności. W podsumowaniu wskazano, że zaproponowana metoda może być wykorzystana przez kierownictwo przedsięwzięcia do analizy rzeczywistej sieci komunikacyjnej i podejmowania odpowiednich decyzji zarządczych.

Na przykładzie inwestycji infrastrukturalnych przedstawiono także ważny problem dostosowania możliwości użytkowych obiektów do zmieniających się potrzeb

w czasie ich eksploatacji (użytkowania). W **rozdziale 8**, pt. „Elastyczność w zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi w dynamicznie zmiennym otoczeniu na przykładzie inwestycji infrastrukturalnych”, przedstawiono zastosowanie podejścia elastycznego w zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi w dynamicznie zmiennym otoczeniu. Wprowadzenie elastyczności może być rozważane na różnych poziomach: strategicznym (np. polityki przedsiębiorstwa), taktycznym (dostosowanie do zmiennych wymagań interesariuszy w cyklu życia przedsięwzięcia) i operacyjnym (dostosowanie opcji zarządzania procesem budowlanym do zmieniającego się otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego). W omawianym przypadku chodzi o dostosowanie do zmiennych wymagań interesariuszy przedsięwzięcia budowlanego w cyklu jego życia. Spodziewana zmiana niewątpliwie nastąpi (np. osiągnięcie natężenia ruchu na autostradzie, wymagające dobudowania kolejnego pasa ruchu), jednak trudno jest przewidzieć kiedy. W badaniach zastosowano metodę FLEXICON, umożliwiającą zaplanowanie i ocenę przydatności zaproponowanych opcji elastyczności, które zapewniają możliwość osiągnięcia sukcesu planowanego przedsięwzięcia pomimo wystąpienia zmian w trakcie cyklu życia. Prezentowane przykłady zastosowania podejścia elastycznego w przypadku przedsięwzięć infrastrukturalnych wykazały przewagę zastosowania elastyczności w porównaniu z podejściem tradycyjnym (zwiększenie wartości średniej NPV od 13% do 39%). Zaprezentowano dwie zasadnicze opcje elastyczności: rozszerzenia (w odniesieniu do infrastruktury transportowej) i redukcji (w odniesieniu do infrastruktury sportowej przeznaczonej do realizacji imprez o skali kontynentalnej lub światowej, np. igrzysk olimpijskich).

Zagadnieniem, któremu poświęca się także wiele uwagi w badaniach i poszukiwaniach sposobów jego ograniczenia jest wypadkowość w budownictwie. Bezpieczeństwo pracy i ochrona zdrowia badane są zarówno na poziomie strategicznym przedsiębiorstw, jako strategię zarządzania bezpieczeństwem w ogólnych strategiach wykonawczych przedsiębiorstw budowlanych, jak i operacyjnym na poziomie placu budowy – robót budowlanych. Dbłość o bezpieczną pracę na budowie, ochrona zdrowia i środowiska pracy oraz otoczenia są istotnymi zagadnieniami społecznymi. Ta tematyka stanowi przedmiot badań opisanych w rozdziałach 9 i 10.

W **rozdziale 9**, pt. „Ocena wpływu wybranych czynników na zdarzenia niebezpieczne w budownictwie”, przedstawiono analizę czynników wpływających na bezpieczeństwo pracy w przedsiębiorstwie budowlanym. Podjęto w nim próbę analizy zarządzania bezpieczeństwem pracy w przedsiębiorstwach budowlanych w celu wskazania istotnych czynników i wyznaczenia istotności ich udziału w zaistnieniu wypadków przy pracy. Badania zrealizowano na podstawie danych uzyskanych z rejestru prowadzonego w Okręgowym Inspektoracie Pracy w Krakowie. Dyskutowano przypadki ujęte zarówno w protokołach powypadkowych, sporządzanych z mocy prawa, jak i przypadki ujęte w protokołach z kontroli doraźnych przeprowadzanych na terenach budów. W analizowanym zbiorze danych występowały dane

ilościowe i jakościowe. Do analizy zgromadzonych informacji i budowy modelu posłużono się regresją logistyczną. Metoda ta daje możliwość zbadania i określenia istotności wpływu poszczególnych zmiennych, charakteryzujących sposób zarządzania bezpieczeństwem pracy w przedsiębiorstwach budowlanych, na zaistnienie wypadku. Otrzymane wyniki, a zwłaszcza wykazana w modelu istotność czynników niezwiązanych bezpośrednio z terenem budowy, mogą być wskazówką do budowy strategii funkcjonalnej w przedsiębiorstwie. Strategii zakładającej: mniejszą ilość wypadków lub zdarzeń niepożądanych, krótsze przestoje oraz budowę renowy instytucji dbającej o pracownika. Pozwoli to na uzyskanie większej konkurencyjności przedsiębiorstwa budowlanego oraz przyciąganie najlepszych fachowców dostępnych na rynku pracy. Efektem końcowym badań jest wskazanie kluczowych czynników, mających bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo pracy i konkurencyjność przedsiębiorstwa.

Tematem badań opisanych w **rozdziale 10** jest „Modelowanie rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie”. Budownictwo od wielu lat należy do jednego z najbardziej wypadkogennych sektorów gospodarki narodowej. Pracownicy zatrudnieni w budownictwie narażeni są na działanie wielu czynników niebezpiecznych, powodujących wypadki. Przeprowadzone badania dotyczyły identyfikacji najczęściej powtarzających się scenariuszy wypadkowych. Celem niniejszego rozdziału było opracowanie modelu rozwoju złożonego zjawiska wypadkowości w polskim budownictwie, a także zdefiniowanie prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych scenariuszy przebiegu wypadków i określenia na tej podstawie scenariuszy o największym prawdopodobieństwie.

Pozyskano z okręgowych inspektoratów pracy w Polsce niezbędny materiał badawczy w postaci 644 protokołów kontroli powypadkowej. Na podstawie zgromadzonych materiałów opracowano strukturę bazy danych o wypadkach przy pracy. Bazę tę zaimplementowano w postaci aplikacji webowej: Informatycznej Bazy Danych (IBD). Do odwzorowania i badań złożonego procesu wypadkowego, który tworzy ciąg wypadków zachodzących w dyskretnych momentach, na różnych pod względem lokalizacji, konstrukcji i wyposażenia technicznego budowach, zaproponowano graf skierowany. W modelu tym ciąg zdarzeń zjawisk podczas pracy tworzy dyskretny proces wypadkowy, przebiegający w określonej przestrzeni możliwych scenariuszy. Opracowano metodykę analizy tego złożonego procesu wypadkowego. Symulacja przebiegu wszystkich wypadków znajdujących się w Informatycznej Bazie Danych pozwoliła na obliczenie prawdopodobieństwa wystąpienia różnych scenariuszy wypadkowych. Zaproponowany model ma duże znaczenie dla praktyki budowlanej. Otrzymane wyniki badań mogą stanowić podstawę do poprawy stanu bezpieczeństwa w budownictwie.

Od wielu już lat, na świecie i w Polsce, prowadzone są badania w zakresie wdrażania koncepcji zrównoważonego rozwoju i gospodarki cyrkulacyjnej także w działalności budowlanej. Ochrona środowiska jest w gospodarce zagadnieniem prio-

rytetowym, a budownictwo generuje około 40% ogółu odpadów i emituje ogromne ilości dwutlenku węgla. Badania nad wdrażaniem zasad koncepcji prośrodowiskowych i ich wyniki przedstawione są w trzech rozdziałach (11–13). Dotyczą one zagadnień następujących faz przedsięwzięć budowlanych: planowania i przygotowania przedsięwzięcia, użytkowania obiektów/budynków podczas ich eksploatacji oraz likwidacji, tj. procesu rozbiórki i zagospodarowania odpadów. W badaniach i modelach ujmujących zagadnienia prośrodowiskowe stosuje się podejście obejmujące cały cykl życia obiektu budowlanego ze sprzężeniem zwrotnym. Inaczej formułując – dąży się do budownictwa o obiegu zamkniętym. Wszelkie odpady lub materiały powstające podczas budowy, remontów i rozbiórek należy zagospodarować, tj. ponownie wykorzystać w obiekcie lub też poddać recyklingowi. Dużą rolę w tych procesach odgrywa logistyka zwrotna.

Rozdział 11, pt. „Narzędzia wspomagające przeprowadzanie ocen środowiskowych inwestycji budowlanych”, dotyczy działań prośrodowiskowych już w fazie przygotowania przedsięwzięcia budowlanego do realizacji. W tej fazie mogą być przeprowadzane różne oceny środowiskowe, ukierunkowane na ograniczenie negatywnego wpływu inwestycji na środowisko (np. ocena oddziaływania na środowisko, ponowna ocena oddziaływania, ocena oddziaływania na obszar Natura 2000). Celem badań była analiza obecnego stanu wiedzy w zakresie metod, technik i narzędzi wspomagających prowadzenie ocen środowiskowych oraz dobór konkretnych metod, technik i narzędzi analitycznych do rozwiązywania kluczowych problemów oceny oddziaływania na środowisko inwestycji budowlanej w Polsce. W odpowiedzi na brak wytycznych metodycznych w zakresie doboru narzędzi do weryfikowania kompletności dokumentacji środowiskowej przedkładanej przez inwestorów, autorki zaproponowały zastosowanie listy kontrolnej inwestycji. Lista może być wykorzystywana do sprawdzenia kompletności zagadnień analizowanych w raportach o oddziaływaniu na środowisko lub kartach informacyjnych przedsięwzięć. Opracowane komponenty listy kontrolnej inwestycji nawiązują do prawnych kryteriów kwalifikacji inwestycji do oceny oddziaływania na środowisko. Są jednak bardziej precyzyjne i kompletne. Do rozwiązania problemu kwalifikowalności do kategorii przedsięwzięcia znacząco oddziałującego na środowisko, autorki zaproponowały diagram przyczynowo-skutkowy. Diagram umożliwia graficzną prezentację powiązań między przyczynami danego problemu i ich hierarchię. Do oceny ważności kryteriów oddziaływań inwestycji budowlanej na różne komponenty środowiska zaproponowano metodę porównania kryteriów parami.

„Metoda oceny socjalnych właściwości użytkowych obiektów mieszkalnych” to tytuł **rozdziału 12**. Przedstawiono w nim metodę oceny jednego z trzech podstawowych aspektów budownictwa zrównoważonego, dotyczącą socjalnych właściwości użytkowych budynków mieszkalnych. Opracowanie powstało na podstawie zaleceń serii norm PN-EN 15643 i PN-EN 16309+A1:2014, na bazie których określono obszar cech charakteryzujących aspekt socjalny w budynkach. Cechy so-

cialne przedstawiono w podziale na kategorie, uszczegóławiające je kolejno na subkategorie i kryteria. Dodatkowo dodano kryteria, które nie były zawarte w normach dotyczących oceny aspektu socjalnego zrównoważonego budownictwa, a które są niezbędne przy ocenie. Opracowanie zestawu cech i sposobu ich oceny zostało ustalone za pomocą (1) bezpośrednich badań ankietowych zarówno wśród użytkowników mieszkań, jak i ekspertów w zakresie budownictwa, (2) badań in situ, np. dotyczących oceny komfortu akustycznego mieszkań, (3) przeglądu i analizy przepisów prawnych i wytycznych normowych oraz literatury związanej z utrzymaniem i oceną obiektów.

Uzyskane dane poddano analizie, która pozwoliła wyznaczyć charakter, sposób oceny i ważność uwzględnianych do oceny cech obiektów mieszkalnych. Następnie zaproponowana została metoda oceny socjalnej przez wyznaczenie wskaźnika jakości socjalnej dla budynków z zastosowaniem analizy wielokryterialnej, traktując obiekt jako system i porównując obiekt oceniany do obiektu referencyjnego, będącego cyfrowym modelem obiektu spełniającego aktualne przepisy i normy. Dodatkowo opracowany został program komputerowy usprawniający przeprowadzenie oceny socjalnej, który jednocześnie pozwala zilustrować uzyskane oceny cząstkowe jako wykresy pajęczce z oceną badanego obiektu w skali pięciopunktowej.

Zaproponowana metoda umożliwia i ułatwia porównanie socjalnych właściwości użytkowych w różnych budynkach mieszkalnych. Pozwala również na klasyfikację budynków ze względu na stopień spełnienia przez nie socjalnych właściwości użytkowych, co może stanowić praktyczne narzędzie wspomagające decyzję dotyczącą dalszych losów budynku (tj. kolejności niezbędnych remontów) lub decyzję o zakupie bądź sprzedaży nieruchomości przez wskazanie jej słabych i mocnych stron.

Rozdział 13, pt. „Wspomaganie decyzji w logistyce odzysku odpadów betonowych”, dotyczy przede wszystkim fazy likwidacji obiektów budowlanych. W trakcie ich rozbiórek, jak również podczas remontów i budowy, generowane są ogromne ilości odpadów budowlanych, w tym odpadów betonowych. Od wielu lat są one wykorzystywane, zwłaszcza w budownictwie drogowym. Jednakże nie jest to wciąż odpowiednia skala zagospodarowania odpadów betonowych do ich ilości ani też do korzyści, jakie przynosi ich recykling, ani też do obecnych wymogów zrównoważonego rozwoju i gospodarki cyrkulacyjnej. Aktualne trendy społeczno-gospodarcze wymagają, aby podnosić efektywność istniejących systemów odzysku w wymiarze zarówno środowiskowym, jak i społecznym oraz finansowym. Wyzwanie to wymaga oceny systemów uwzględniających zasady zrównoważonego rozwoju w trzech jego aspektach: ekonomicznym, środowiskowym i socjalnym. Jest to zagadnienie interdyscyplinarne i złożone, wymagające analizy zysków i strat wynikających z przyjętych scenariuszy gospodarowania odpadami – w tym procesów należących do logistyki odzysku. Celem badań było opracowanie systemu wspomagającego decyzję dotyczącą organizacji zagospodarowania odpadów betonowych na budowie, z uwzględnieniem kryteriów zrównoważonego rozwoju. System

oparto na modelach symulacyjnych logistyki odzysku, założono również możliwość definiowania wag kryteriów przez decydenta. Zadaniem systemu jest obliczenie wskaźników kosztów oddziaływania na środowisko oraz opisanie uciążliwości społecznej wariantów organizacyjnych zagospodarowania odpadów, z uwzględnieniem parametrów przedsięwzięcia budowlanego. Warianty podlegają wielokryterialnej ocenie, która sprowadza się do syntetycznego wskaźnika, umożliwiającego sporządzenie rankingu rozwiązań.

W procesie modelowania matematycznego oraz budowy symulatora zastosowano wiele metod badawczych i naukowych, w tym: badanie ankietowe, wywiady, metody obserwacji, pomiary terenowe – chronometrażowe, pomiary ciśnienia akustycznego oraz poziomu zapylenia, metody statystyczne (statystyka opisowa, wnioskowanie statystyczne, analiza współzależności zjawisk), rachunek prawdopodobieństwa, teorię masowej obsługi, metodę Monte Carlo, metodę oceny środowiskowej LCA, analizę wielokryterialną.

Problem ograniczania śladu węglowego w produkcji budowlanej zasygnalizowano w **rozdziale 14** pt. „Analiza śladu węglowego w ocenie materiałów i technologii budowania”. Przedstawiono i omówiono źródła emisji budynku mieszkalnego, wpływ rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych i technologiczno-organizacyjnych na całokształt emisji gazów cieplarnianych oraz możliwe metody ograniczania śladu węglowego. Przedstawiono sposób i wyniki obliczenia śladu węglowego przykładowego budynku. Analiza wyników wskazuje, że dobór odpowiednich rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych oraz technologiczno-organizacyjnych może realnie ograniczać ślad węglowy.

Zwrócono uwagę na niedostatek badań, metod i narzędzi do szacowania śladu węglowego oraz konieczność przyspieszenia wszelkich działań prowadzących do redukcji emisji szkodliwych dla środowiska.

Realizacja i eksploatacja obiektów budowlanych jest działalnością związaną z ponoszeniem wysokich kosztów. Należy je jednak rozważać w całym cyklu życia. I takie podejście, obejmujące cały cykl życia, jest zaprezentowane w **rozdziale 15** pt. „Model szacowania kosztów życia budynków (WLC) umożliwiający kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko”. W rozdziale zaprezentowano model oraz wyniki jego praktycznego zastosowania w odniesieniu do przykładowego budynku. Omówiono pojęcie cyklu życia budynku, jak również wyjaśniono różnice i podobieństwa dotyczące kosztów cyklu życia (LCC) i całości kosztów życia budynku (WLC). Dokonano klasyfikacji kosztów i przychodów w poszczególnych fazach cyklu życia budynku. W części zasadniczej rozdziału wskazano na cel główny ekonomicznej analizy cyklu życia (LCCA), tj. oszacowanie kosztów cyklu życia (LCC) dla materiału, komponentu lub obiektu budowlanego (w tym budynku). Przedstawiono i scharakteryzowano strukturę modelu, przedstawiono metody, twierdzenia i zasady wykorzystane do jego budowy, a także dokonano podziału i parametryzacji danych wejściowych. Algorytm obliczeniowy modelu uwzględni

możliwość oszacowania wielkości kryteriów porównawczych: kosztów cyklu życia budynku (LCC), ekwiwalentu rocznych kosztów cyklu życia (LCEAC), całości kosztów życia (WLC) i dodatku kosztowego za ryzyko ($\Delta RLCC$). W przykładzie obliczeniowym, obejmującym analizę ekonomiczną cyklu życia (LCCA) czterokondygnacyjnego budynku mieszkalnego wielorodzinnego z wydzieloną powierzchnią gospodarczą i usługową, zdefiniowano scenariusze cyklu życia dla rozwiązań alternatywnych budynku, przedstawiono zakres danych czasowych i finansowych przyjętych do obliczeń oraz zaprezentowano rezultaty analizy LCCA pod względem przyjętych kryteriów porównawczych.

Badania i ich wyniki służą opracowaniu metod i narzędzi do wspomagania podejmowania decyzji w działalności budowlanej. Oparte są na informacjach. Stąd też decyzje są na tyle dobre, na ile dobre są informacje, na których się opierają. Ich jakość uzależniona jest także od doboru metod badawczych, adekwatnie do postawionego problemu. Spośród wielu metod stosowanych do badań zjawisk związanych z budownictwem, metody kwestionariuszowe pozwalają na zebranie różnorodnych informacji.

Obszerne ich omówienie zawiera **rozdział 16** pt. „Badania ankietowe w budownictwie”. W prezentowanych badaniach postawiono trzy cele. Pierwszy – przegląd literatury w zakresie badań zrealizowanych w ostatnich latach w budownictwie, a zwłaszcza w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, w których jako narzędzie badawcze zastosowano kwestionariusz wywiadu lub ankiety. Przegląd przeprowadzono na podstawie wybranych artykułów z bazy Scopus, opublikowanych w okresie ostatnich dziesięciu lat. Drugi – wskazanie aktualnych trendów badawczych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, najczęściej poruszanych problemów współczesnego budownictwa, które starano się zbadać i przeanalizować z wykorzystaniem badań ankietowych lub wywiadów. Trzeci – wykazanie, że badania te, mimo iż najczęściej wykorzystywane są w naukach społecznych, a rzadziej w naukach technicznych, są jednak bardzo dobrym narzędziem do rozwiązania wskazanych problemów badawczych w budownictwie. W rozdziale zawarto rezultaty doświadczeń badawczych i przemyśleń autorki na temat możliwości zastosowań badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych.

Autorka wskazała aktualne trendy badawcze w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, które starano się zbadać i przeanalizować z wykorzystaniem badań ankietowych lub wywiadów, przeanalizowała i opisała możliwości zastosowania badań ankietowych zarówno w nauce, jak i praktyce inżynierii przedsięwzięć budowlanych oraz zaproponowała klasyfikację badań kwestionariuszowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych.

Metody badań ankietowych są źródłem wartościowych danych, samodzielnie lub w połączeniu z innymi metodami dostarczają informacji, które są następnie analizowane przez badacza, a wyciągnięte na ich podstawie wnioski oraz wynik końcowy analizy jest wykorzystywany w zakresie diagnozowania i prognozowania

zjawisk oraz problemów, a także sterowania procesami. Przede wszystkim jednak wspomagają decydenta w trudnym procesie podejmowania decyzji.

Monografia kierowana jest do badaczy zajmujących się problemami z zakresu inżynierii przedsięwzięć budowlanych, doktorantów poszukujących tematów badawczych, wiedzy o sposobach prowadzenia badań, metod i modeli odwzorowujących badane zjawiska (zagadnienia) i metod ich analizowania/rozwiązywania. Prezentowane badania i ich wyniki mogą być przydatne pracownikom dydaktycznym, a także studentom w pozyskiwaniu pogłębionej wiedzy oraz umiejętności badawczych, niezbędnych w działalności badawczej, komunikacji naukowej oraz na rynku pracy.

Monografia jest pracą zespołową członków Sekcji IPB KILiW PAN i osób współpracujących. Autorzy reprezentują następujące ośrodki akademickie:

1. Prof. dr hab. inż. Elżbieta Radziszewska-Zielina – Politechnika Krakowska.
2. Prof. dr hab. inż. Anna Sobotka – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.
3. Dr hab. inż. Wojciech Drozd, prof. PK – Politechnika Krakowska.
4. Dr hab. inż. Nabi Ibadov, prof. PW – Politechnika Warszawska.
5. Dr hab. inż. Janusz Kulejewski, prof. PW – Politechnika Warszawska.
6. Dr hab. inż. Roman Marcinkowski – prof. PW, Politechnika Warszawska.
7. Dr hab. inż. Jerzy Paślawski, prof. PP – prof. Politechnika Poznańska.
8. Dr hab. inż. Elżbieta Szafranko – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.
9. Dr hab. Roman Trach – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
10. Dr inż. Jolanta Harasymiuk – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.
11. Dr inż. Krzysztof Kaczorek – Politechnika Warszawska.
12. Dr inż. Marcin Kowalik – Politechnika Krakowska.
13. Dr inż. Jan Kowalski – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
14. Dr inż. Aleksandra Radziejowska – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.
15. Dr inż. Joanna Sagan – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.
16. Dr inż. Radosław Sekunda – Biuro Inżynierskie Radosław Sekunda.
17. Dr inż. Grzegorz Śladowski – Politechnika Krakowska.
18. Dr inż. Mariusz Szóstak – Politechnika Wrocławska.
19. Dr inż. Michał Tomczak – Politechnika Lubelska.
20. Dr inż. Damian Wieczorek – Politechnika Krakowska.
21. Dr inż. Maria Kośmiejka – Politechnika Poznańska.
22. Inż. Grzegorz Śledź, student II stopnia na kierunku Budownictwo Wydziału Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Elżbieta Radziszewska-Zielina, Anna Sobotka

2. HARMONIZACJA REALIZACJI PROCESÓW BUDOWLANYCH WIELOOBIEKTOWEGO PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO

Michał Tomczak¹

2.1. WSTĘP

Jednym z częściej występujących rodzajów przedsięwzięć budowlanych są powtarzalne przedsięwzięcia budowlane. Należą do nich przedsięwzięcia zawierające grupy procesów, których realizacja jest powtarzana na wielu działkach (lokalizacjach), np. budowa wysokościowców, osiedli domów wielorodzinnych, rurociągów czy dróg. Z reguły dąży się do tego, aby te same brygady robocze (w niezmiennym składzie osobowym) wykonywały procesy budowlane odpowiadające ich kwalifikacjom na kolejnych działkach roboczych w tej samej kolejności. Znaczącą korzyścią, wynikającą z podziału przedsięwzięcia na działki i powierzenia ich do realizacji tym samym brygadam (poza skróceniem czasu realizacji przedsięwzięcia dzięki wcześniejszemu rozpoczynaniu kolejnych procesów), jest możliwość znacznego podniesienia wydajności zatrudnionych brygad na skutek wielokrotnej powtarzalności ich zadań i specjalizacji w wykonywaniu tych samych czynności (ang. *learning effect*) [9]. Jednak harmonogramowanie takich przedsięwzięć jest zadaniem znacznie trudniejszym od harmonogramowania innych typów przedsięwzięć budowlanych – różnice w wydajnościach poszczególnych brygad oraz różnice w tempie realizacji poszczególnych procesów nawarstwiają się przy ich powtarzaniu na kolejnych działkach roboczych, prowadząc do wydłużenia czasu i przerw w pracy brygad.

Początkowo do planowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych stosowano klasyczne metody sieciowe, takie jak *Critical Path Method*, *Program Evaluation and Review Technique* czy *Precedence Diagramming Method*. W przypadku budowlanych przedsięwzięć powtarzalnych metody te, ze względu na pomijanie zagadnienia alokacji zasobów w celu ich nieprzerwanej pracy, nie dają jednak satysfakcjonujących rezultatów i obecnie uznaje się je za nieodpowiednie do planowania takiego rodzaju przedsięwzięć budowlanych [5, 8, 18, 45, 46]. Dlatego w celu harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych opracowano i za-

¹ Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: m.tomczak@pollub.pl.

często stosować metody dedykowane temu problemowi, nazwane metodami liniowymi harmonogramowania przedsięwzięć powtarzalnych (ang. *Linear Repetitive Scheduling Methods*), takie jak: Line-of-Balance (zaadaptowano ją z zarządzania produkcją przemysłową) [7, 38], *Linear Scheduling Method* [21] czy *Repetitive Scheduling Method* [22]. Metody te cały czas są poprawiane i rozwijane w celu zwiększenia wydajności brygad [12], poprawy jakości rozwiązania [55] czy optymalnego przydziału brygad do realizacji procesów [17]. Metody te są niezwykle wartościowe w odniesieniu do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, lecz w przypadku pojawienia się odstępstw od założeń typowych przedsięwzięć powtarzalnych (występowanie procesów niepowtarzalnych, dodatkowe ograniczenia technologiczne czy organizacyjne, niejednorodność działek roboczych, różnorytmiczność brygad) występują trudności w ich stosowaniu. Niemożność dostosowania metod liniowych i uwzględnienia odmiennych preferencji oraz ograniczeń występujących w rzeczywistych przedsięwzięciach budowlanych zniechęca menadżerów budowlanych do ich stosowania [43, 48, 49]. Aby przezwyciężyć te trudności, badacze od wielu lat opracowują modele matematyczne optymalizacji harmonogramów powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. W tym celu wybierają elementy rzeczywistości, przyjęte jako istotne dla danego zagadnienia, oraz określają reguły ich działania [10]. Modele te najczęściej optymalizują czas i/lub koszt przedsięwzięcia [11, 39] czy odporność harmonogramu na zakłócenia [27, 57]. Można też wyróżnić podejścia wielokryterialne [1, 2, 4, 35, 37] oraz zorientowane na zasoby [13, 14, 41, 42].

Osobnym, chociaż oczywiście ściśle powiązanim z modelowaniem, problemem jest znalezienie efektywnego rozwiązania opracowanego modelu. Podejścia znajdujące te rozwiązania można podzielić na dokładne i znajdujące rozwiązania suboptymalne.

Podejścia dokładne polegają najczęściej na zbudowaniu modelu matematycznego i rozwiązaniu go za pomocą jednego z dokładnych algorytmów lub dostępnych na rynku solverów. I tak na przykład Radziszewska-Zielina i Sroka [36] przedstawiły koncepcję harmonogramowania priorytetowego (ang. *Priority Scheduling*). Harmonogramowanie priorytetowe zakłada, że ograniczenia znajdujące się wyżej w rankingu są traktowane jako priorytetowe i ich przestrzeganie musi być spełnione. Kolejne ograniczenia są mniej ważne i mają być spełnione pod warunkiem, że ograniczenia znajdujące się wyżej w rankingu na to pozwalają. Opracowany model minimalizuje czas realizacji powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego spełniającego narzucone ograniczenia. Użyteczność opracowanej metody przedstawiono na przykładzie obliczeniowym. Z kolei Zou i Zhang [59] opracowali model programowania z ograniczeniami, znajdujący kompromis pomiędzy czasem i kosztem realizacji powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego, uwzględniający logikę miękką (możliwość zmiany kolejności realizacji procesów w sieci zależności). Działki robocze przedsięwzięcia powtarzalnego mogą być zajmowane przez brygady w celu

realizacji zadań w sposób szeregowy, równoległy lub mieszany. Praktyczność i efektywność zaproponowanego podejścia zostały zweryfikowane przez zastosowanie go w przykładzie. Uzyskane wyniki pokazują, że opracowane podejście może zapewnić większą elastyczność w ustalaniu terminów realizacji procesów, pozwalającą na redukcję czasu realizacji przedsięwzięcia. Tomczak i Jaśkowski [47], stosując programowanie mieszane całkowitoliczbowe liniowe, opracowali deterministyczny model matematyczny przedsięwzięcia powtarzalnego, minimalizujący przestoje w pracy brygad generalnego wykonawcy przy ustalonym dyrektywnie czasie i koszcie robót zleconych podwykonawcom, uwzględniając ograniczenia w dostępności brygad generalnego wykonawcy angażowanych do różnych robót. Jak wykazano w przykładzie, przez zastosowanie opracowanej metody możliwe stały się znaczne poprawienie stopnia harmonizacji pracy zasobów, co wyraża się w redukcji liczby dni przerw w pracy brygad generalnego wykonawcy oraz dotrzymaniu założonego terminu oraz kosztu realizacji przedsięwzięcia powtarzalnego. Wydaje się, że dzięki swojej prostocie oraz opracowanemu modelowi matematycznego zagadnienia, pomysł ten może stać się powszechną praktyką poprawy organizacji pracy brygad na budowach wymagających realizacji procesów powtarzalnych. García-Nieves i inni [16] opracowali program uwzględniający ograniczenia czasowe i przestrzenne realizacji robót budowlanych. Wprowadzili oni do modelu matematycznego programowania liniowego: relacje na poziomie podprocesów, założenie ciągłości pracy brygad i realizacji robót, różne warianty brygad i pracę zmianową, różne tryby wykonania procesów i przyspieszania ich realizacji. Autorzy dostarczyli również szczegółowych wskazówek, które pozwolą praktykom budować modele optymalizacyjne harmonogramowania, uwzględniające charakterystyczne ograniczenia danego powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego.

Matematyczne metody dokładne zapewniają znalezienie optimum globalnego rozwiązywanego zagadnienia, generują jednak znaczny koszt obliczeniowy. Z tego względu stosuje się podejścia heurystyczne, które redukują czas obliczeń, jednak znajdują jedynie rozwiązania suboptymalne i nie gwarantują odnalezienia optimum globalnego. Przykładowo, Zolfaghar Dolabi i inni [58] wprowadzili podejście nazywane *Heuristic Line-of-Balance* (HLOB), które wykorzystuje cztery zasady heurystyczne oraz odpowiednią ich kombinację. HLOB jest szybkim i użytecznym narzędziem do harmonogramowania małych i średnich powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, a do wielkoskalowych przedsięwzięć zalecane jest użycie rozwinięcia metody HLOB, czyli *Search-Based Heuristic Line-of-Balance* (SHLOB). W procesie weryfikacji opracowanych metod heurystycznych zastosowano rozwiązania dokładne modeli programowania nieliniowego całkowitoliczbowego (MINLP). Okazało się, że proponowane podejścia heurystyczne zapewniają dostateczną jakość rezultatu przy jednoczesnym znacznym ograniczeniu kosztu obliczeniowego (w porównaniu do dokładnego podejścia optymalizacyjnego MINLP). W celu zwiększenia wydajności zatrudnionych brygad Altuwaim i El-Rayes [3] opracowali

metodę harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, pozwalającą na przerywanie realizacji procesów drugorzędnych. W celu znajdowania suboptymalnych rozwiązań opracowanego modelu wprowadzili algorytm heurystyczny, składający się z czterech etapów: fazy wczesnego harmonogramowania, fazy poprawy ciągłości pracy, fazy zapewniania ciągłości pracy oraz fazy oceny wydajności pracy. Opisane podejście pozwala menadżerom budowy na efektywne generowanie szerokiego zakresu harmonogramów powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych o zredukowanym czasie trwania oraz ich analizę pod względem całkowitego kosztu realizacji.

Dynamiczny rozwój technik komputerowych w ostatnich latach spopularyzował wykorzystanie algorytmów metaheurystycznych, które mogą przezwyciężyć ograniczenia algorytmów dokładnych i heurystycznych: radzą sobie nawet ze złożonymi wielkoskalowymi problemami oraz umożliwiają uwzględnienie zależności nieliniowych czy wielu funkcji celu [52]. Niewątpliwie najpopularniejszym podejściem metaheurystycznym do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych jest zastosowanie algorytmu genetycznego. Taki algorytm został użyty m.in. w pracy [6] do znajdowania suboptymalnych rozwiązań modelu minimalizującego jednocześnie czas i koszt realizacji przedsięwzięcia oraz koszt i czas trwania przerw w pracy. W pracy tej wprowadzono pojęcie uwalniania zapasu czasu, które wyraża wpływ przesunięcia najwcześniejszego możliwego terminu zakończenia procesu na przerwy w pracy brygad. Dzięki jego zastosowaniu zminimalizowano przerwy w pracy brygad, bez zmiany dyrektywnego terminu realizacji przedsięwzięcia. Algorytm genetyczny został również wykorzystany przez Wang i innych [56] do optymalizacji wielokryterialnej (czas, koszt i jakość) harmonogramów powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Użyli oni algorytmu NDSGH (ang. *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) do analizy wpływu liczby godzin pracy na dobę i liczby dni roboczych na zmianę na wcześniej wspomniane kryteria optymalizacji. Autorzy rozwiązyali też mały przykład, składający się z 20 procesów. Z kolei Eid i inni [15] wykorzystali zarówno algorytm genetyczny, jak i przeszukiwanie zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto w celu minimalizacji czasu i kosztu realizacji przedsięwzięcia, łącznych przerw oraz opóźnień w dostawach. Ich podejście generuje całe zestawy proponowanych do wykorzystania przez zarządców budów harmonogramów. Wykazano także przewagę opracowanego narzędzia nad dwoma znanymi z literatury podejściami do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych.

Oczywiście wielu autorów sięgało po inne algorytmy metaheurystyczne. Jednym z ciekawszych algorytmów, użytych do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, jest użyty w pracy [32] algorytm wielorybi (ang. *Whale Optimization Algorithm*), który naśladuje stadne zachowania humpbacków i jest inspirowany przez ich polowanie za pomocą bąbelków (w celu zdobycia pożywienia humpaki nurkują głęboko pod ławicami ryb i używają pęcherzyków powietrza,

wydmuchiwanych z ich otworów w ciebie, aby ogłuszyć i uwięzić ryby bliżej powierzchni). Autorzy wykorzystali ten algorytm do poszukiwania kompromisu pomiędzy czasem, kosztem i jakością realizacji robót budowlanych w powtarzalnych przedsięwzięciach budowlanych, z uwzględnieniem bardziej złożonych zależności technologicznych między procesami, możliwością zatrudnienia różnych brygad do ich realizacji oraz logiką miękką. W celu określenia użyteczności wyniki uzyskane za pomocą algorytmu wielorybiego porównano z rezultatami osiągniętymi przez cztery inne algorytmy: NSGA-II, PSO (algorytm optymalizacji rojem cząstek), algorytm pszczeł i ewolucji różnicowej. Dla rozpatrywanego w artykule modelu wielokryterialnego algorytm wielorybi osiągnął lepsze wyniki od porównywanych algorytmów pod względem rozproszenia, dokładności oraz jakości uzyskanych wyników. Z kolei do znajdowania kompromisu jedynie pomiędzy czasem i kosztem użyto adaptacyjnego algorytmu wielokryterialnego przeszukiwania organizmów symbiotycznych (ang. *Adaptive Multiple Objective Symbiotic Organisms Search Algorithm*, AMOSOS) [53]. W proponowanym algorytmie zmodyfikowano fazę mutualizmu względem pierwotnego algorytmu w celu zrównoważenia fazy eksploatacji i eksploracji. Opracowane podejście umożliwia zastosowanie w harmonogramowaniach powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych różnorodnych funkcji sprawności (liniowych, nieliniowych czy osobliwości) i ogólnych zależności (relacji dwupunktowych czy pseudoliniowych). Wykazano, że proponowany algorytm AMOSOS jest porównywalny pod względem czasu obliczeń i łatwości obsługi do tradycyjnego podejścia, polegającego na budowie modelu programowania liniowego, przy jednoczesnym braku ograniczeń co do liczby zmiennych, rodzaju celu czy możliwości wprowadzania nieliniowych funkcji wydajności brygad. Natomiast Podolski i Sroka [34] zastosowali algorytm symulowanego wyżarzania do minimalizacji kosztów realizacji robót w powtarzalnych przedsięwzięciach budowlanych. Na ogólny koszt realizacji przedsięwzięcia składały się koszty pośrednie, bezpośrednie, kar za przekroczenie terminów umownych oraz przerw w pracy brygad. Autorzy przedstawili również weryfikację rezultatów uzyskiwanych przez użyty algorytm, wykazując jego wysoką efektywność.

Pomimo bogatej literatury wciąż wiele systemów wspomagających harmonogramowanie powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych nie uwzględnia wielu aspektów występujących w rzeczywistych warunkach realizacyjnych (procesy niepowtarzalne lub realizowane tylko na części działek roboczych, różnorytmiczność brygad, możliwość zmiany kolejności realizacji działek roboczych, wielozadaniowość brygad, różne preferencje kierownictwa budów, dążenie do optymalizacji harmonogramu pod względem wielu kryteriów itd.) bądź uwzględnia je wybiórczo. W praktyce jednak kierownicy budów stoją przed problemem kompleksowego zarządzania realizacją robót budowlanych i takiego narzędzia potrzebują i oczekują. W odpowiedzi na zauważone braki w niniejszym rozdziale zaprezentowano opracowany kompleksowy system wspomagania harmonogramowania powtarzalnych

przedsięwzięć budowlanych, który można dostosować elastycznie do preferencji kierownictwa budowy i zastanych warunków realizacyjnych powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego. Opracowany system uwzględnia preferencje kierownictwa budowy, różnorytmiczność brygad, procesy niepowtarzalne lub realizowane tylko na części działek roboczych, a także dobór optymalnej kolejności obiektów budowlanych. Dąży się w nim również do zapewnienia ciągłości pracy brygad roboczych – przerwy w ich pracy generują problemy organizacyjne, obniżają ich wydajność oraz negatywnie wpływają na morale pracowników.

Do znalezienia suboptymalnego rozwiązania sformułowanego problemu opracowano algorytm optymalizacji rojem cząstek. Jest to dobrze znany z literatury algorytm, jednak do tej pory był niezwykle rzadko wykorzystywany do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Autor niniejszego rozdziału znalazł zaledwie jedną pracę, w której opracowano dedykowany algorytm PSO do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych [23]. W pracy tej jednak decydenci nie mają możliwości uwzględnienia swoich preferencji – otrzymują gotowe rozwiązanie, które, mimo że jest stosunkowo dobre (suboptymalne), z różnych względów może im nie odpowiadać. W niniejszej pracy podjęto próbę opracowania algorytmu optymalizacji rojem cząstek, harmonizującego wykonanie procesów wieloobektowych przedsięwzięć budowlanych. W algorytmie tym wprowadzono parametr wszczynający zamieszki (ang. *Riot Factor*), będący kompilacją istniejących w literaturze sposobów zapobiegania stagnacji rozwiązania. Do weryfikacji poprawności otrzymywanego rozwiązania zastosowano autorską pięcioetapową procedurę.

W rozdziale przedstawiono metodę harmonizacji wykonania procesów wieloobektowego przedsięwzięcia budowlanego, opracowaną w ramach pracy doktorskiej Michała Tomczaka [44], napisanej pod kierunkiem dr. hab. inż. Piotra Jaśkowskiego, prof. Politechniki Lubelskiej. Opisana metoda umożliwia zharmonizowanie pracy brygad podczas realizacji przedsięwzięć budowlanych o złożonej, hierarchicznej strukturze. Do znajdowania użytecznych rozwiązań założonego modelu wykorzystano algorytm optymalizacji rojem cząstek (ang. *Particle Swarm Optimization*).

Rozdział został uporządkowany w następujący sposób: w następnej części opisano model matematyczny rozważanego problemu, po czym przybliżono sposób jego rozwiązania – przedstawiono algorytm optymalizacji rojem cząstek. Kolejna część opisuje rozwiązanie przykładowego przedsięwzięcia budowlanego, a ostatnia zawiera podsumowanie i wnioski.

2.2. OPIS MODELU HARMONIZACJI REALIZACJI PROCESÓW WIELOOBIEKTOWEGO PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO

Rozpatrywane przedsięwzięcie budowlane ma strukturę hierarchiczną, składającą się z następujących poziomów:

- przedsięwzięcie budowlane,
- obiekty budowlane, które należą do zbioru $P = \{1, 2, \dots, p, \dots, o\}$,
- działki robocze wyróżnione w każdym obiekcie p ; zbiór działek dla obiektu $L_p = \{1, 2, \dots, l_p, \dots, m_p\}$ jest zatem podzbiorem działek dla całego przedsięwzięcia, a dla określonej permutacji obiektów można zapisać zbiór wszystkich działek jako $L = \{1, 2, \dots, m_1, \dots, m_1 + m_2, \dots, m\}$, gdzie $m = m_1 + m_2 + \dots + m_o$ jest liczbą wszystkich działek roboczych przedsięwzięcia,
- procesy budowlane, które należy wykonać na każdej działce roboczej, $j \in V = \{1, 2, \dots, n\}$.

Wybór procesów na działkach roboczych i relacje kolejnościowe pomiędzy nimi są modelowane za pomocą sieci dwupunktowej. Sieć ta jest reprezentowana przez graf skierowany:

$$G = \langle V, E \rangle \quad (2.1)$$

zawierający jedno zdarzenie początkowe i jedno końcowe. Węzłami są procesy należące do zbioru $E \subset V \times X$. Łuki grafu reprezentują technologiczne i organizacyjne relacje kolejnościowe typu koniec – początek.

Relacje kolejnościowe między procesami są zakodowane w postaci macierzy binarnej $[v_{ij}]$. Jeśli istnieje relacja kolejnościowa między procesem i a procesem j , a proces i jest bezpośrednim poprzednikiem procesu j ($i \prec j$), to $v_{ij} = 1$. W przeciwnym razie $v_{ij} = 0$. Macierz jednoznacznie określa konieczność zakończenia procesu $i \in V$, zanim będzie można rozpocząć wykonywanie procesu $j \in V$.

Jest mało prawdopodobne, że kolejność realizacji działek roboczych w obiekcie budowlanym jest dowolna. Zazwyczaj jest ona wymuszona przez konstrukcję obiektów lub warunki technologiczne i organizacyjne. Dlatego założono, że kolejność wykonywania działek roboczych jest informacją wejściową, którą powinien dostarczyć kierownik budowy. Działki robocze poszczególnych obiektów muszą być ponumerowane zgodnie z ich pozycją w przyjętym uporządkowaniu. Zatem zbiór jednostek, które należą do obiektu p , jest oznaczony jako $L_p = \{1, 2, \dots, l_p, \dots, m_p\}$.

Z drugiej strony, kolejność wznoszenia obiektów nie jest z góry określona – jest to jedna ze zmiennych decyzyjnych problemu harmonogramowania. Każda wykonalna kolejność obiektów jest permutacją c zbioru obiektów P . Zbiór wykonalnych permutacji zbioru jest oznaczony jako P_o . Położenie danego obiektu w permutacji oznaczono zmienną całkowitą c_p . Dla ułatwienia komputerowej realizacji metody stosuje się zmienne pomocnicze:

$$c'_p \in [0, |P|], \quad \forall p \in P \quad (2.2)$$

Zmienne c'_p , ułożone w porządku rosnącym, odpowiadają kolejności wykonywania obiektów p w permutacji $c - c_p$, którą można zapisać następująco:

$$c'_p < c'_q \Rightarrow c_p < c_q, \quad \forall p, q \in P \quad (2.3)$$

Ten sposób kodowania jest odwrotnością metody GVP (ang. *Great Value Priority*) [33].

Obiekty budowlane mogą różnić się wielkością, nakładem pracy, kosztachłonością lub innymi parametrami ważnymi dla decydenta. Dlatego planista może chcieć ustalić priorytety w celu ustalenia kolejności obiektów, uwzględniając wartości tych parametrów. Priorytety są wyrażone jako wagi g_p . Wagi można obliczyć według następującego wzoru:

$$g_p = \frac{A_p}{\sum_{p \in P} A_p}, \quad \forall p \in P \quad (2.4)$$

gdzie A_p stanowi parametr charakterystyczny obiektu p .

Charakterystyczną cechą budowy jest występowanie niezbędnych przerw w toku prac, związanych np. z dojrzewaniem betonu, zanim będzie można usunąć deskowanie. Taki nieunikniony czas oczekiwania, czyli opóźnienie, musi być uwzględniony w sieciach procesów oraz w analizie czasowej projektu. Opóźnienie może być modelowane jako proces niepochłaniający zasobów, który jednak utrzymuje działkę roboczą jako niedostępną dla kolejnych procesów „standardowych” (tych, które oznaczają rzeczywiste procesy budowlane i wykorzystują zasoby). W przeciwieństwie do procesów „standardowych” ich późniejsza realizacja na jednej działce roboczej nie wpływa na opóźnienie wykonywania robót na kolejnych. W proponowanym modelu zbiór opóźnień jest podzbiorem zbioru procesów $V^{tb} : V^{tb} \subset V$.

Wszystkie zasoby (brygady budowlane) dostępne do realizacji przedsięwzięcia należą do zbioru R . Brygady zdolne do wykonania określonego procesu $j \in V$ tworzą zbiór R_j gdzie $R_j \subset R$. Należy pamiętać, że brygady mogą być wielozadaniowe (zdolne do realizacji więcej niż jednego rodzaju procesu, ponieważ ich pracownicy mają więcej niż jedną specjalność zawodową), a zatem dana brygada może być elementem kilku zbiorów R_j . Kierownicy budów chętnie korzystają z wielozadaniowości, zwłaszcza w odniesieniu do brygad własnych generalnego wykonawcy przedsięwzięcia – często te same brygady są przydzielane do różnych prac. Oczywiście zmniejszenie puli zasobów przez wielozawodowość nie eliminuje ograniczeń w dostępności zasobów: jedna brygada może w tym samym czasie realizować jeden proces.

Jak wykazano w artykule [49], kierownicy budów uważają redukcję przestojów brygad za jeden z najważniejszych celów harmonogramowania. Jednakże,

w zależności od struktury zespołu projektowego oraz systemu realizacji budowy, kierownicy mogą być zainteresowani minimalizacją czasu przestojów tylko niektórych brygad (zazwyczaj są to brygady własne generalnego wykonawcy). Z tego względu w niniejszym modelu wyróżniono podzbiór $R^s : R^s \subset R$, obejmujący brygady, których czas bezczynności nie podlega minimalizacji.

Wielkość brygady (liczba jej pracowników) musi być dostosowana do dostępnego na działce frontu roboczego. Na ogół przyjmuje się, że na danej działce roboczej może być prowadzony jednocześnie tylko jeden proces (a więc na jednej działce roboczej może przebywać tylko jedna brygada). Jednak w praktycznych przypadkach kilka brygad, zatrudnionych do realizacji niepowiązanych ze sobą procesów, może zajmować tę samą działkę roboczą, nie przeszkadzając sobie nawzajem. Aby uwzględnić takie sytuacje w modelu, wyróżniono podzbiory procesów H_j , które mogą być wykonywane jednocześnie z procesem j .

Ze względu na efekt uczenia się oczekuje się wzrostu wydajności brygad, które powtarzają ten sam proces wielokrotnie na wielu działkach roboczych. Z tego powodu zdecydowano, że dany proces jest zasadny do przypisania tylko jednej brygadzie – a więc ta sama brygada ma wykonywać ten sam proces na wszystkich działkach roboczych przedsięwzięcia. Decyzja o przydziale brygady r do procesu j jest modelowana za pomocą zmiennych całkowitoliczbowych x_j , których wartości odpowiadają numerowi brygady realizującej proces j :

$$x_j = \lceil x'_j \rceil \quad (2.5)$$

Symbol $\lceil * \rceil$ oznacza zaokrąglenie do jedności w górę, a zmienna ciągła x'_j jest zdefiniowana w następujący sposób:

$$x'_j \in [0, |R_j|], \quad j \in V \quad (2.6)$$

Należy pamiętać, że numery brygad we wzorze (2.6) nie są zdefiniowane globalnie, lecz lokalnie, tzn. każdemu procesowi j przypisany jest unikalny i indywidualnie numerowany zestaw brygad $R_j \subset R$. Numeracja brygad zaczyna się od 1, a kończy na liczbie R_j (czyli na mocy zbioru R_j).

Oprócz zmiennych całkowitoliczbowych x_j w modelu zastosowano również zmienne binarne x_{jr} , zdefiniowane wzorem:

$$x_{jr} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli proces } j \in V \text{ jest wykonany przez brygadę } r \in R_j \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (2.7)$$

gdzie indeksy związane z brygadą są globalne.

Istnieje bezpośrednia zależność pomiędzy zmienną x_j i x_{jr} . Wprowadzenie dwóch zmiennych modelujących te same decyzje wynikało z wymogów programowania i prostoty działania systemu.

Relacje organizacyjne między procesami łączą te same procesy (powierzone do realizacji tej samej brygadzie), wykonywane na kolejnych działkach roboczych.

Mianowicie, dany proces może rozpocząć się na działce roboczej l tylko wtedy, gdy realizacja tego procesu została zakończona na działce poprzedniej k – zgodnie z ustaloną wcześniej kolejnością w obiekcie.

Model uwzględnia cztery rodzaje relacji kolejnościowych pomiędzy procesami. Wszystkie z nich mają charakter koniec – początek. Fakt ten jest istotny przy projektowaniu procedury określania terminów rozpoczęcia procesów. Dla każdego procesu $j \in V$ na każdej działce roboczej $l \in L$ terminy są modelowane jako nieujemne zmienne całkowite s_{jl} :

$$s_{jl} \geq 0, \quad \forall j \in V, \forall l \in L \quad (2.8)$$

Terminy rozpoczęcia definiowane są najpierw dla danego procesu j od działki nr 1 do działki roboczej l , a następnie dla kolejnego procesu od działki roboczej nr 1 do działki l .

Brygady mają swoje indywidualne cechy (liczebność pracowników, doświadczenie, a więc i wydajność; różną wydajność dla różnych procesów, jeśli brygady są wielozawodowe). Również działki robocze mogą różnić się wielkością. Co więcej, pracochłonność związana z poszczególnymi procesami może być nieproporcjonalna do wielkości działki roboczej. Ponieważ czasy trwania procesów są specyficzne dla każdej brygady i działki roboczej, ich oszacowania (będące kluczowymi danymi wejściowymi modelu) są oznaczane przez parametr t_{jlr} (czas trwania procesu j realizowanego przez brygadę $r \in R_j$ na działce l).

Czas realizacji procesu w harmonogramie D_{jl} zależy od wyboru realizującej go brygady, modelowanej przez zmienną x_{jr} :

$$D_{jl} = x_{jr} \cdot t_{jlr}, \quad \forall j \in V, \forall l \in L, \forall r \in R \quad (2.9)$$

Termin zakończenia f_{jl} wykonywania procesu $j \in V$ na działce roboczej $l \in L$ zależy od wartości zmiennych D_{jl} i s_{jl} .

Zazwyczaj czas zakończenia przedsięwzięcia budowlanego jest z góry określony, czy to przez umowę między generalnym wykonawcą a zleceniodawcą, czy przez instytucję finansującą, czy też przez samych wykonawców (w celu dopasowania portfela projektów). W opisywanym modelu termin ukończenia przedsięwzięcia T jest ograniczony – nie może przekroczyć terminu dyrektywnego.

W celu umożliwienia przeszukiwania przestrzeni rozwiązań i znalezienia satysfakcjonującego suboptymalnego rozwiązania, algorytm musi mieć możliwość ustawienia rozpoczęcia procesu na termin późniejszy niż najwcześniejszy możliwy. Ta cecha modelu opiera się na zastosowaniu dwóch zmiennych całkowitoliczbowych: y_p oraz z_p .

Pierwsza z nich y_p określa liczbę dni, o jaką należy opóźnić wykonanie pierwszego procesu wykonywanego na pierwszej działce roboczej obiektu p w stosunku do terminu jego najwcześniejszego możliwego rozpoczęcia. Należy ją wyliczyć dla każdego obiektu p , poza tym, który w danej permutacji c jest pierwszy. Ze względów

technicznych w modelu zastosowano pomocniczą zmienną ciągłą y'_p , która przyjmuje wartości z przedziału $[0, Y_p]$, gdzie Y_p jest horyzontem czasowym dla y'_p i y_p :

$$\lceil y'_p \rceil = y_p, \quad \forall p \in P \quad (2.10)$$

Zmienna całkowita z_j odpowiada liczbie dni, o które należy opóźnić wykonanie procesów pierwszego obiektu (względem najwcześniejszego możliwego terminu ich rozpoczęcia). Jest ona wyznaczana dla każdego procesu w sieci zależności z wyjątkiem pierwszego. Podobnie jak w przypadku poprzedniej zmiennej model wykorzystuje pomocniczą zmienną ciągłą z'_j , która przyjmuje wartości z przedziału $[0, Z_j]$, gdzie Z_j jest horyzontem czasowym dla z'_j i z_j :

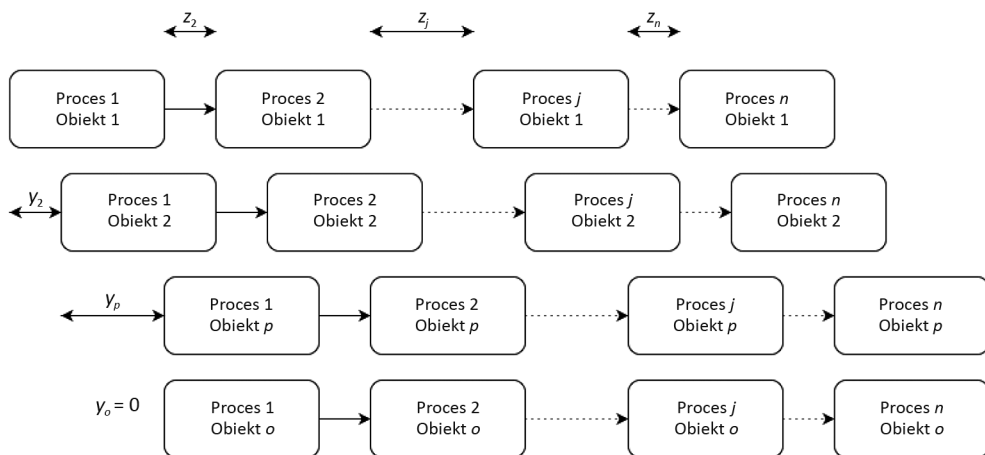
$$\lceil z'_j \rceil = z_j, \quad \forall j \in V \quad (2.11)$$

Należy zwrócić uwagę, że y_1 i z_1 (odpowiadające pierwszej działce roboczej i pierwszemu procesowi) nie są określone ze względu na następujący warunek brzegowy:

$$s_{11} = 0 \quad (2.12)$$

co oznacza, że pierwszy proces do wykonania na pierwszej działce roboczej musi rozpocząć się w terminie 0.

Idea zmiennych y_p i z_j została przedstawiona na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Zastosowanie zmiennych y_p i z_j (pominięto relacje organizacyjne i procesy na działkach roboczych poszczególnych obiektów). Źródło: [44, 50]

Przyjęte kryteria optymalizacji są sprzeczne. Jeśli zostaną zastosowane oddzielnie, to prawdopodobnie dadzą różne rozwiązania, bardzo odległe od siebie w przestrzeni rozwiązań. Na przykład harmonogram zoptymalizowany wyłącznie pod kątem najmniejszego czasu przestoju w pracy brygad może wyznaczyć długi czas realizacji przedsięwzięcia, co będzie skutkowało przekroczeniem terminu dyrektyw-

nego jego zakończenia. Dlatego rozsądne jest rozważenie wszystkich kryteriów jednocześnie i użycie narzędzi optymalizacji wielokryterialnej do znalezienia rozwiązania kompromisowego.

Poniżej przedstawiono matematyczne sformułowanie problemu harmonizacji realizacji procesów wieloobiekowego przedsięwzięcia budowlanego, zaczynając od określenia trzech funkcji celu:

- Minimalizacja czasu trwania projektu, co jest równoważne minimalizacji terminu zakończenia ostatniego procesu n na ostatniej działce roboczej m w ostatnim obiekcie budowlanym (przy czym kolejność obiektów, określona przez permutację c , jest jedną ze zmiennych modelu):

$$\min C_1 = f_{nm} \quad (2.13)$$

gdzie: C_1 – pierwsza funkcja celu.

- Minimalizacja czasu przerw w pracy brygad nienależących do zbioru R^s , co jest równoważne minimalizacji sumy różnic pomiędzy okresem przebywania brygad na budowie (zaczynającym się w momencie rozpoczęcia przez brygadę realizacji pierwszego procesu i kończącym się w momencie zakończenia realizacji ostatniego procesu powierzonego danej brygadzie) a czasem wykorzystanym na realizację procesów (suma czasów wykonania wszystkich procesów powierzonych brygadzie):

$$\min C_2 = \sum_{r \in R / R^s} (f_{jm} \cdot x_{jr} - s_{j1} \cdot x_{jr}) - \sum_{l \in L} \sum_{j \in V / V^{tb}} D_{jl} \quad (2.14)$$

$$\forall (f_{jm} \cdot x_{jr}) : f_{jm} \cdot x_{jr} \geq f_{km} \cdot x_{kr} \wedge k, j \in V / V^{tb}$$

$$\forall (s_{g1} \cdot x_{gr}) : s_{g1} \cdot x_{gr} \leq s_{h1} \cdot x_{hr} \wedge x_{gr} \neq 0 \wedge g, h \in V / V^{tb}$$

gdzie: C_2 – druga funkcja celu.

- Minimalizacja ważonej sumy czasów realizacji poszczególnych obiektów (wagi reprezentują względne priorytety przypisane obiektom budowlanym), co jest równoważne minimalizacji ważonej sumy różnic pomiędzy terminami zakończenia i rozpoczęcia wykonywania obiektów:

$$C_3 = \sum_{p \in P} g_p \cdot (f_{nm_p} - s_{1l_p}) \quad (2.15)$$

gdzie: C_3 – trzecia funkcja celu.

Ograniczenia modelu są następujące:

- do każdego procesu może być przypisana tylko jedna brygada i każdy proces musi zostać zrealizowany:

$$\sum_{r \in R_j} x_{jr} = 1, \quad \forall j \in V \quad (2.16)$$

- początek realizacji przedsięwzięcia jest równy rozpoczęciu wykonywania pierwszego procesu na pierwszej działce pierwszego obiektu (w permutacji c) w chwili 0:

$$s_{11} = 0 \quad (2.17)$$

- czas realizacji przedsięwzięcia nie może przekroczyć ustalonego dyrektywnego terminu zakończenia przedsięwzięcia:

$$f_{nm} \leq T \quad (2.18)$$

- procesy muszą być wykonywane w porządku ustalonym przez relacje kolejnościowe pomiędzy procesami na działce roboczej (relacje reprezentowane są przez łuki grafu skierowanego modelu sieciowego):

$$f_{il} \cdot v_{ij} \leq s_{jl} \cdot v_{ij}, \quad \forall i, j \in V, \forall l \in L \quad (2.19)$$

- procesy muszą być realizowane w kolejności wynikającej z relacji pomiędzy tymi samymi typami procesów, realizowanych na kolejnych działkach roboczych danego obiektu:

$$f_{jl_p} \leq s_{jl_p}, \quad \forall j \in V / V^{tb}, \forall l \in L_p, \forall p: p \in P \quad (2.20)$$

- procesy muszą być wykonywane w kolejności wynikającej z relacji pomiędzy tymi samymi typami procesów, wykonywanych na kolejnych obiektach, dla każdej ich permutacji:

$$\begin{aligned} & \forall j \in V / V^{tb}, \forall m_{c_p} : c_p \neq m \wedge m_{c_p} \in L_{c_p} \\ & f_{jm_{c_p}} \leq s_{jl_{c_{p+1}}}, \quad \forall l_{c_{p+1}} : l_{c_{p+1}} = 1 \wedge l_{c_{p+1}} \in L_{c_{p+1}} \\ & \forall p, p+1: p, p+1 \in P \wedge p \neq o, \forall c \in P_o \end{aligned} \quad (2.21)$$

- procesy muszą być wykonywane w kolejności wynikającej z zależności pomiędzy procesami na tej samej działce roboczej, które wynikają z możliwości prowadzenia tylko jednego procesu na jednej działce roboczej w tym samym czasie (chyba że procesy należą do zbiorów procesów dopuszczonych do jednoczesnej realizacji H_j):

$$\begin{aligned} & f_{il} \leq s_{jl}, \\ & f_{jl} \leq s_{kl}, \end{aligned} \quad \forall i, j, k \in V / H_j, l \in L \quad (2.22)$$

- procesy muszą być realizowane w kolejności wynikającej z zależności pomiędzy procesami wykonywanymi przez tę samą brygadę (ograniczenie dostępności zasobów):

$$\begin{aligned} & (s_{il} + D_{il}) \cdot x_{ir} \leq s_{jl} \cdot x_{jr} \vee (s_{jl} + D_{jl}) \cdot x_{jr} \leq s_{il} \cdot x_{ir} \\ & \forall r: r \in R_i \wedge r \in R_j, \forall i, j \in V, l \in L \end{aligned} \quad (2.23)$$

Problem jest niezwykle złożony: przestrzeń poszukiwań jest bardzo duża, występują liczne ograniczenia, a liczba rozwiązań dopuszczalnych jest niewielka. Biorąc pod uwagę skalę rzeczywistych przypadków do rozwiązania (liczba działek i procesów w przedsięwzięciu budowlanym, liczba zasobów do uwzględnienia), problem jest praktycznie nierozwiązywalny w racjonalnym czasie za pomocą algorytmów dokładnych, takich jak metoda podziału i ograniczeń. Z tego względu zdecydowano się na zastosowanie algorytmu optymalizacji rojem cząstek, należącego do klasy algorytmów metaheurystycznych.

2.3. SPOSÓB ROZWIĄZANIA ZDEFINIOWANEGO PROBLEMU

Kryteria optymalizacji wyrażone równaniami (2.13)–(2.15) są sprzeczne: nie jest możliwe dokonanie poprawy jakości harmonogramu według jednego z nich bez pogorszenia go pod względem jednego lub obu pozostałych kryteriów – chyba że naruszone zostaną ograniczenia (2.16)–(2.23). Ten rodzaj optymalizacji wielokryterialnej nazywany jest problemem znajdowania rozwiązania kompromisowego. Rozwiązanie to należy znaleźć wśród rozwiązań dopuszczalnych, czyli takich, które spełniają wszystkie zadane ograniczenia i których wartości kryteriów mieszczą się w przedziałach akceptowanych przez decydenta [31].

Ważnym podzbiorem rozwiązań dopuszczalnych jest podzbiór rozwiązań nie-zdominowanych (paretooptimalnych), czyli rozwiązań, których wartości żadnej funkcji celu nie można poprawić bez jednoczesnego pogorszenia wartości jednej z pozostałych funkcji celu. Jednym z często stosowanych sposobów rozwiązywania wielokryterialnych problemów optymalizacyjnych jest agregacja funkcji celu do jednego metakryterium. Przykładem jest metoda sumy ważonej, gdzie celem jest minimalizacja lub maksymalizacja sumy wartości kryteriów pomnożonych przez zdefiniowane przez użytkownika wagi, wyrażające względną ważność kryteriów. Jedynym ograniczeniem tego podejścia jest to, że może być ono stosowane tylko dla wypukłych problemów optymalizacyjnych.

Jedną z metod opartych na sprowadzeniu problemu do problemu jednokryterialnego i mających zastosowanie do rozwiązywania problemów zarówno z wypukłymi, jak i z wklęsłymi zbiorami rozwiązań dopuszczalnych, jest algorytm Chebysheva z wagami. Zastępcza funkcja celu wyraża wielkość straty wynikającej z różnic pomiędzy poziomami realizacji celów w wygenerowanych rozwiązaniach a poziomami aspiracji ustalonymi przez decydenta. Funkcję tę (metakryterium) dla rozważanego trójkryterialnego problemu optymalizacyjnego można sformułować następująco:

$$\min z_z = w_1 \cdot \left(\frac{C_1 - C_1^o}{C_1^o} \right)^z + w_2 \cdot \left(\frac{C_2 - C_2^o}{C_2^o} \right)^z + w_3 \cdot \left(\frac{C_3 - C_3^o}{C_3^o} \right)^z$$

$$w_1, w_2, w_3 \geq 0$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1$$
(2.24)

gdzie: w_1 oznacza wagę pierwszego pierwotnego kryterium czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego, w_2 jest wagą kryterium przerw w pracy brygad oraz w_3 reprezentuje wagę kryterium czasu realizacji obiektów budowlanych. C_1^o , C_2^o , C_3^o są odpowiednio poziomami aspiracji dla poszczególnych kryteriów. Ich wartości są ustalane w trakcie optymalizacji jednokryterialnej ze wszystkimi ograniczeniami zdefiniowanymi dla kompletnego problemu wielokryterialnego.

Z rodziny funkcji tylko ta opisana równaniem (2.25) może dać wszystkie rozwiązania niezdominowane, niezależnie od postaci ograniczeń problemu [19, 20, 26]:

$$\min z_\infty = \max \left\{ w_1 \cdot \frac{C_1 - C_1^o}{C_1^o}, w_2 \cdot \frac{C_2 - C_2^o}{C_2^o}, w_3 \cdot \frac{C_3 - C_3^o}{C_3^o} \right\} \quad (2.25)$$

Ponieważ funkcja (2.25) może generować również rozwiązania niezdominowane, jako funkcję celu (metakryterium) postanowiono wykorzystać następującą funkcję:

$$\min z_{\infty, \rho} = z_\infty + \rho \cdot \left(\frac{C_1 - C_1^o}{C_1^o} + \frac{C_2 - C_2^o}{C_2^o} + \frac{C_3 - C_3^o}{C_3^o} \right) \quad (2.26)$$

gdzie: ρ reprezentuje wystarczająco małą liczbę. Funkcja (2.26) zawsze generuje rozwiązania niezdominowane, ale niektóre rozwiązania paretooptymalne mogą zostać pominięte [19, 20, 26].

Wagi użyte we wzorach (2.22)–(2.24) wyrażają preferencje decydenta dotyczące ważności celów optymalizacji. Określenie ich wartości ma ogromne znaczenie, ponieważ silnie wpływają na generowane rozwiązania. Podstawową trudnością w określeniu wag kryteriów jest konieczność identyfikacji preferencji decydenta. Decydowanie *a priori* o ich wartościach jest trudne, bo nie można przewidzieć wpływu wag na rozwiązania przed obliczeniem rozwiązania i sprawdzeniem jego rzeczywistej zgodności z oczekiwaniami decydenta. Z tego powodu często stosuje się metody *a posteriori*, które pozwalają określić wagi na podstawie oceny wygenerowanych rozwiązań. Alternatywnie stosuje się metody grupowego wspomagania decyzji.

Z tego względu proponowany system oferuje trzy metody wyznaczania wartości wag, umożliwiające decydentowi (rozumianemu jako pojedyncza osoba lub grupa osób) wyrażenie swoich preferencji w określonym środowisku decyzyjnym:

1. Pierwsza z nich, najprostsza i najszybsza, ale najbardziej subiektywna, polega na ustaleniu wag przez podanie ich wartości przez decydenta. Niestety, arbitralnie ustalone wagi mogą dać niezadowolające rozwiązania, zwłaszcza jeśli decydent nie ma doświadczenia w optymalizacji wielokryterialnej.

2. Druga metoda oparta jest na autorskiej metodzie grupowego wspomaganie decyzji. Założono, że ze względu na złożoność rozważanego problemu zasadne może być wykorzystanie doświadczenia i wiedzy wielu ekspertów. Choć decydenci mogą różnić się w poglądach na temat względnej ważności poszczególnych kryteriów, działają jako zespół (rada ekspertów), od którego oczekuje się osiągnięcia konsensusu. Z pomocą w takich przypadkach przychodzą dedykowane narzędzia – wielokryterialne metody wspomaganie decyzji grupowych. Jedną z nich jest metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych (ang. *Analytic Hierarchy Process*, AHP). Autorska metoda grupowego wspomaganie decyzji opiera się na porównaniach parami względnej ważności kryteriów, dostarczonych przez pewną liczbę ekspertów. Zagregowane opinie są modelowane jako trójkątne interwałowe zbiory rozmyte typu 2. Metoda stanowi modyfikację metody AHP w ujęciu Michailowa [29, 30]. Szczegółowy opis proponowanej metody można znaleźć w [45, 51].
3. Trzecim sposobem określenia wag kryteriów oceny harmonogramu jest zastosowanie interaktywnej metody wspomaganie decyzji. Przy podejściu interaktywnym globalna funkcja preferencji decydenta nigdy nie jest szczegółowo znana. Zakłada się, że decydent jest w stanie dostarczyć jedynie informacji o charakterze lokalnym, np. ocenić jeden wariant rozwiązania. Takie podejście może być preferowane przez decydentów wysokiego szczebla, którzy nie chcą ujawniać swoich globalnych preferencji w obawie przed trywializacją swoich kwalifikacji i doświadczenia. Dlatego informacje o preferencjach decydenta są pozyskiwane w sposób interaktywny: faza dialogu z decydentem oraz faza obliczeniowa są powtarzane wielokrotnie aż do uzyskania rozwiązania akceptowalnego przez decydentą [54]. W opracowanym systemie wykorzystano metodę interaktywną, wzorowaną na metodzie przeglądu wiązki światła (ang. *Light Beam Search*) [24, 25]. Szczegółowy opis proponowanego podejścia można znaleźć w [44, 50].

W optymalizacji wielokryterialnej wagi kryteriów mają ogromny wpływ na wybór ostatecznego rozwiązania (w tym przypadku harmonogramu budowy, który ma być zrealizowany na placu budowy). Praktyczna metoda harmonogramowania to taka, która jest w stanie uwzględnić konkretne preferencje decydenta i która jasno określa wpływ tych preferencji na harmonogram. Dlatego w proponowanym systemie umożliwiono zastosowanie trzech metod ustalania wag kryteriów oceny harmonogramu budowy. To, którą wybrać, zależy od środowiska decyzyjnego, poziomu doświadczenia decydenta oraz oczekiwań i preferencji w procesie decyzyjnym.

Tworzenie harmonogramu jest najbardziej złożonym etapem proponowanej procedury. Wynika to z wielkości problemu i dużej liczby ograniczeń, co implikuje konieczność zastosowania zaawansowanych metod obliczeniowych. Zdecydowano się na wykorzystanie algorytmu metaheurystycznego o stosunkowo niewielkiej liczbie parametrów – algorytmu optymalizacji roju cząstek, uznając, że łatwiej

będzie użytkownikowi określić mniejszą liczbę parametrów algorytmu dla i tak bardzo złożonego problemu.

Algorytmy rojowe inspirowane są wzorcami zachowań zwierząt, które żyją i współdziałają w dużych grupach. Algorytm optymalizacji roju cząstek wywodzi się z obserwacji stad ptaków, poruszających się w celu zmiany miejsca pobytu, żerowiska lub ucieczki przed drapieżnikiem. W tym algorytmie pojedynczy ptak jest symulowany cząstką, odpowiadającą rozwiązaniu problemu. Cząstki poruszają się w wielowymiarowej przestrzeni rozwiązań w kierunkach wyznaczonych przez cząstki znajdujące się w ich sąsiedztwie. W procesie optymalizacji pozycja $\tilde{x}_i$ cząstki $\tilde{i}$ jest korygowana przez jej stochastyczną prędkość $\tilde{v}_i$, która zależy od jej najlepszej poprzedniej pozycji oraz najlepszej pozycji jej sąsiadów [40]. Podejście to można wyrazić za pomocą następujących zależności [28]:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{ij}(\tilde{k}+1) &= \tilde{v}_{ij}(\tilde{k}) + \tilde{\phi}_{1j}(\tilde{k})[\tilde{p}_{ij}(\tilde{k}) - \tilde{x}_{ij}(\tilde{k})] + \tilde{\phi}_{2j}(\tilde{k})[\tilde{p}_{ij}(\tilde{k}) - \tilde{x}_{ij}(\tilde{k})] \\ \forall \tilde{i} &= 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n} \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\tilde{x}_{ij}(\tilde{k}+1) = \tilde{x}_{ij}(\tilde{k}) + \tilde{v}_{ij}(\tilde{k}+1), \quad \forall \tilde{i} = 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n} \quad (2.28)$$

$$\tilde{\phi}_{1j}(\tilde{k}) = \tilde{c}_1 \tilde{r}_{1j}(\tilde{k}), \quad \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n} \quad (2.29)$$

$$\tilde{\phi}_{2j}(\tilde{k}) = \tilde{c}_2 \tilde{r}_{2j}(\tilde{k}), \quad \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n} \quad (2.30)$$

gdzie: $\tilde{m}$ jest liczbą cząstek w roju, $\tilde{n}$ jest liczbą zmiennych (rozmiar problemu), $\tilde{k}$ jest krokiem iteracji, $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$ są współczynnikami przyspieszenia, $\tilde{r}_{1j}, \tilde{r}_{2j}$ są wartościami losowymi z zakresu $[0, 1]$ dla kierunku (zmiennej) $\tilde{j}$, $\tilde{x}_{ij}(\tilde{k})$ jest położeniem cząstki $\tilde{i}$ w kierunku $\tilde{j}$ w iteracji $\tilde{k}$, $\tilde{v}_{ij}(\tilde{k})$ jest prędkością cząstki $\tilde{i}$ na kierunku $\tilde{j}$ w iteracji $\tilde{k}$. Element $\tilde{\phi}_{1j}(\tilde{k})$ we wzorze (2.27) reprezentuje odległość cząstki $\tilde{i}$ od jej najlepszego dotychczas położenia, a $\tilde{\phi}_{2j}(\tilde{k})$ jest odległością cząstki od lidera roju. Aktualnie najlepsza pozycja cząstki $\tilde{i}$ w kierunku $\tilde{j}$ w iteracji $\tilde{k}$ jest reprezentowana przez $\tilde{p}_{ij}(\tilde{k})$ i $\tilde{q}_{ij}(\tilde{k})$ jest aktualnie najlepszą lokalizacją znaną w sąsiedztwie cząstki $\tilde{i}$ w kierunku $\tilde{j}$ w iteracji $\tilde{k}$.

Warto zauważyć, że liczba kierunków hiperprzestrzeni poszukiwań jest równa liczbie niewiadomych. W analizowanym problemie występują cztery grupy zmiennych modelu: x_j modeluje decyzję o przydzieleniu brygady r do procesu j ; z_j reprezentuje liczbę dni, o jaką należy opóźnić rozpoczęcie procesu w pierwszym obiekcie względem najwcześniejszego możliwego rozpoczęcia procesu; c_p jest położeniem obiektu p w kolejności obiektów c (permutacja); y_p jest liczbą dni, o jaką należy opóźnić pierwszy proces obiektu p w stosunku do terminu najwcześniejszego jego rozpoczęcia. Razem określają one wektor położenia cząstki $\tilde{i}$. Jest on zakodowany w następujący sposób:

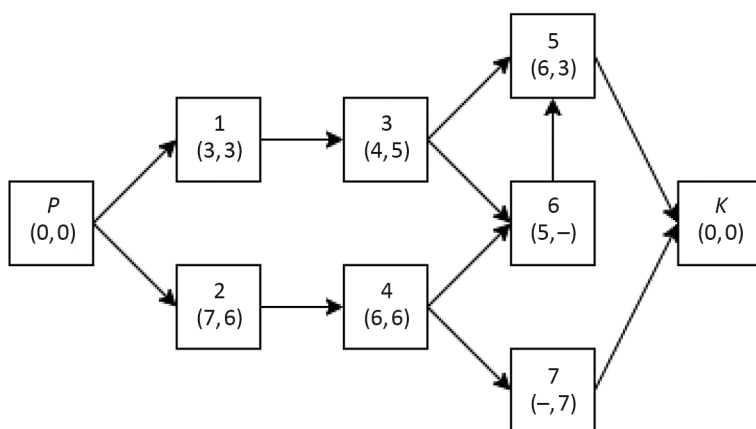
$$\hat{\tilde{x}}_i(\hat{k}) = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_p & \dots & c_m & x_1 & x_2 & \dots \\ \dots & x_v & \dots & x_n & y_1 & y_2 & \dots & y_v & \dots \\ \dots & y_m & z_1 & z_2 & \dots & z_v & \dots & z_n \end{bmatrix}^T \quad (2.31)$$

Sposób kodowania wektora położenia cząstki $\tilde{x}_i(\tilde{k})$ implikuje to, że zakresy zmienności elementów wektora różnią się w zależności od kierunku poszukiwań $\tilde{j}$. Wynoszą one od 0 do $|P|$, od 0 do $|R_j|$, od 0 do $|Y_p|$ oraz od 0 do $|Z_j|$.

Po otrzymaniu wyników zarządzający budową powinien zdecydować, czy są one satysfakcjonujące z jego punktu widzenia. Jeśli tak nie jest, należy powtórzyć analizę po modyfikacji wag kryteriów. Jeśli wynik satysfakcjonuje decydenta, harmonogram powinien zostać skierowany do realizacji.

2.4. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA OPRACOWANEJ METODY

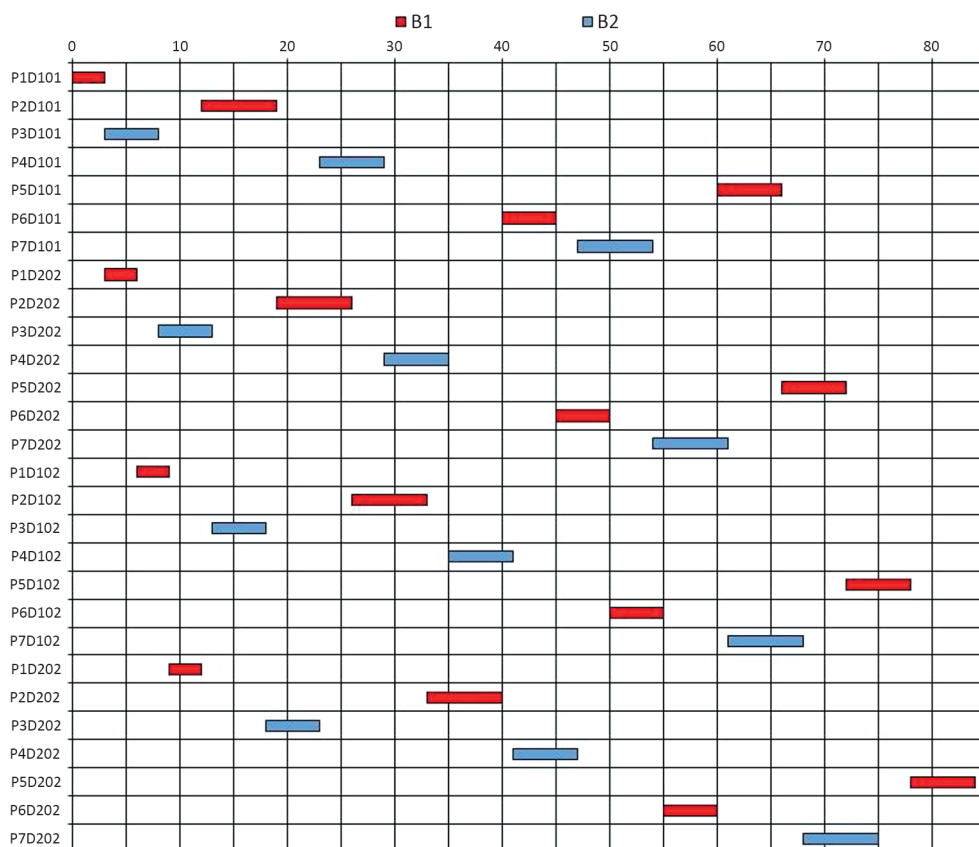
W celu zobrazowania sposobu działania opracowanego systemu oraz przedstawienia jego zakresu działania rozwiązano zadanie projektowania realizacji przykładowego przedsięwzięcia budowlanego. Przedsięwzięcie składa się z dwóch budynków będących obiektami budowlanymi o jednakowej istotności (te same wartości priorytetów ich realizacji). Każdy z nich składa się z dwóch działek roboczych. Na każdej działce roboczej do wykonania jest siedem rzeczywistych procesów. Dodatkowo do sieci zależności wprowadzono dwa procesy nierzeczywiste: początek oraz zakończenie robót budowlanych. Zależności kolejnościowe pomiędzy proce-



Rys. 2.2. Model sieciowy robót budowlanych wykonywanych na każdej działce roboczej przykładowego przedsięwzięcia budowlanego (w nawiasach podano czasy realizacji poszczególnych procesów budowlanych, odpowiednio przez brygadę B1 i brygadę B2, wyrażone w dniach roboczych). Źródło: oprac. własne

sami zostały przedstawione na rys. 2.2. Wykonawca robót budowlanych dysponuje dwoma brygadami: B1 oraz B2. Czasy wykonania poszczególnych procesów budowlanych zostały przedstawione na rys. 2.2. Decydent ustalił wagi kryteriów jako: $w_1 = 0,6$, $w_2 = 0,3$, $w_3 = 0,1$.

Obliczenia wykonano za pomocą opracowanego systemu komputerowego. Czas obliczeń wyniósł 2,097 sekundy. Czas realizacji przedsięwzięcia wyniósł 84 dni robocze (teoretyczny najkrótszy czas realizacji przedsięwzięcia został obliczony jako równy 78 dni). Zatrudnione brygady pracują bez przerw. Brygada B1 została zatrudniona do wykonania procesów numer 1, 2, 5 i 6, podczas gdy brygada B2 powinna wykonywać procesy numer 3, 4 i 7. Średni czas wykonania każdego obiektu budowlanego wyniósł 75 dni roboczych. Szczegółowy harmonogram robót został zaprezentowany na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Wykres belkowy rozwiązania rekomendowanego do zastosowania (oznaczenie procesów: PXDYOZ, gdzie za X podstawia się numer procesu, za Y numer działki, a za Z numer obiektu). Źródło: oprac. własne

2.5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych, zwłaszcza tych obejmujących wiele budynków, jest złożonym zadaniem, obejmującym znaczną liczbę zmiennych decyzyjnych i ograniczeń. W obliczu tej złożoności istniejące narzędzia do harmonogramowania wydają się nieadekwatne. Wyniki uzyskane za ich pomocą nie odzwierciedlają preferencji kierowników budowy.

Zaproponowany algorytm ma stanowić pomoc w lepszym wykorzystaniu zasobów wykonawcy i zharmonizowaniu pracy zatrudnionych przez niego brygad oraz podwykonawców. Optymalizacja wykorzystania zasobów jest uważana za kluczowy czynnik przewagi konkurencyjnej, zwłaszcza w czasach niedoboru wykwalifikowanej siły roboczej. Opracowana metoda jest dedykowana zarządzaniu realizacją wieloobektowych przedsięwzięć budowlanych i zapewnieniu racjonalnego gospodarowania posiadanymi zasobami z jednoczesnym dochowaniem dyrektywnego (umownego) czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Jest ona bardziej prawdopodobna do zastosowania w praktyce dzięki uwzględnieniu trzech kryteriów optymalizacji i umożliwieniu planiście dostosowania ich względnej ważności do preferencji decydenta.

Opracowany system, mimo licznych zalet w porównaniu do istniejących metod wspomagania planowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, ma również obszary wymagające dalszej poprawy. W obecnej postaci system nie posiada intuicyjnego interfejsu – istnienie modułu ułatwiającego komunikację użytkownika z systemem znacząco zwiększyłoby łatwość jego obsługi oraz zachęciło kierowników budów do korzystania z niego. Dodatkowo, w obecnej formie system operuje na danych deterministycznych – uwzględnienie rozkładów prawdopodobieństwa czasów realizacji procesów budowlanych mogłoby przyczynić się do poprawy odporności na zakłócenia otrzymywanych harmonogramów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adeli H., Karim A. (1997), *Scheduling/cost optimization and neural dynamics model for construction*, Journal of Construction Engineering and Management, 123(4), 450–458.
- [2] Akin F.D., Polat G., Turkoglu H., Damci A. (2021), *A crashing-based time-cost trade-off model considering quality cost and contract clauses*, <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1946899>.
- [3] Altuwaim A., El-Rayes K. (2018), *Minimizing duration and crew work interruptions of repetitive construction projects*, Automation in Construction, 88, 59–72.

- [4] Altuwaim A., El-Rayes K. (2021), *Multiobjective Optimization Model for Planning Repetitive Construction Projects*, Journal of Construction Engineering and Management, 147(7), 04021072.
- [5] Anysz H., Apollo M., Grzyl B. (2021), *Quantitative Risk Assessment in Construction Disputes Based on Machine Learning Tools*, Symmetry, 13(5), 744.
- [6] Arabpour Roghabadi M., Moselhi O. (2020), *Optimized crew selection for scheduling of repetitive projects*, Engineering, Construction and Architectural Management, <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2019-0590>.
- [7] Arditi D., Albulak M.Z. (1986), *Line-of-Balance scheduling in pavement construction*, Journal of Construction Engineering and Management, 112(3), 411–424.
- [8] Arditi D., Sikangwan P., Tokdemir O.B. (2002), *Scheduling system for high rise building construction*, Construction Management and Economics, 20(4), 353–364.
- [9] Arditi D., Tokdemir O.B., Suh K. (2001), *Effect of learning on line-of-balance scheduling*, International Journal of Project Management, 19(5), 265–277.
- [10] Białynicki-Birula I., Białynicka-Birula I. (2002), *Modelowanie rzeczywistości. Od Gry w życie Conwaya przez żuka mandelbrota do maszyny Turinga*, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- [11] Biruk S., Rzepecki Ł. (2021), *A Simulation Model of Construction Projects Executed in Random Conditions with the Overlapping Construction Works*, Sustainability, 13(11), 5795.
- [12] Damci A. (2020), *Revisiting the concept of natural rhythm of production in line of balance scheduling*, International Journal of Construction Management, <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1786764>.
- [13] Damci A., Arditi D., Polat G. (2013a), *Multiresource leveling in line-of-balance scheduling*, Journal of Construction Engineering and Management, 139(9), 1108–1116.
- [14] Damci A., Arditi D., Polat G. (2013b), *Resource Leveling in Line-of-Balance Scheduling*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 28(9), 679–692.
- [15] Eid M.S., Elbeltagi E.E., El-Adaway I.H. (2021), *Simultaneous multi-criteria optimization for scheduling linear infrastructure projects*, International Journal of Construction Management, 21(1), 41–55.
- [16] García-Nieves J.D.D., Ponz-Tienda J.L.L., Ospina-Alvarado A., Bonilla-Palacios M. (2019), *Multipurpose linear programming optimization model for repetitive activities scheduling in construction projects*, Automation in Construction, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.020>.
- [17] Gouda A., Hosny O., Nassar K. (2017), *Optimal crew routing for linear repetitive projects using graph theory*, Automation in Construction, 81, 411–421.

- [18] Grzyl B., Apollo M., Kristowski A. (2019), *Application of Game Theory to Conflict Management in a Construction Contract*, Sustainability, 11(7), 1983.
- [19] Hapke M. (1998), *Rozmyte wielokryterialne programowanie sieciowe*, Politechnika Poznańska, Poznań.
- [20] Hapke M., Jaskiewicz A., Słowiński R. (1998), *Interactive analysis of multiple-criteria project scheduling problems*, European Journal of Operational Research, 107(2), 315–324.
- [21] Harmelink D.J., Rowings J.E. (1998), *Linear scheduling model: Development of controlling activity path*, Journal of Construction Engineering and Management, 124(4), 263–268.
- [22] Harris R.B., Ioannou P.G. (1998), *Scheduling projects with repeating activities*, Journal of Construction Engineering and Management, 124(4), 269–278.
- [23] Heravi G., Moridi S. (2019), *Resource-Constrained Time-Cost Tradeoff for Repetitive Construction Projects*, KSCE Journal of Civil Engineering, 23(8), 3265–3274.
- [24] Jaskiewicz A., Słowiński R. (1995), *The Light Beam Search – Outranking Based Interactive Procedure for Multiple-Objective Mathematical Programming*, Springer, Boston, 129–146.
- [25] Jaskiewicz A., Słowiński R. (1999). *The “Light Beam Search” approach – an overview of methodology and applications*, European Journal of Operational Research, 113(2), 300–314.
- [26] Jaśkowski P. (2003), *Metoda projektowania struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego*, Politechnika Lubelska, Lublin.
- [27] Katsuragawa C.M., Lucko G., Isaac S., Su Y. (2021), *Fuzzy Linear and Repetitive Scheduling for Construction Projects*, Journal of Construction Engineering and Management, 147(3), 04021002.
- [28] Kennedy J. (1997), *Particle swarm: Social adaptation of knowledge*, [in:] *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation*, ICEC, 303–308.
- [29] Mikhailov L. (2003), *Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements*, Fuzzy Sets and Systems, 134(3), 365–385.
- [30] Mikhailov L. (2004), *Group prioritization in the AHP by fuzzy preference programming method*, Computers and Operations Research, 31(2), 293–301.
- [31] Montusiewicz J. (2012), *Wspomaganie procesów projektowania i planowania wytwarzania w budowie i eksploatacji maszyn metodami analizy wielokryterialnej*, Politechnika Lubelska, Lublin.
- [32] Nguyen D.-T., Doan D.-T.-V., Tran N.-N.C., Tran D.-H. (2021), *A novel multiple objective whale optimization for time-cost-quality tradeoff in non-unit repetitive projects*, <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1938939>.
- [33] Pang W., Wang K.P., Zhou C.G., Dong L.J., Liu M., Zhang H.Y., Wang J.Y. (2004), *Modified particle swarm optimization based on space transformation*

- for solving traveling salesman problem, [in:] *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 4, 2342–2346.
- [34] Podolski M., Sroka B. (2019), *Cost optimization of multiunit construction projects using linear programming and metaheuristic-based simulated annealing algorithm*, *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(8), 848–857.
 - [35] Polat G., Dogu Akin F., Turkoglu H., Damci A. (2020), *A Project Crashing Strategy Considering Contract Clauses and Quality Considerations: An Illustrative Example*, <https://doi.org/10.3311/CCC2020-040>.
 - [36] Radziszewska-Zielina E., Sroka B. (2018), *Planning repetitive construction projects considering technological constraints*, *Open Engineering*, 8(1), 500–505.
 - [37] Saad D.A., Masoud M., Osman H. (2021), *Multi-objective optimization of lean-based repetitive scheduling using batch and pull production*, *Automation in Construction*, 127, 103696.
 - [38] Sarraj Z.M.A. (1990), *Formal development of line-of-balance technique*, *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(4), 689–704.
 - [39] Sroka B., Rosłon J., Podolski M., Bożejko W., Burduk A., Wodecki M. (2021), *Profit optimization for multi-mode repetitive construction project with cash flows using metaheuristics*, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(2), 67.
 - [40] Szczepanik M. (2013), *Algorytmy rojowe w optymalizacji układów mechanicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
 - [41] Tang Y., Sun Q., Liu R., Wang F. (2018), *Resource Leveling Based on Line of Balance and Constraint Programming*, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(10), 864–884.
 - [42] Tao S., Wu C., Sheng Z., Wang X. (2018), *Space-Time Repetitive Project Scheduling Considering Location and Congestion*, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32(3), 04018017.
 - [43] Tomczak M. (2019), *Modeling of the harmonization method for executing a multi-unit construction project*, *Open Engineering*, 9(1), 282–291.
 - [44] Tomczak M. (2020), *Metoda harmonizacji wykonania procesów wieloobiektoowego przedsięwzięcia budowlanego*, Politechnika Lubelska, Lublin.
 - [45] Tomczak M., Jaśkowski P. (2018), *Application of Type-2 Interval Fuzzy Sets to Contractor Qualification Process*, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(8), 2702–2713.
 - [46] Tomczak M., Jaśkowski P. (2020a), *Crashing Construction Project Schedules by Relocating Resources*, *IEEE Access*, 8, 224522–224531.
 - [47] Tomczak M., Jaśkowski P. (2020b), *New Approach to Improve General Contractor Crew's Work Continuity in Repetitive Construction Projects*, *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(5), 04020043.

- [48] Tomczak M., Jaśkowski P. (2021a), *Harmonogramowanie powtarzalnych procesów budowlanych z zastosowaniem algorytmu rojowego*, Przegląd Budowlany, 92(7–8), 45–49.
- [49] Tomczak M., Jaśkowski P. (2021b), *Preferences of construction managers regarding the quality and optimization criteria of project schedules, Sustainability (Switzerland)*, 13(2), 1–24.
- [50] Tomczak M., Jaśkowski P. (2022), *Harmonizing construction processes in repetitive construction projects with multiple buildings*, Automation in Construction, 139, 104266.
- [51] Tomczak M., Rzepecki Ł. (2017), *Evaluation of Supply Chain Management Systems Used in Civil Engineering*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 245(7), 072005.
- [52] Tran D.H. (2020), *Optimizing time–cost in generalized construction projects using multiple-objective social group optimization and multi-criteria decision-making methods*, Engineering, Construction and Architectural Management, 27(9), 2287–2313.
- [53] Tran D.-H., Chou J.-S., Luong D.-L. (2019), *Multi-objective symbiotic organisms optimization for making time-cost tradeoffs in repetitive project scheduling problem*, Journal of Civil Engineering and Management, 25(4), 322–339.
- [54] Trzaskalik T. (ed.) (2014), *Wielokryterialne Wspomaganie Decyzji. Metody i zastosowania*, PWE, Warszawa.
- [55] Ungureanu L.C., Hartmann T., Serbanoiu I. (2019), *Quantitative lean assessment of line of balance schedules' quality*, Engineering, Construction and Architectural Management, 26(2), 224–244.
- [56] Wang T., Abdallah M., Clevenger C., Monghasemi S. (2019), *Time–cost–quality trade-off analysis for planning construction projects*, Engineering, Construction and Architectural Management, <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2017-0271>.
- [57] Zhang L., Dai G., Zou X., Qi J. (2020), *Robustness-based multi-objective optimization for repetitive projects under work continuity uncertainty*, Engineering, Construction and Architectural Management, <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2019-0458>.
- [58] Zolfaghar Dolabi H.R., Afshar A., Abbasnia R. (2014), *CPM/LOB scheduling method for project deadline constraint satisfaction*, Automation in Construction, 48, 107–118.
- [59] Zou X., Zhang L. (2020), *A constraint programming approach for scheduling repetitive projects with atypical activities considering soft logic*, Automation in Construction, 109, 102990.

3. ALGORYTM SZACOWANIA CZASU REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO Z WYKORZYSTANIEM TEORII ZBIORÓW ROZMYTYCH

Krzysztof Kaczorek¹, Janusz Kulejewski², Nabi Ibadov³

3.1. WSTĘP

Podstawowymi trudnościami, związanymi z planowaniem przedsięwzięcia budowlanego pod względem czasu realizacji, są [36]:

- subiektywny charakter danych przekazywanych planiście przez ekspertów budowlanych [4],
- brak wystarczających informacji o stosowanych rozwiązaniach technologicznych oraz warunkach prowadzenia robót budowlanych [28],
- nieprecyzyjność informacji podawanych planiście przez ekspertów budowlanych (często są to informacje o charakterze jakościowym, opisowym) [8],
- brak podejścia wyczerpującego temat interakcji pomiędzy czynnikami ryzyka, jakie oddziałują na przebieg robót budowlanych [20],
- indywidualny charakter każdej budowy, gdzie procesy każdorazowo realizowane są w określonych warunkach, w otoczeniu wielu czynników: technicznych, technologicznych oraz organizacyjnych.

Celem naukowym prezentowanej w niniejszym rozdziale pracy jest opracowanie i weryfikacja metody obliczeniowej, pozwalającej na oszacowanie czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem wzajemnej podatności czynników ryzyka. Bazuje ona na wykorzystaniu teorii zbiorów rozmytych do modelowania skumulowanego wpływu czynników ryzyka na opóźnienia robót budowlanych. Rdzeniem metody jest odpowiednia analiza jakościowa oraz ilościowa czynników ryzyka dla poszczególnych robót budowlanych, która umożliwia określenie rozkładów prawdopodobieństwa czasu wykonania tychże prac. Zastosowano

¹ Zakład Inżynierii Produkcji i Zarządzania w Budownictwie, Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, e-mail: krzysztof.kaczorek@pw.edu.pl.

² Zakład Inżynierii Produkcji i Zarządzania w Budownictwie, Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, e-mail: janusz.kulejewski@pw.edu.pl.

³ Zakład Inżynierii Produkcji i Zarządzania w Budownictwie, Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, e-mail: nabi.ibadov@pw.edu.pl.

je w badaniach symulacyjnych, pozwalających na oszacowanie czasu wykonania całego przedsięwzięcia budowlanego. Przedstawiono również implementację metody za pomocą stosownego algorytmu.

3.2. RYZYKO, CZYNNIKI RYZYKA ORAZ INTERAKCJE POMIĘDZY CZYNNIKAMI RYZYKA REALIZACJI ROBÓT BUDOWLANYCH

3.2.1. DEFINIOWANIE RYZYKA

Termin „ryzyko” pojawia się we wszystkich metodykach związanych z zarządzaniem projektami, w tym przedsięwzięciami budowlanymi. W metodyce „PRINCE2” zdefiniowane jest jako „niepewne zdarzenie lub zbiór zdarzeń, które w przypadku ich wystąpienia będą mieć wpływ na osiągnięcie celów. Miarą ryzyka jest iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia dostrzeżonego zagrożenia lub szansy oraz wielkości jego/jej wpływu na cele, przy czym: zagrożenie oznacza niepewne zdarzenie, które może mieć niekorzystny wpływ na cele; szansa (okazja) oznacza niepewne zdarzenie, które może mieć korzystny wpływ na cele” [32]. Natomiast metodyka proponowana przez Project Management Institute definiuje ryzyko jako „niepewne zdarzenie lub okoliczność, która w razie wystąpienia może mieć korzystny lub niekorzystny wpływ przynajmniej na jeden z celów projektu, takich jak czas, koszt lub jakość” [1].

Dwaj polscy ekonomiści – W. Tarczyński oraz M. Mojsiewicz [42] – wprowadzają trzy kategorie ryzyka, przy uwzględnieniu występowania niepewności niemierzalnej zdefiniowanej przez F. Knighta [23]:

- ryzyko właściwe, którego przyczyna leży w działaniu sił natury oraz czynników losowych,
- ryzyko subiektywne, które jest następstwem niedoskonałości dokonywanej przez człowieka subiektywnej oceny prawdopodobieństwa występowania pewnych zjawisk w przyszłości,
- ryzyko obiektywne, którego przyczyną jest brak możliwości przewidzenia wystąpienia pewnych zjawisk.

Ryzyko właściwe można wiązać z pojęciem „niepewności”, zaś ryzyko subiektywne z pojęciem „nieprecyzyjności”. Wymienione pojęcia definiowane są przez D. Dubois oraz H. Prade’a [8] następująco:

- „niepewność” to zagadnienie probabilistyczne, stosowane w przypadku losowości skutku określonego zdarzenia. Znane są tutaj potencjalne warianty, które mogą się zmaterializować, ale nie można z całą pewnością potwierdzić lub wykluczyć któregośkolwiek z nich. Jedyne co można zrobić, to podjąć próbę oszacowania rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia dla poszczególnych scenariuszy;

- „nieprecyzyjność” to zagadnienie deterministyczne, które dotyczy przypadku niekompletności danych, umożliwiających kompletną i pełną charakterystykę następstw określonego zdarzenia. Wobec tego dane, jakimi operuje planista, są jasno określone (zdeteminowane), ale po pierwsze nie dają wyczerpującego opisu sytuacji (planista nie jest w stanie precyzyjnie określić wszystkich możliwych ewentualności, a jedynie stara się uwzględnić możliwie wiele wariantów przebiegu przedsięwzięcia), a po drugie – nie istnieją ostre granice przedziałów, pozwalające na jednoznaczną ocenę potencjalnych okoliczności.

Bożejko, Hejducki i Wodecki [5] piszą, że „nieprecyzyjność zazwyczaj wiąże się z tym, że proces jest unikalny, brak jest danych statystycznych z przeszłości dla dokładnego określenia wartości i wiedza eksperta bywa niewystarczająca”.

Z przeanalizowanych definicji można wyciągnąć wniosek, iż pod hasłem „ryzyko” mogą się kryć: zagrożenie, szansa, niepewność, nieprecyzyjność oraz brak informacji. Uznano za zasadne, aby z przedstawionego zbioru, w odniesieniu do szacowania czasów realizacji robót budowlanych, wyeliminować termin „szansa”. Jest to analogiczne podejście do tego znanego chociażby z kosztorysowania robót budowlanych, gdzie na cenę kosztorysową składają się również środki zarezerwowane na poczet potencjalnych wzrostów kosztów (jako część składnika „zysk”), ale nie stosuje się obniżania ceny kosztorysowej, licząc na potencjalne „szanse” [30]. Wobec tego podczas kosztorysowania nie uwzględnia się korzystnych okoliczności, takich jak np. potencjalne obniżenie cen materiałów czy kosztów robocizny, a ewentualne zmaterializowanie się pomyślnych scenariuszy umożliwia uzyskanie dodatkowego zysku. Pozwala to oszacować tzw. bezpieczną wartość kosztorysową inwestycji, czyli taką, która umożliwi wykonawcy robót uzyskanie zysku nie mniejszego, niż to pierwotnie planował. Podobnie w przypadku szacowania czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego kluczowe jest ustalenie takiego terminu zakończenia prac, który zapewnia dotrzymanie terminu określonego w umowie pomiędzy inwestorem a generalnym wykonawcą. Jeśli na skutek pomyślnych okoliczności prace będą wykonywane szybciej, niż planowano, to jest to dodatkowa korzyść generalnego wykonawcy. W takiej sytuacji będzie on mógł bez pośpiechu dokończyć inwestycję lub zakończyć ją wcześniej, niż planowano, i przenieść swoje środki produkcyjne na inne realizacje (o być może zagrożonym umownym terminie zakończenia prac) [31].

Podsumowując, w niniejszej pracy za ryzyko będzie uznawane zagrożenie wynikające z braku informacji lub ich nieprecyzyjnego określenia. Pierwszy wariant będzie dotyczył sytuacji, w której – przykładowo – wprowadzana jest nowa technologia lub prace są prowadzone w bardzo trudnych do przewidzenia warunkach. W takiej sytuacji należy uwzględnić zdecydowanie więcej scenariuszy, aby zwiększyć prawdopodobieństwo uwzględnienia tego krytycznego. W drugim wariantcie mowa jest o sytuacji, w której stosowane są rozwiązania znane ekspertowi, ale trudne jest precyzyjne określenie konkretnych wartości (np. możliwe jest

stwierdzenie, że wydłużenie czasu wykonania procesu wyniesie około dwóch dni roboczych, ale nie można z całą pewnością stwierdzić, że będą to dokładnie dwa dni robocze). W tym przypadku możliwe jest uwzględnienie mniejszej liczby potencjalnych scenariuszy [3].

3.2.2. DEFINIOWANIE CZYNNIKÓW RYZYKA

Ośrodek Rozwoju Edukacji definiuje czynniki ryzyka przez pryzmat społeczny jako „wszystkie elementy (warunki środowiska, sytuacje, cechy i zmienne indywidualne) zwiększające ryzyko wystąpienia zachowań problemowych (stanowiących zagrożenie dla prawidłowego rozwoju lub funkcjonowania społecznego) i związanych z nimi szkód” [41].

Internetowy słownik biznesowy definiuje czynniki ryzyka przez pryzmat ekonomiczny jako „wymierne charakterystyki lub elementy, których zmiana może wpłynąć na wartość składnika aktywów, np. kurs walutowy, stopa procentowa i cena rynkowa” [45].

Natomiast Światowa Organizacja Zdrowia przez pryzmat medyczny określa czynniki ryzyka jako „jakiegokolwiek cechy, charakterystyki lub ekspozycje osobnika, które zwiększają prawdopodobieństwo wystąpienia choroby lub urazu” [46].

W naukach technicznych autorzy skupiają się na identyfikowaniu czynników ryzyka, nie podając przy tym definicji samego „czynnika ryzyka” [16]. Niemniej jednak proces identyfikacji czynników ryzyka przeprowadzany jest bardzo skrupulatnie, zaś zidentyfikowane czynniki dodatkowo dzielone są na podzbiory na podstawie różnych kryteriów, takich jak:

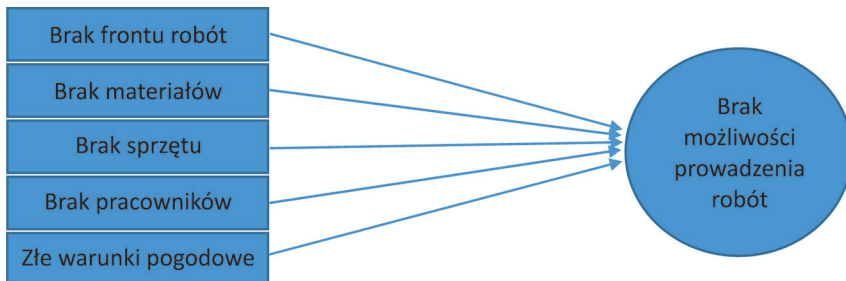
- podległość lub brak podległości wobec kontroli wykonawcy [2],
- poziom (zasięg) czynników ryzyka – czynniki ryzyka występują bezpośrednio na budowie, w branży budowlanej lub na rynku krajowym [39],
- źródło pochodzenia czynnika ryzyka (czynniki ludzkie, czynniki związane z kontraktem, czynniki nieprzewidywalne) [25],
- zagadnienia, jakich dotyczą poszczególne czynniki (logistyka i zasoby, aspekty administracyjno-prawne, decyzyjność oraz komunikacja, aspekty finansowo-płacowe, niewłaściwe zarządzanie budową, otoczenie budowy) [5],
- właściciel danego czynnika ryzyka [7, 14, 40],
- sposób reagowania na poszczególne czynniki ryzyka [14],
- etap procesu budowlanego, na którym czynnik ryzyka powinien zostać uwzględniony (przygotowanie inwestycji, procedura wyboru wykonawcy, realizacja budowy) [24].

Korzystając z powyższych informacji, można podjąć próbę opracowania definicji czynnika ryzyka w budownictwie. Niech brzmi ona następująco:

„Czynniki ryzyka to wszystkie wymierne charakterystyki lub okoliczności (ludzkie, związane z kontraktem lub nieprzewidywalne) o określonych: źródle pocho-

dzenia, właściciela, sposobie reagowania oraz charakterystycznych parametrach, których wystąpienie może wpłynąć na powodzenie przedsięwzięcia budowlanego”.

Podsumowując, pomimo skomplikowania problemu należy różnicować terminy „ryzyko” oraz „czynnik ryzyka”. Pierwszy z nich jest zagadnieniem zdecydowanie szerszym, dotyczącym przede wszystkim potencjalnych niepowodzeń w projekcie, natomiast „czynnik ryzyka” odnosi się bezpośrednio do okoliczności i podmiotów, które mogą do tych niepowodzeń doprowadzić. Powyższy wywód zobrazowano przykładem na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Przykładowe czynniki ryzyka przyczyniające się do danego ryzyka (brak możliwości rozpoczęcia realizacji procesu w efekcie prowadzi do wydłużenia czasu jego wykonania) [19]

3.2.3. INTERAKCJE POMIĘDZY CZYNNIKAMI RYZYKA

Interakcja, czyli wzajemne oddziaływanie, czynników ryzyka jest opisywana zarówno w naukach medycznych [11], społecznych [6], jak i ekonomicznych [38]. Zjawisko to występuje również w naukach inżyniersko-technicznych, w tym w budownictwie. Potwierdzają to badania przeprowadzone w ramach pracy [17]. Poddano w nich ankietyzację losowo wybranych 752 członków Polskiego Stowarzyszenia Menedżerów Budownictwa, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz Podkarpackiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa. W tabelach 3.1–3.3 przedstawiono odpowiedzi na pytania bezpośrednio związane ze zjawiskiem czynników ryzyka.

Przedstawione wyniki przeprowadzonych badań ankietowych jednoznacznie wskazują na fakt, że czynniki ryzyka mogą wzajemnie wzmacniać swoje oddziaływanie. W przywołanej ankiecie skupiono się jedynie na kilku wybranych czynnikach ryzyka. Niemniej jednak konsultacje z kadrą inżynierską jednoznacznie wskazują na konieczność uwzględniania możliwie wielu istotnych dla przedsięwzięcia czynników ryzyka [18]. Co więcej, coraz bardziej skomplikowane przedsięwzięcia budowlane będą wymagały opracowania dokładniejszych i bardziej wiarygodnych narzędzi, służących do prognozowania czasów realizacji procesów oraz pozyskania nowych umiejętności i kompetencji przez samych inżynierów [12, 13].

Tabela 3.1

Odpowiedzi na pytanie „Czy Pani/Pana zdaniem niedoświadczony zespół będzie miał wpływ na wzrost awaryjności eksploatowanych maszyn budowlanych (np. na skutek niewłaściwej obsługi)?” [17]

Odpowiedź	Udział odpowiedzi [%]
Zdecydowanie tak	54,0%
Raczej tak	38,7%
Raczej nie	5,3%
Zdecydowanie nie	0,5%
Nie mam zdania	1,5%

Tabela 3.2

Odpowiedzi na pytanie „Czy Pani/Pana zdaniem niekorzystne warunki pogodowe (np. deszcz) będą miały wpływ na spadek wydajności pracowników fizycznych na budowie?” [17]

Odpowiedź	Udział odpowiedzi [%]
Zdecydowanie tak	57,6%
Raczej tak	30,6%
Raczej nie	10,2%
Zdecydowanie nie	0,5%
Nie mam zdania	1,1%

Tabela 3.3

Odpowiedzi na pytanie „Czy Pani/Pana zdaniem jeszcze bardziej niekorzystne warunki pogodowe (np. deszcz w połączeniu z silnym wiatrem) bardziej wpłyną na spadek wydajności pracowników fizycznych niż wystąpienie tylko jednego niekorzystnego czynnika atmosferycznego (np. samego deszczu)?” [17]

Odpowiedź	Udział odpowiedzi [%]
Zdecydowanie tak	40,7%
Raczej tak	45,6%
Raczej nie	11,9%
Zdecydowanie nie	0,9%
Nie mam zdania	0,9%

Rogalska, Czarnigowska, Hejducki i Nahurny w swojej pracy, dotyczącej uwzględniania wpływu pogodowych czynników ryzyka [37], proponują podział rodzaju wzajemnego wpływu grupy czynników ryzyka na trzy kategorie:

- wpływy niezależne: wpływ anomalii na czas pracy jest od siebie niezależny. Wydłużenie czasu naliczane jest dla każdego stanu pogody (czynnika ryzyka):

$$t'_p = t_p \cdot \left(1 + \frac{\Delta W + \Delta T^+ + \Delta T^- + \Delta O}{100} \right) \quad (3.1)$$

gdzie:

- t'_p – rzeczywisty czas pracy, uwzględniający wpływ opóźnień wywołanych pogodą,
- t_p – nominalny czas pracy, opracowany np. na podstawie KNR,
- ΔW – szacunkowe wydłużenie czasu pracy w przypadku wystąpienia silnego wiatru [%],
- ΔT^+ – szacunkowe wydłużenie czasu pracy w przypadku wystąpienia wysokich temperatur [%],
- ΔT^- – szacunkowe wydłużenie czasu pracy w przypadku wystąpienia niskich temperatur [%],
- ΔO – szacunkowe wydłużenie czasu pracy w przypadku wystąpienia wysokich opadów [%];
- wpływy zależne: jednoczesne wystąpienie kilku anomalii jest dużo bardziej niekorzystne. Czas pracy należy określić na podstawie iloczynu wpływów:

$$t'_p = t_p \cdot \left(\frac{\Delta W}{100} + 1 \right) \cdot \left(\frac{\Delta T^+}{100} + 1 \right) \cdot \left(\frac{\Delta T^-}{100} + 1 \right) \cdot \left(\frac{\Delta O}{100} + 1 \right) \quad (3.2)$$

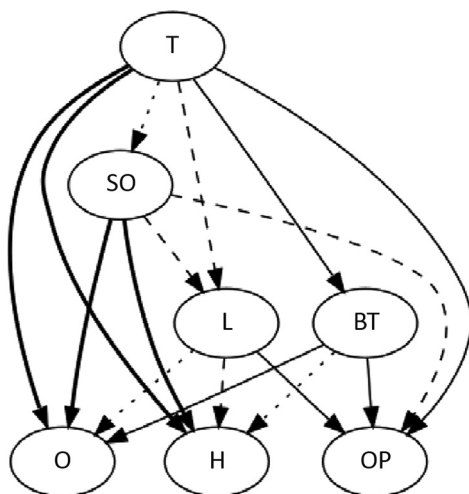
- wpływy pojedyncze: wystąpienie wielu niekorzystnych czynników pogodowych nie ma istotnego wpływu, ponieważ prace i tak będą znacząco opóźnione przez najsilniej wpływający czynnik. Dlatego uwzględnia się tylko czynnik, którego wpływ jest największy:

$$t'_p = t_p \cdot \left(1 + \frac{\max \{ \Delta W; \Delta T^+; \Delta T^-; \Delta O \}}{100} \right) \quad (3.3)$$

Natomiast w pracach Moselniego i El-Rayesa [26] oraz Moselniego, Gonga i El-Rayesa [27] skupiono się na pozyskaniu możliwie dużej próbki danych o warunkach pogodowych, które wykorzystano w modelu symulacyjnym. Dzięki takiemu podejściu nie analizowano wpływu poszczególnych czynników osobno, a uwzględniano ich łączny efekt końcowy. Pozwoliło to na uzyskanie zgodności prognoz z faktycznymi zjawiskami pogodowymi na poziomie 95%.

Dytczak, Ginda i Wojtkiewicz [10] oraz Dytczak, Ginda, Gotowała oraz Szklenik [9], w celu uwzględnienia interakcji pomiędzy czynnikami ryzyka, proponują zastosowanie metody DEMATEL. Podstawą metody jest porównywanie czynników ryzyka parami w kontekście przyczynowości (bezpośredniego wpływu). Aby wyrazić intensywność relacji bezpośredniego wpływu, używa się przy tym dyskretnej skali ocen 0 – N. Jej poszczególne poziomy odpowiadają stopniowemu zwiększaniu się intensywności relacji wpływu: od 0 (brak wpływu pierwszego z porównywanych czynników na drugi), przez 1 (niewielki wpływ pierwszego czynnika na drugi)

i poziomy pośrednie, aż po arbitralnie przyjmowany poziom N (skrajnie duży wpływ pierwszego czynnika na drugi). Wyniki oceny relacji bezpośredniego wpływu, zachodzącego między czynnikami, wyraża graf bezpośredniego wpływu G oraz odpowiadająca mu kwadratowa macierz bezpośredniego wpływu A , złożona z wierszy i kolumn, odpowiadających kolejno porównywanym czynnikom. Dzięki zastosowaniu ciągu odpowiednich przekształceń, wykorzystujących macierz bezpośredniego wpływu, otrzymywana jest informacja na temat kierunku i intensywności relacji całkowitego wpływu między czynnikami (macierz całkowitego wpływu T). Na jej podstawie można jednoznacznie zidentyfikować czynniki stanowiące przyczynę oraz czynniki będące skutkiem ich oddziaływania. Służą temu wartości wskaźników: prominenecji (pozycji) s^+ i relacji s^- , oraz diagram nazywany mapą całkowitego wpływu (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Przykładowa mapa całkowitego wpływu czynników, gdzie: T – znaczące obniżenie wartości temperatury otoczenia; SO – zaleganie dużej ilości śniegu; L – utrudnienia logistyczne; BT – bezwładność cieplna obiektu budowlanego; O – konieczność remobilizacji zasobów; H – mała elastyczność harmonogramu; OP – opóźnienie realizacji przedsięwzięcia [10]

Na podstawie wyżej przytoczonych treści wyciągnięto wniosek, że w przypadku procesu budowlanego, na który oddziałuje n czynników ryzyka, ich łączny wpływ na wykonanie procesu budowlanego w założonych terminach zawiera się w przedziale zamkniętym, ograniczonym od dołu przez wartość największego wpływu pojedynczego czynnika, zaś od góry sumą wpływu wszystkich czynników. Przedstawia to poniższy zapis:

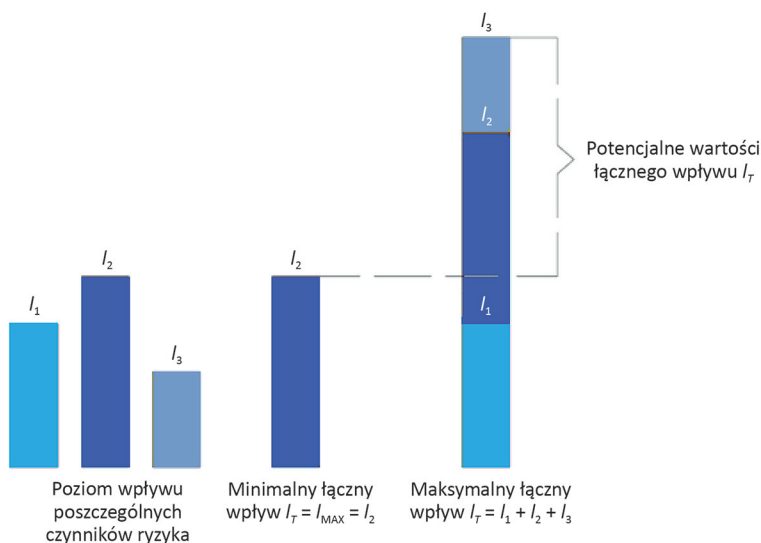
$$I_T \in \left\langle I_{\text{MAX}}; \sum_{i=1}^n I_i \right\rangle \quad (3.4)$$

gdzie:

- I_T – łączny (z ang. *total*) wpływ (z ang. *impact*) na dany proces n czynników ryzyka,
- I_{MAX} – największy wpływ na dany proces pojedynczego czynnika ryzyka ze zbioru n czynników,
- I_i – wpływ na dany proces i -tego czynnika ryzyka.

Zaproponowany przedział jest nie tylko zasadny, ale również logiczny, co wynika z rys. 3.3. Co więcej, taki zakres wartości potwierdzają opinie praktyków.

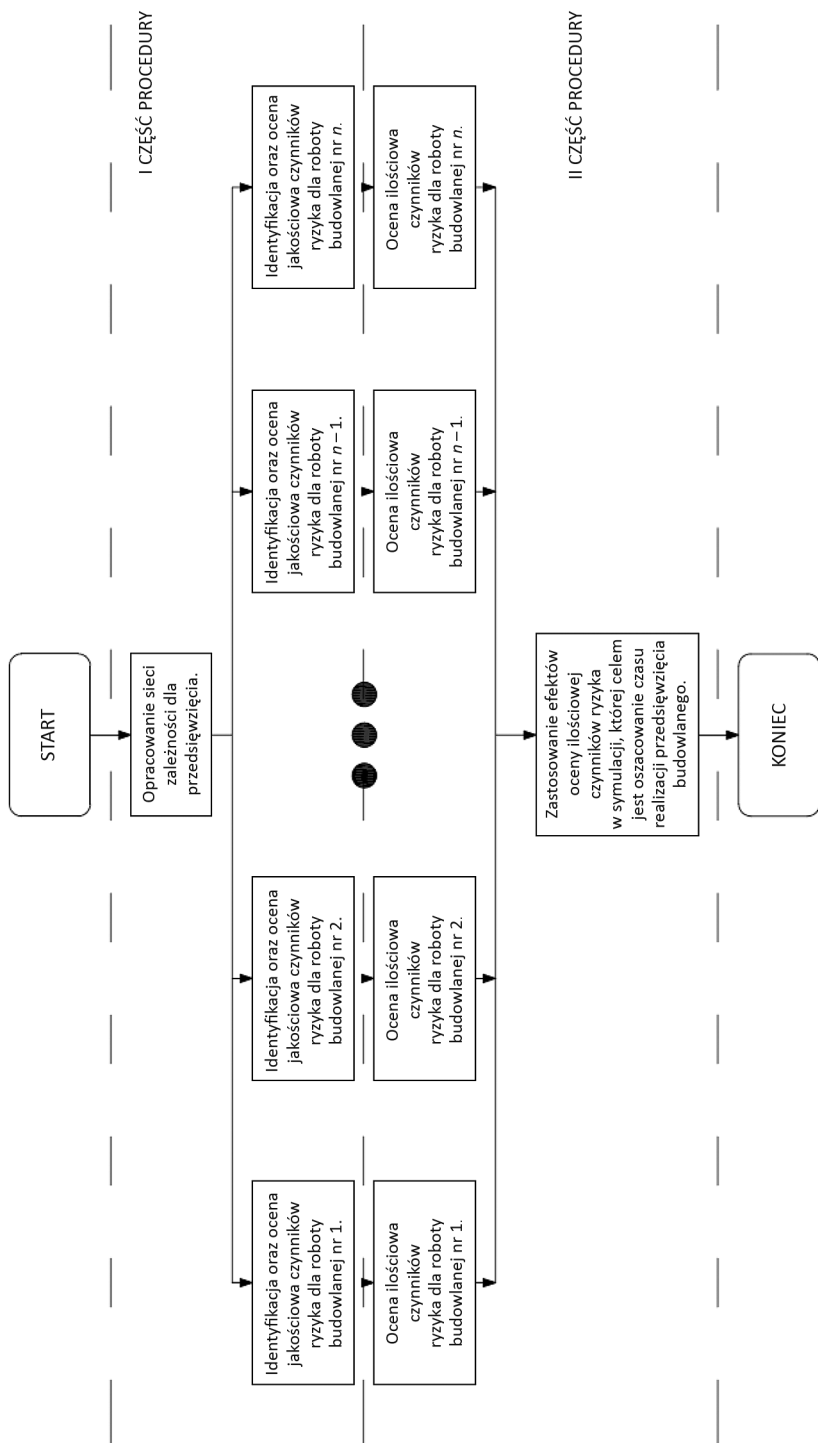
W dalszej części pracy zaproponowano sposób postępowania, umożliwiający oszacowanie wartości łącznego wpływu grupy czynników ryzyka na powodzenie poszczególnych robót budowlanych, jak również całego przedsięwzięcia budowlanego.



Rys. 3.3. Graficzny sposób ustalenia przedziału możliwych wartości łącznego wpływu I_T na dany proces n czynników ryzyka [19]

3.3. SCHEMAT BLOKOWY AUTORSKIEGO ALGORYTMU SZACOWANIA CZASU REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO

Na rys. 3.4 został zaprezentowany schemat blokowy algorytmu, będącego implementacją autorskiej metody szacowania czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego z uwzględnieniem wpływu skumulowanego wpływu czynników ryzyka na opóźnienia robót budowlanych. Jest to schemat ogólny, który będzie uszczegółowiony na rys. 3.7 oraz 3.8.



Rys. 3.4. Schemat blokowy autorskiego algorytmu szacowania czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego z uwzględnieniem wpływu skumulowanego wpływu czynników ryzyka na czas wykonania procesów budowlanych [19]

3.4. AUTORSKA PROPOZYCJA DODATKOWEGO PARAMETRU CZYNNIKA RYZYKA – PODATNOŚCI

Zadaniem parametru „podatność” jest określenie, na ile wpływ danego czynnika na czas wykonywania roboty budowlanej jest uzależniony od wpływu pozostałych czynników ryzyka. Takie podejście umożliwia odejście od dotychczas najczęściej stosowanych sposobów rozwiązywania problemu jednoczesnego działania wielu czynników ryzyka. Według pierwszego z nich zalecane jest zsumowanie wpływu wszystkich czynników ryzyka. Przekłada się to na znaczące przeszacowanie wyniku. Drugi sposób polega na niezależnym obliczeniu wpływu poszczególnych czynników i wybraniu maksymalnej z policzonych wartości. Wiąże się to z założeniem, że pomniejsze oddziaływania na przebieg roboty budowlanej będą zawierały się w oddziaływaniu maksymalnym. Natomiast stan faktyczny przedstawia się tak, że czynniki mogą wzajemnie wzmacniać lub osłabiać swoje oddziaływanie [37], wobec czego zastosowanie drugiego sposobu będzie najczęściej wiązało się z niedoszacowaniem wpływu ostatecznego. Model najbliższy oddaniu stanu faktycznego będzie szacował wpływ na czas wykonywania danej roboty budowlanej jako maksymalną wartość wpływu czynnika ryzyka po uwzględnieniu jego interakcji z innymi czynnikami ryzyka [20].

Warto zauważyć, że parametr „podatność” daje dwie informacje zwrotne:

- informację, czy interakcja pomiędzy czynnikami ryzyka w ogóle zachodzi. Jeśli wartość parametru jest bliska zeru, to planista uzyskuje informację, że wpływ grupy czynników ryzyka na robotę będzie równy wpływowi pojedynczego czynnika o wpływie największym;
- informację o sile interakcji pomiędzy czynnikami ryzyka, jeśli parametr „podatność” osiąga wartości średnie lub wysokie.

Podsumowując analizę wszystkich czynników ryzyka w danej grupie czynników, jeśli parametr „podatność” danego czynnika ryzyka osiąga wartość niską, to analiza jakościowa tego czynnika jest przeprowadzana w sposób identyczny jak przy dwóch podstawowych parametrach (częstość występowania oraz wpływ na czas wykonania procesu). Jeśli wartość parametru „podatność” jest średnia lub wysoka, to należy go uwzględnić, a końcowy wpływ na proces ulega zwiększeniu w stosunku do sytuacji z rozpatrywaniem jedynie dwóch parametrów (prawdopodobieństwo zmaterializowania się oraz wpływ).

3.5. OKREŚLENIE WARTOŚCI PARAMETRU „PODATNOŚĆ”

Sam termin „podatność” jest spotykany w innych obszarach inżynierskich, takich jak chociażby mechanika budowli czy budowa maszyn, gdzie stosowane są pojęcia „podatność wzdłużna”, „podatność skrętna” czy „podatność dynamiczna” [44].

Charakterystyczne jest to, że w celu ich poprawnego użycia niezbędne jest obliczenie ich wartości liczbowych z wykorzystaniem odpowiednich wzorów. Analogicznie, w przedmiotowym modelu nie można ograniczyć się jedynie do stwierdzenia istnienia parametru „podatność”, ale należy również zaproponować wzór, który pozwoli na wyznaczenie jego wartości liczbowej.

Określenie wartości „podatności” konkretnego czynnika ryzyka powinno odbywać się dla każdej roboty budowlanej indywidualnie. Wynika z tego, że podatność danego czynnika ryzyka może przyjmować różne wartości w zależności od zaistniałych okoliczności. Przywołane okoliczności to pozostałe czynniki ryzyka (wraz z ich częstością występowania) oraz rodzaj roboty budowlanej. Zmienny charakter wartości parametru „podatność” wiąże się z faktem, że przy różnych robotach mogą występować inne zbiory czynników ryzyka, jak również sam wpływ czynników ryzyka może być inny przy różnych rodzajach robót. Tym samym czas wykonania niektórych czynności, jak np. robót ziemnych, będzie bardzo uzależniony od opadów atmosferycznych (które będą czynnikiem mającym duże przełożenie na nasilenie wpływu innych czynników ryzyka), zaś np. wewnętrzne prace instalacyjne będą praktycznie całkowicie niepodatne na wpływ potencjalnych opadów. Ponadto pomierzenie wartości parametru „podatność” w warunkach poligonowych byłoby bardzo trudne, co wiąże się z faktem, iż każde przedsięwzięcie budowlane charakteryzuje się odmiennymi warunkami realizacji, których nie można w pełni zaplanować lub przewidzieć. Stąd praktycznie niemożliwe jest wyselekcjonowanie odpowiedniej próbki budów na rzecz prowadzonych pomiarów, wobec czego informacje dotyczące interakcji pomiędzy czynnikami ryzyka powinny być pozyskiwane przy zaangażowaniu ekspertów, własnych doświadczeń, raportów z ukończonych realizacji lub literatury przedmiotu. Otrzymane informacje wygodnie jest przedstawić w formie tabelarycznej, gdzie przy każdym czynniku umieszczana jest ocena punktowa, określająca jego wpływ na pozostałe czynniki. Co więcej, należy przy każdym czynniku ryzyka uwzględnić częstość jego występowania. Rysunek 3.5

1. Czynniki ryzyka „A”	
Częstość występowania w skali 0–1, gdzie 0 to bardzo niska, a 1 bardzo wysoka częstotliwość występowania:	0,5
Wpływ czynnika ryzyka „A” na pozostałe czynniki w skali 0–1, gdzie 0 to brak, a 1 bardzo wysoki wpływ:	
Czynnika ryzyka „B”:	0,5
Czynnika ryzyka „C”:	0,6
2. Czynniki ryzyka „B”	
Częstość występowania w skali 0–1, gdzie 0 to bardzo niska, a 1 bardzo wysoka częstotliwość występowania:	0,7
Wpływ czynnika ryzyka „B” na pozostałe czynniki w skali 0–1, gdzie 0 to brak, a 1 bardzo wysoki wpływ:	
Czynnika ryzyka „A”:	0
Czynnika ryzyka „C”:	0,7
3. Czynniki ryzyka „C”	
Częstość występowania w skali 0–1, gdzie 0 to bardzo niska, a 1 bardzo wysoka częstotliwość występowania:	0,2
Wpływ czynnika ryzyka „C” na pozostałe czynniki w skali 0–1, gdzie 0 to brak, a 1 bardzo wysoki wpływ:	
Czynnika ryzyka „A”:	0,2
Czynnika ryzyka „B”:	0,7

Rys. 3.5. Przykładowa macierz ocen prawdopodobieństwa i skutków zmaterializowania się czynników ryzyka [20]

przedstawia przykładową sytuację dla trzech wybranych czynników ryzyka po oszacowaniu częstości ich występowania oraz wpływu na pozostałe czynniki [20].

Przyjęto, że wartość parametru „podatność” zostanie określona za pomocą wzoru empirycznego, będącego zmodyfikowaną średnią ważoną. Dostosowanie wzoru do przedstawionej postaci jest efektem konsultacji z kadrami kierownicząmi budowlanych przedsiębiorstw wykonawczych.

$$P_i = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} w_k \cdot c_k}{n-1} \quad (3.5)$$

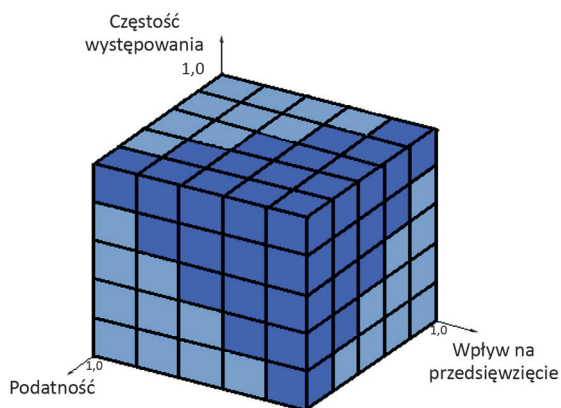
gdzie:

- P_i – podatność i -tego czynnika ryzyka na wpływ pozostałych $n - 1$ czynników ryzyka,
- w_k – wpływ k -tego czynnika ryzyka na i -ty czynnik,
- c_k – częstość występowania k -tego czynnika ryzyka,
- n – liczba czynników ryzyka.

Podstawiając do wzoru (3.5) dane z rys. 3.5, określono podatność czynnika „A” na poziomie 0,02, czynnika „B” na poziomie 0,195 oraz czynnika „C” na poziomie 0,395 w skali od 0 do 1 [20].

Możliwe jest przedstawienie wyników oceny jakościowej czynników ryzyka w formie tzw. trójwymiarowej macierzy oceny czynników ryzyka. Przykład takiej macierzy z trzema parametrami (częstością występowania, wpływem na czas wykonania procesu oraz podatnością) przedstawiono na rys. 3.6.

Co więcej, proces tworzenia macierzy ocen czynników ryzyka z trzema parametrami nie musi być bardziej czasochłonny niż klasycznej macierzy z dwoma



Rys. 3.6. Przykładowa macierz ocen czynników ryzyka macierzy z trzema parametrami: częstością występowania, wpływem na czas procesu oraz podatnością; kolory sześcianów określają, czy dany czynnik ryzyka może być tolerowany (jasny – tak, ciemny – nie) [19]

parametrami. Redukcja czasu może zostać osiągnięta w przedsiębiorstwach, które wykonują te same prace w warunkach występowania tych samych lub bardzo podobnych czynników ryzyka. Możliwe jest wtedy ustalenie stałych wartości wpływu poszczególnych czynników ryzyka na inne czynniki. Korzystając ze wzoru (3.5), możliwe jest automatyczne wyliczanie trzeciego parametru, dzięki czemu możliwa jest bardziej dokładna analiza, bez dodatkowego nakładu pracy.

3.6. SCHEMAT BLOKOWY OBRAZUJĄCY ETAP OKREŚLANIA ZAKRESU PRZEDSIĘWZIĘCIA ORAZ IDENTYFIKACJI I OCENY JAKOŚCIOWEJ CZYNNIKÓW RYZYKA

Na rys. 3.7 został przedstawiony schemat blokowy, obrazujący etap określania zakresu przedsięwzięcia oraz identyfikacji i oceny jakościowej czynników ryzyka. Jest on uszczegółowieniem ogólnego schematu blokowego, który został przedstawiony na rys. 3.4.

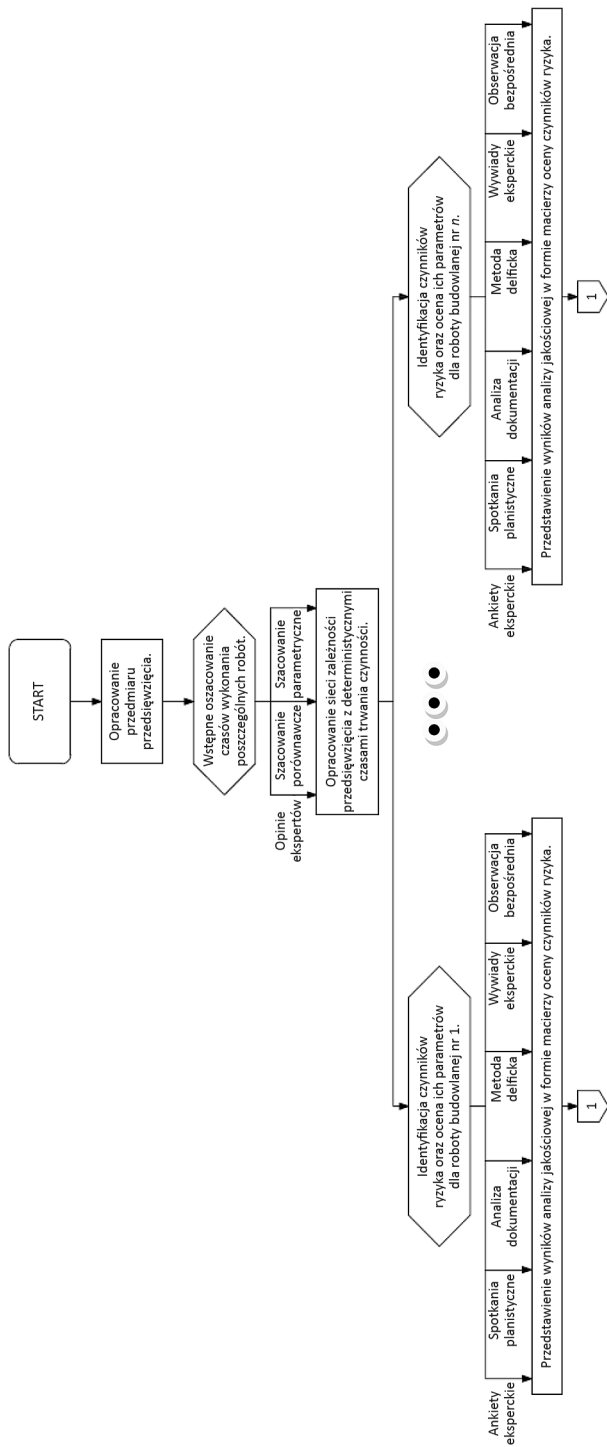
3.7. AUTORSKI ALGORYTM WNIOSKOWANIA ROZMYTEGO

Niech:

- X – przestrzeń rozważań lub zbiór nierozmyty,
- $A \subseteq X$ – zbiór rozmyty w przestrzeni X ,
- $\mu_A(x)$ – stopień (współczynnik) przynależności elementu do zbioru rozmytego A ,
- $R \subseteq X \times Y$ – relacja rozmyta pomiędzy zbiorami X i Y ,
- $R \circ S$ – złożenie relacji rozmytych R i S .

Kolejne kroki algorytmu przedstawiono poniżej:

1. Opracowywane są cztery zbiory nierozmyte, gdzie pierwsze trzy opisują parametry czynnika ryzyka przedstawione na rys. 3.4 oraz 3.5:
 - X – zbiór ocen punktowych częstości oddziaływania czynników ryzyka,
 - Y – zbiór ocen punktowych podatności czynników ryzyka,
 - V – zbiór ocen punktowych wpływu czynników ryzyka na czas wykonania procesu,
 - Z – zbiór możliwych wartości wydłużeń czasu wykonania roboty.
2. Na podstawie wiedzy i doświadczenia eksperta lub planisty budowana jest baza reguł, w której ustalane są:
 - przybliżona zależność pomiędzy częstością występowania poszczególnych czynników ryzyka a ich podatnością na wpływ pozostałych czynników ryzyka,



Rys. 3.7. Schemat blokowy określania zakresu przedsięwzięcia oraz identyfikacji i oceny jakościowej czynników ryzyka [19]

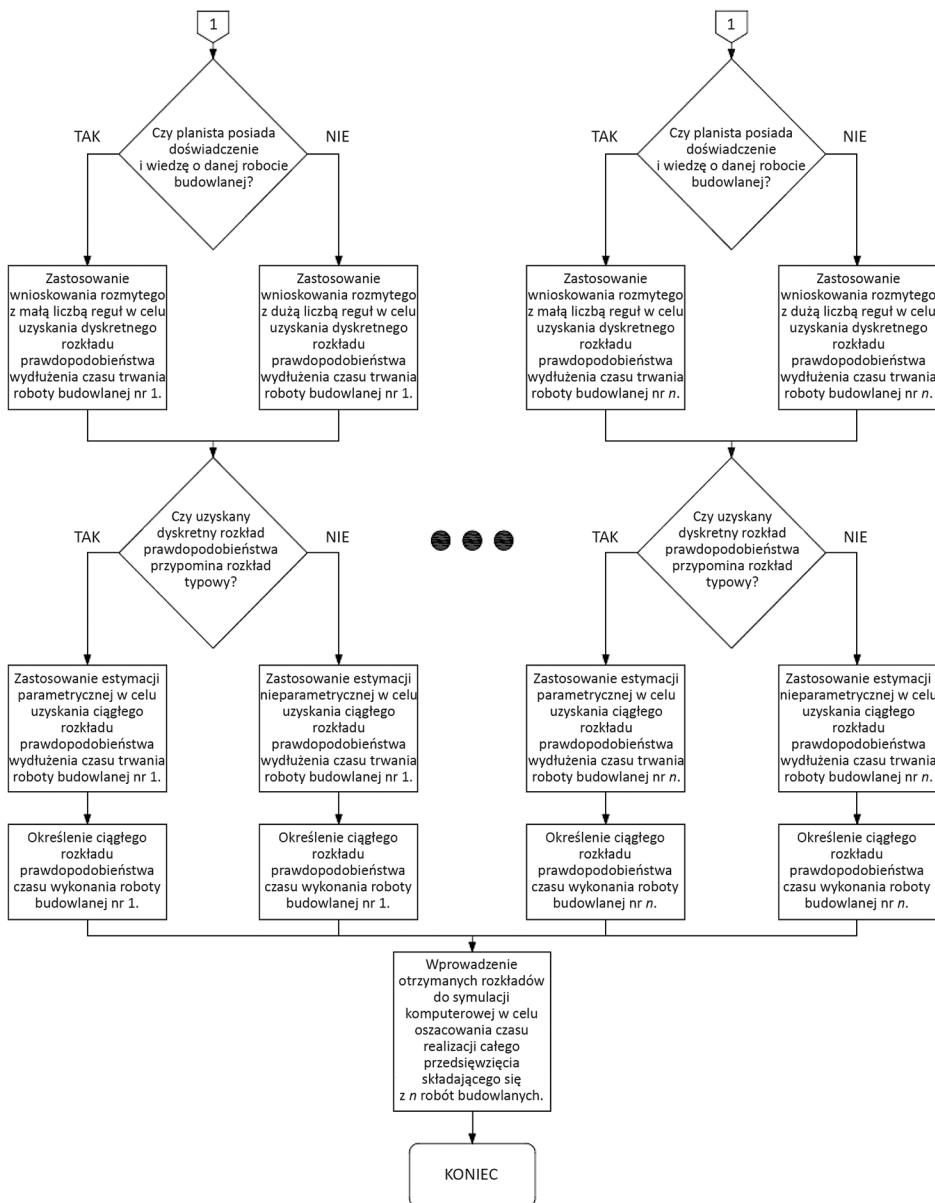
- przybliżona zależność pomiędzy podatnością poszczególnych czynników ryzyka a ich wpływem na czas procesu budowlanego,
- przybliżona zależność pomiędzy wpływem poszczególnych czynników ryzyka na wydłużenie czasu wykonania procesu.

Należy dodać, że roboty budowlane dobrze znane planiście będą wymagały takiej liczby reguł, która wyczerpuje znane mu sytuacje. Natomiast w przypadku nowych rozwiązań technologicznych, jak np. druk trójwymiarowy elementów budowlanych lub całych budynków, będzie wymagane uwzględnienie wszystkich możliwych do utworzenia reguł.

3. Opracowywana jest relacja rozmyta $R \subseteq X \times Y$, która przedstawia siłę powiązania pomiędzy częstością oddziaływania a podatnością poszczególnych czynników ryzyka.
 4. Opracowywana jest relacja rozmyta $S \subseteq Y \times V$, która przedstawia siłę powiązania pomiędzy podatnością a wpływem poszczególnych czynników ryzyka na czas wykonywania roboty budowlanej.
 5. Opracowywana jest relacja rozmyta $T \subseteq V \times Z$, która przedstawia siłę powiązania pomiędzy wpływem poszczególnych czynników ryzyka na czas wykonywania roboty budowlanej a wydłużeniem czasu wykonywania roboty budowlanej.
 6. W wyniku złożenia relacji rozmytych $R \subseteq X \times Y$ i $S \subseteq Y \times V$ otrzymywany jest dwuwymiarowy zbiór rozmyty $M = R \circ S$, który przedstawia siłę powiązania pomiędzy częstością oddziaływania i wpływem poszczególnych czynników ryzyka na czas wykonywania roboty budowlanej.
 7. W wyniku złożenia zbiorów rozmytych $M = R \circ S$ i $T \subseteq V \times Z$ opracowywany jest dwuwymiarowy zbiór rozmyty $N = M \circ T$, który przedstawia siłę powiązania pomiędzy częstością oddziaływania czynników ryzyka i wydłużeniem czasu wykonywania roboty.
 8. Określenie rozkładu dyskretnego prawdopodobieństwa wydłużenia czasu wykonywania roboty (zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Zadeha [43]).
- Omówiony wyżej algorytm jest podobny do zaproponowanych w pracach [3] oraz [15], jednakże charakteryzują go dwie bardzo ważne różnice:

- uwzględnione są trzy parametry czynników ryzyka (częstość występowania, podatność oraz wpływ na czas wykonania procesu) w miejsce wcześniej stosowanych dwóch (częstości występowania oraz wpływu na przedsięwzięcie),
- po uzyskaniu rozkładu prawdopodobieństwa wydłużenia czasu wykonywania roboty budowlanej nie jest określany najbardziej prawdopodobny czas realizacji roboty (tak jak w publikacjach [3] oraz [15]), ale przeprowadzana jest estymacja, która pozwala otrzymać ciągły rozkład prawdopodobieństwa czasu realizacji poszczególnych robót budowlanych. Następnie możliwe jest zastosowanie uzyskanych rozkładów w symulacji Monte Carlo.

3.8. SCHEMAT BLOKOWY OCENY ILOŚCIOWEJ CZYNNIKÓW RYZYKA ORAZ OSZACOWANIA CZASU REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO



Rys. 3.8. Schemat blokowy oceny ilościowej czynników ryzyka oraz oszacowania czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego [19]

Na rys. 3.8 został przedstawiony schemat blokowy określania oceny ilościowej czynników ryzyka oraz oszacowania czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Jest on uszczegółowieniem ogólnego schematu blokowego, który został przedstawiony na rys. 3.4.

3.9. ANALIZA PORÓWNAWCZA METODY Z DOTYCHCZAS STOSOWANYM PODEJŚCIEM

Dotychczasowe metody, wykorzystujące wnioskowanie rozmyte w szacowaniu czasów realizacji robót budowlanych, ograniczają się do dwóch parametrów czynników ryzyka: częstości występowania oraz wpływu na czas wykonywania roboty budowlanej [3, 15, 28, 29]. Uzupełnienie wyżej wymienionych parametrów o parametr „podatność” umożliwi prognozowanie bardziej zbliżone do stanu faktycznego. Niemniej należy odnotować fakt, że zastosowanie zaproponowanego parametru nie zawsze będzie prowadziło do wydłużenia czasu wykonywania roboty budowlanej w stosunku do modeli bazujących na dwóch parametrach, wobec czego nie będzie regułą, że otrzymane wyniki zawsze będą znacząco się różnić.

Komentarza wymaga, jakie okoliczności musiałyby zaistnieć, aby rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi przy stosowaniu modeli z dwoma parametrami a modelem z trzema parametrami były większe. Główny powód, który odpowiada za możliwe różnice w wynikach, to uaktywnienie lub nie reguł z przygotowanej bazy reguł. Dla omówionego przypadku baza reguł dla modeli z dwoma parametrami opisującymi czynniki ryzyka zawiera $5^2 = 25$ reguł, zaś baza dla modelu z trzema parametrami będzie zawierała $5^3 = 125$ reguł. Mniejszą z wymienionych baz reguł można przedstawić w formie tabelarycznej (tab. 3.4), gdzie terminy lingwistyczne zaznaczone w kolumnach opisują częstość występowania czynnika ryzyka, a zaznaczone w wierszach – wpływ czynnika na czas wykonywania roboty. Terminy lingwistyczne wewnątrz tabeli obrazują z kolei wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej.

Tabela 3.4

Tabelaryczny zapis bazy reguł dla modeli z dwoma parametrami opisującymi czynniki ryzyka

		Wpływ czynnika na czas wykonywania roboty				
Częstość występowania		B. niski	Niski	Średni	Wysoki	B. Wysoki
	B. niska	B. niska	B. niska	Niska	Średnia	Średnia
	Niska	B. niska	Niska	Średnia	Średnia	Średnia
	Średnia	Niska	Średnia	Średnia	Średnia	Wysoka
	Wysoka	Średnia	Średnia	Średnia	Wysoka	Wysoka
	B. Wysoka	Średnia	Średnia	Wysoka	Wysoka	B. wysoka

Przykładowa odczytana reguła brzmi:

JEŻELI częstość występowania czynnika jest niska I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest niski, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest niskie.

Jeżeli podatność jest niższa, równa lub niewiele większa niż częstość występowania oraz wpływ czynnika na czas wykonywania roboty, to w takiej sytuacji wydłużenie czasu wykonywanej roboty budowlanej jest takie samo jak w modelu z dwoma parametrami. Poniżej zaprezentowano przykłady reguł, które dadzą taki sam skutek:

JEŻELI częstość występowania czynnika jest niska I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest niski, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest niskie.

JEŻELI częstość występowania czynnika jest niska I podatność jest niska, I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest niski, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest niskie.

Jednakże, jeśli podatność jest wyższa od przynajmniej jednego lub dwóch pozostałych wielkości, to może ona prowadzić do zwiększenia wartości wydłużenia czasu wykonywania roboty budowlanej. Poniżej, ponownie, przedstawiono dwie reguły, ale tym razem parametr „podatność” prowadzi do modyfikacji efektu końcowego:

JEŻELI częstość występowania czynnika jest niska I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest niski, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest niskie.

JEŻELI częstość występowania czynnika jest niska I podatność jest wysoka, I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest niski, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest średnie.

To, czy parametr „podatność” doprowadzi do zmiany wyniku końcowego, jest uzależnione również od tego, jak zdefiniowano reguły w bazie. Planista ma tutaj dowolność określenia ich w sposób możliwie oddający stan faktyczny. Wobec tego, w przypadku bardziej „czułych” robót, będzie możliwe takie zamodelowanie reguł, aby już niska lub średnia podatność powodowała wzrost wydłużenia czasu realizacji roboty budowlanej.

Co więcej, parametr „podatność” może wprowadzać zmiany w wyniku nie tylko analizy ilościowej, ale również jakościowej. Jeśli przykładowo czynnik ryzyka będzie miał niską częstość występowania oraz wpływ na czas wykonywania roboty, a wysoką lub bardzo wysoką podatność, to planista będzie musiał taki czynnik uwzględnić również w analizie ilościowej (mimo że przy ocenie tylko na podstawie dwóch podstawowych parametrów zostałyby on pominięty).

Chcąc pokazać opisywane rozbieżności na przykładzie, przygotowano tabelę 3.5 z opisanymi parametrami dla czynników ryzyka, oddziałującymi na robotę budowlaną „wykop”. Warto odnotować, że uzyskano jednakowy wpływ w przypadku, gdy podatność dla czynnika jest bardzo niska oraz kiedy wartość parametru jest bardzo wysoka.

Tabela 3.5

Sytuacje dla roboty budowlanej „wykop” po uwzględnieniu zamodelowanej modyfikacji, gdzie:
BN – bardzo niskie, N – niskie, Ś – średnie, W – wysokie, BW – bardzo wysokie [19]

Czynnik ryzyka	Częstość	Podatność	Wpływ
Czynnik ryzyka „1.1” – Brak dostępu do odpowiedniej technologii:	BN, N	BN, N	BW
Czynnik ryzyka „1.2” – Brak frontu robót:	BN, N	N, Ś	BW
Czynnik ryzyka „1.3” – Brak pracowników fizycznych:	BN, N	BN, N	BW
Czynnik ryzyka „1.4” – Niewystarczająca liczba maszyn:	BN, N	BN, N	W, BW
Czynnik ryzyka „1.5” – Niewystarczająca liczba pracowników:	BN, N	BN, N	Ś, W
Czynnik ryzyka „1.6” – Opóźnienia w dostawach materiałów:	BN, N	BN, N	BW
Czynnik ryzyka „1.7” – Niski poziom doświadczenia pracowników fizycznych:	N, Ś	BN, N	N, Ś
Czynnik ryzyka „3.1” – Brak decyzji inwestora:	Ś, W	BN, N	N, Ś
Czynnik ryzyka „3.2” – Spór z inwestorem:	Ś, W	BN, N	N, Ś
Czynnik ryzyka „3.3” – Spór z podwykonawcą:	Ś, W	BN, N	Ś, W
Czynnik ryzyka „3.4” – Zmiany w projekcie na życzenie inwestora:	N, Ś	BN, N	Ś
Czynnik ryzyka „4.1” – Opóźnienia inwestora w płatnościach:	N, Ś	BN, N	W, BW
Czynnik ryzyka „4.2” – Trudności inwestora w pozyskaniu środków na finansowanie inwestycji:	BN, N	BN, N	W, BW
Czynnik ryzyka „5.1” – Błędy i niezgodności w dokumentacji projektowej:	BN, N	BN, N	Ś, W
Czynnik ryzyka „5.2” – Błędne założenia w harmonogramie:	BN, N	BN, N	W, BW
Czynnik ryzyka „5.3” – Opóźnienia we wcześniej prowadzonych pracach na danej działce roboczej:	Ś	BN, N	W, BW
Czynnik ryzyka „5.4” – Problemy z koordynacją prac:	N, Ś	BN, N	Ś, W
Czynnik ryzyka „6.1” – Niekorzystne warunki pogodowe:	W, BW	BN / BW	Ś, W

Zmiana wartości parametru „podatność” czynnika „Niekorzystne warunki pogodowe” z bardzo niskiej na bardzo wysoką poskutkowała uaktywnieniem następujących reguł:

JEŻELI częstość występowania czynnika jest wysoka I podatność jest bardzo wysoka, I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest średni, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest wysokie.

JEŻELI częstość występowania czynnika jest bardzo wysoka I podatność jest bardzo wysoka, I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest średni, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest wysokie.

JEŻELI częstość występowania czynnika jest wysoka I podatność jest bardzo wysoka, I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest wysoki, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest wysokie.

JEŻELI częstość występowania czynnika jest bardzo wysoka I podatność jest bardzo wysoka, I wpływ czynnika na czas wykonywania roboty jest wysoki, TO wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej jest bardzo wysokie.

Uaktywnione reguły spowodowały zmianę wyników końcowych dla roboty budowlanej „wykop”, co przedstawiono na rys. 3.9 oraz 3.10.

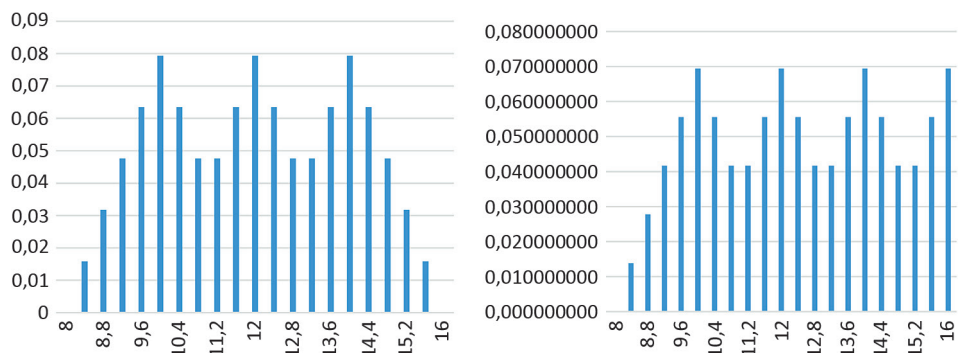
Na nowym rozkładzie widać wyraźne „przesunięcie” zmodyfikowanego wykresu w prawą stronę. Oznacza to, że robota będzie trwała dłużej niż w przypadku braku uwzględnienia parametru „podatność” lub jego niskich wartości. Porównanie dokładnych otrzymanych wartości przedstawiono w tabeli 3.6.

Tabela 3.6

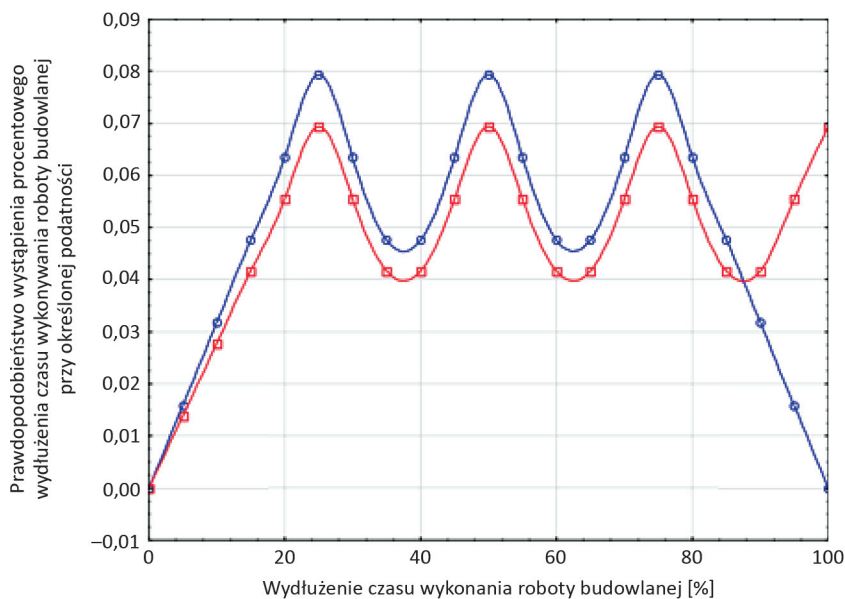
Porównanie wartości prawdopodobieństwa procentowego wydłużenia czasu realizacji roboty budowlanej „wykop” w przypadku bardzo niskiej oraz bardzo wysokiej wartości parametru podatność dla czynnika ryzyka „Niekorzystne warunki pogodowe” [19]

Procentowe wydłużenie czasu wykonywania roboty budowlanej	Prawdopodobieństwo wystąpienia procentowego wydłużenia czasu wykonywania roboty budowlanej przy bardzo niskiej podatności	Prawdopodobieństwo wystąpienia procentowego wydłużenia czasu wykonywania roboty budowlanej przy bardzo wysokiej podatności
0%	0,00	0,00
5%	0,02	0,01
10%	0,03	0,03
15%	0,05	0,04
20%	0,06	0,05
25%	0,08	0,07
30%	0,06	0,05
35%	0,05	0,04
40%	0,05	0,04
45%	0,06	0,06
50%	0,08	0,07
55%	0,06	0,06
60%	0,05	0,04
65%	0,05	0,04
70%	0,06	0,06
75%	0,08	0,07
80%	0,06	0,06

85%	0,05	0,04
90%	0,03	0,04
95%	0,02	0,06
100%	0,00	0,07



Rys. 3.9. Porównanie dyskretnych rozkładów prawdopodobieństwa czasu wykonywania roboty budowlanej „wykop”: po lewej – rozkład z bazową wartością parametru „podatność”; po prawej – rozkład po modyfikacji parametru „podatność” jednego czynnika ryzyka [19]



Rys. 3.10. Porównanie dyskretnych rozkładów prawdopodobieństwa czasu wykonywania roboty budowlanej „wykop” (dla poprawy czytelności grafiki punkty zostały połączone): kolorem niebieskim zaznaczono sytuację opisaną w studium przypadku, a kolorem czerwonym sytuację po zmodyfikowaniu parametru „podatność” jednego czynnika ryzyka [19]

3.10. PODSUMOWANIE, WNIOSKI ORAZ KIERUNKI DALSZYCH PRAC NAUKOWO-BADAWCZYCH

Przedsięwzięcie inwestycyjno-budowlane składa się z czterech etapów: programowania (określenia celu), projektowania (planowania), realizacji oraz przekazania do eksploatacji [22]. Najważniejszym z nich jest projektowanie, ponieważ:

- umożliwia ocenę, czy przyjęte założenia są realne i wychodzą naprzeciw oczekiwaniom uczestników przedsięwzięcia inwestycyjno-budowlanego [33–35],
- ma decydujący wpływ na prawidłowy przebieg kolejnych dwóch etapów.

Co więcej, realizowane są coraz bardziej złożone, skomplikowane przedsięwzięcia budowlane. Pojawiają się nowe wyzwania na płaszczyznach: technicznej, technologicznej oraz organizacyjnej. Ponadto rosną wymagania rynkowe, aby budować jeszcze szybciej i bardziej ekonomicznie niż dotychczas.

Przedstawione wyżej fakty determinują konieczność opracowywania nowych rozwiązań, które wychodzą naprzeciw stawianym problemom. Zaproponowana nowatorska metoda szacowania czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego jest pomocnym narzędziem, które w znacznym stopniu ułatwia i usprawnia planowanie procesu inwestycyjno-budowlanego.

Zaproponowane innowacje polegają na:

- uwzględnieniu skumulowanego wpływu czynników ryzyka na opóźnienia robót budowlanych,
- wprowadzeniu nowego parametru charakteryzującego czynniki ryzyka – „podatności”, który określa interakcje pomiędzy czynnikami ryzyka oddziałującymi na daną robotę budowlaną,
- wprowadzeniu do symulacji rozkładów prawdopodobieństwa czasów trwania robót budowlanych, które nie są efektem subiektywnej decyzji planisty, a przeprowadzonego wnioskowania rozmytego.

Oprócz dokładnego omówienia zastosowanych narzędzi, które składają się na zaproponowany algorytm (będący implementacją metody), w pracy został przedstawiony przykład obliczeniowy ukazujący sposób jego działania. Dodatkowym atutem opisanego podejścia jest fakt, iż nie wymaga ono maszyn o wysokich (jak na dzisiejsze realia) mocach obliczeniowych i cały proces może być przeprowadzony na zwykłym komputerze przeznaczonym do użytku codziennego na budowie.

Przedstawione w pracy rozważania prowadzą do następujących wniosków:

1. Opracowana metoda obliczeniowa umożliwia oszacowanie czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem wzajemnej podatności czynników ryzyka, z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych do modelowania skumulowanego wpływu czynników ryzyka na opóźnienia robót budowlanych.

2. Potwierdzono prawidłowość opracowanej metody obliczeniowej przez weryfikację w odniesieniu do modelu pierwotnego (bez uwzględnienia wzajemnej podatności czynników ryzyka) oraz warunków rzeczywistych realizacji przedsięwzięcia budowlanego.
3. Stwierdzono istotny wpływ wzajemnej podatności czynników ryzyka na wydłużenie czasu realizacji procesów budowlanych.
4. Pomiędzy czynnikami ryzyka zachodzą interakcje, które prowadzą do wzmocnienia ich działania. Parametrem, który pozwala uwzględnić wzajemne oddziaływanie czynników ryzyka, jest „podatność”. Umożliwia on przeprowadzenie dokładniejszej analizy jakościowej oraz ilościowej ryzyka. W analizie jakościowej możliwe jest dzięki niemu zakwalifikowanie do analizy ilościowej czynników, które we wcześniej stosowanych modelach były odrzucane z powodu niskich wartości dwóch podstawowych parametrów: częstości występowania oraz wpływu na czas wykonania. W proponowanym modelu natomiast, w przypadku odpowiednio wysokiej wartości podatności, czynnik zostanie zakwalifikowany do dalszej analizy. W analizie ilościowej podatność umożliwia probabilistyczne modelowanie czasów poszczególnych robót budowlanych, a w rezultacie całego przedsięwzięcia, w sposób dający wyniki bardziej zbliżone do tych, które faktycznie materializują się na budowie [19].

Dostrzeżono również kierunki, które wyznaczają zakres dalszych prac naukowo-badawczych. Są to:

- pogłębiona analiza interakcji pomiędzy czynnikami ryzyka. Zasadne byłyby wieloletnie badania poligonowe, dzięki którym możliwe stałoby się opracowanie uproszczonych tabel z wartościami parametru „podatność” dla różnych czynników ryzyka, oddziałujących na konkretne roboty budowlane;
- tworzenie baz reguł w procesie wnioskowania rozmytego, dzięki którym w przyszłości od zaangażowanego eksperta nie będzie wymagane budowanie bazy od początku, a jedynie wybór, weryfikacja lub dostosowanie istniejących baz;
- opracowanie odpowiedniego oprogramowania komputerowego, które zdecydowanie usprawni i przyspieszy przeprowadzenie całego algorytmu, dzięki czemu możliwe będzie jego upowszechnianie na budowach przez inżynierów budowlanych [19].

Powyższe działania pozwolą na uwydatnienie zalet zaproponowanego podejścia (uzyskanie wiarygodnych rozkładów prawdopodobieństwa realizacji robót budowlanych, będących pochodną oddziałujących czynników ryzyka) oraz redukcję lub całkowite zniwelowanie jego wad (czasochłonność operacji składowych algorytmu, wykonywanych z wykorzystaniem podstawowych programów obliczeniowych). Co więcej, możliwe jest zastosowanie innych narzędzi matematycznych w miejsce użytej techniki wnioskowania rozmytego, co pozwoli na opracowanie algorytmów weryfikacyjnych dla zaproponowanej metody.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)* (2000), Project Management Institute, Pensylwania.
- [2] Akinci B., Fisher M. (1998), *Factors affecting contractors' risk of cost overburden*, Journal of Management in Engineering, 14(1), 67–76.
- [3] Ayyub B.M., Haldar A. (1984), *Project scheduling using fuzzy set concepts*, Journal of Construction Engineering and Management, 110(2), 189–204.
- [4] Biruk S. (2015), *Analiza sieci PERT metodą symulacji komputerowej*, [w:] *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych. Rekomendowane metody i techniki*, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, KILiW, SIPB, Warszawa, 157–172.
- [5] Bożejko W., Hejducki Z., Wodecki M. (2008), *Harmonogramowanie kompleksu robót budowlanych w warunkach niepewności*, [w:] *Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie*, PTZP, Opole, 109–118.
- [6] Brzezińska I., Kaczan R., Piotrowski K., Rycielski P. (2008), *Uwarunkowania aktywności zawodowej osób z ograniczeniami sprawności: czynniki powodzenia i czynniki ryzyka*, Nauka, 4, 77–100.
- [7] Drzewiecka J., Paślawski J. (2011), *Analiza zakłóceń procesów budowlanych*, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2, 475–479.
- [8] Dubois D., Prade H. (1988), *Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty*, Plenum Press, New York.
- [9] Dytczak M., Ginda G., Gotowała B., Skrzlennik N. (2001), *Potencjał aplikacyjny metody DEMATEL i jej rozszerzeń w budownictwie*, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2, 235–240.
- [10] Dytczak M., Ginda G., Wojtkiewicz T. (2011), *Identyfikacja roli czynników opóźnień realizacji złożonych przedsięwzięć budowlanych*, Civil and Environmental Engineering, 2, 481–485.
- [11] Fiodorenko-Dumas Ż., Paprocka-Borowicz M., Rabczyński M., Majewska-Pulsakowska M. (2013), *Interakcja czynników ryzyka oraz ocena jakości życia u osób chorych na cukrzycę w zależności od podjętego leczenia*, Chirurgia Polska, 15(1), 33–45.
- [12] Głomb J., Biliński T., Furtak K. (2011a), *Inżynier budownictwa – wyzwania przyszłości*, Inżynieria i Budownictwo, 5, 273–275.
- [13] Głomb J., Biliński T., Furtak K. (2011b), *Inżynier budownictwa nowych czasów: potrzeby zmiany stylu działania*, Inżynier Budownictwa, 1, 13–20.
- [14] Górski, M., Skorupka, D., *Wybrane metody identyfikacji czynników ryzyka na tle cyklu życia projektu i budowlanego procesu inwestycyjnego*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych, 162(4), 307–324.

- [15] Ibadov N., Kulejewski J. (2010), *Rozmyte modelowanie czasów wykonania robót budowlanych w warunkach niepewności*, Czasopismo Techniczne, 1-B, 139–155.
- [16] Jaśkowski P., Biruk S. (2010), *Analiza czynników ryzyka czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych*, Czasopismo Techniczne, 1-B, 157–166.
- [17] Kaczorek K. (2016a), *Skumulowany wpływ czynników generujących opóźnienia w realizacji robót budowlanych – wyniki badań ankietowych*, Materiały Budowlane, 6, 24–26.
- [18] Kaczorek K. (2016b), *The Methodology of Carrying Out Empirical Research on the Cumulative Effect of the Factors Generating Construction Delays*, Procedia Engineering, 153, 256–260.
- [19] Kaczorek K. (2019), *Wykorzystanie teorii zbiorów rozmytych do modelowania skumulowanego wpływu czynników ryzyka na opóźnienia robót budowlanych*, rozprawa doktorska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [20] Kaczorek K., Kulejewski J., Ibadov N. (2018), *Szacowanie czasów wykonania robót budowlanych z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania czynników ryzyka*, Materiały Budowlane, 10, 55–58.
- [21] Kaczorek K., Malara J. (2018), *Analysis of the interaction between risk factors for construction works on an example of the small experience of labourers*, [in:] XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), MATEC Web of Conferences, 196.
- [22] Kietliński W. (2016), *Wybrane aspekty zarządzania procesem inwestycyjnym w budownictwie*, Przegląd Budowlany, 87(2), 46–49.
- [23] Knight F. (1921), *Risk, uncertainty and profit*, University of Boston Press, Boston.
- [24] Krzemiński P., Marcinkowski R. (2017), *Metodologiczne aspekty projektowania systemu zamówień publicznych na roboty budowlane*, Przegląd Budowlany, 7–8, 56–60.
- [25] Leśniak A., Plebankiewicz E. (2010), *Opóźnienia w robotach budowlanych*, Zeszyty Naukowe WSO WL, 157(3), 332–339.
- [26] Moselhi O., El-Rayes K. (2002), *Analyzing Weather Related Construction Claims*, Cost Engineering, 44(8), 12–19.
- [27] Moselhi O., Gong D., El-Rayes K. (1997), *Estimating weather impact on the duration of construction activities*, Canadian Journal of Civil Engineering, 24(3), 359–366.
- [28] Oliveros A.V.O., Fayek A.R. (2005), *Fuzzy logic approach activity delay analysis and schedule updating*, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 131(1), 42–51.

- [29] Pan N.F., Hadipriono F.C., Whitlatch E. (2005), *A fuzzy reasoning knowledge-based system for assessing rain impact in highway construction scheduling: Part I. Analytical model*, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 16, 157–167.
- [30] Plebankiewicz E. (2007), *Podstawy kosztorysowania robot budowlanych*, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [31] Połowski M. (2010), *Jak skrócić zagrożony termin zakończenia robót na obiekcie budowlanym? Strategie zarządzania ryzykiem w przedsiębiorstwie*, [w:] *Ryzyko międzynarodowej kooperacji przedsiębiorstwem*, Bydgoszcz, 340–351.
- [32] *PRINCE2TM – Skuteczne zarządzanie projektami* (2009), TSO, Warszawa.
- [33] Radziszewska-Zielina E., Szewczyk B. (2016), *Metoda oceny poziomu współpracy między uczestnikami przedsięwzięć budowlanych*, Materiały Budowlane, 6, 102–104.
- [34] Radziszewska-Zielina E., Szewczyk B. (2017a), *Analiza wrażliwości modelu sterowania relacjami partnerskimi na zmiany funkcji przynależności zmiennych*, Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 26(2), 219–225.
- [35] Radziszewska-Zielina E., Szewczyk B. (2017b), *Examples of actions that improve partnering cooperation among the participants of construction projects*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 251(1).
- [36] Rogalska M. (2016), *Wieloczynnikowe modele w prognozowaniu czasu procesów budowlanych*, Politechnika Lubelska, Lublin.
- [37] Rogalska M., Czarnigowska A., Hejducki Z., Nahorny T. (2006), *Metody wyznaczania czasu trwania procesów budowlanych z uwzględnieniem pogodowych czynników ryzyka*, Przegląd Budowlany, 77(1), 37–42.
- [38] Sakai Y. (2017), *On Environmental Risk Management: The Interactions of Economic and Noneconomic Factors*, [in:] Shibusawa H., Sakurai K., Mizunoya T., Uchida S. (eds), *Socioeconomic Environmental Policies and Evaluations in Regional Science*, New Frontiers in Regional Science: Asian Perspectives, 24, Springer, Singapore.
- [39] Skorupka D. (2007), *Metoda oceny ryzyka realizacji przedsięwzięć inżyniersko-budowlanych*, Zeszyty Naukowe WSOWL, 145(3), 79–88.
- [40] Sobotka A. (2010), *Logistyka przedsiębiorstw i przedsięwzięć budowlanych*, Wydawnictwo AGH, Kraków.
- [41] *System rekomendacji. Słownik pojęć i terminów* (2015), Ośrodek Rozwoju Edukacji, Warszawa.
- [42] Tarczyński W., Mojsiewicz M. (2001), *Zarządzanie ryzykiem*, PWE, Warszawa.
- [43] Zadeh L. (1968), *Probability Measures of Fuzzy Events*, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 23, 28–44.
- [44] Żółtowski B., Łukasiewicz M. (2012), *Diagnostyka drganiowa maszyn*, ITE, Radom.

Źródła internetowe

[45] <http://www.businessdictionary.com>.

[46] <http://www.who.int>.

4. HARMONOGRAMOWANIE INWESTYCJI KOLEJOWYCH W POLSCE Z UWZGLĘDNIENIEM RYZYKA W TRAKCIE ICH REALIZACJI

Jan Kowalski¹

4.1. WSTĘP

W budownictwie stosowane są różne podejścia do zarządzania ryzykiem. Do najbardziej znanych należą metodyki zarządzania ryzykiem według PRINCE2 [30] oraz PMI [26]. Spośród stosowanych podstawowych metod można wymienić: metodę planowania sieciowego CPM (*Critical Path Method*), która ma charakter deterministyczny, metodę PERT (*Program Evaluation and Review Technique*), wprowadzająca element losowości czasu wykonania zadań, metodę GERT (*Graphical Evaluation and Review Technique*) i metodę GERTS (*Graphical Evaluation and Review Technique Simulation*), która wykorzystuje m.in. generatory liczb losowych, czy metodę CYCLONE (*Cyclic Operations Network*) [29]. Niemniej jednak tradycyjne metody harmonogramowania, uwzględniające warunki ryzyka, oparte są w znacznej mierze na doświadczeniu i intuicji osób, które je stosują. Nie wykorzystują one właściwych baz danych o rzeczywistym wpływie czynników ryzyka. W sytuacji gdy obiekty budowlane stają się coraz bardziej złożone, a wymagania inwestorów co do jakości, czasu i kosztu ich wykonania stale rosną, takie podejście do zarządzania ryzykiem może w najbliższym czasie nie wystarczyć.

W związku z tym, że ciągle poszukuje się w miarę prostej, możliwej do aplikacji w praktyce budowlanej metody zarządzania ryzykiem wykonawczym, autor prezentuje w pracy kompleksową, autorską metodę, pozwalającą wiarygodnie planować przedsięwzięcia kolejowe z uwzględnieniem specyficznych warunków występujących na terenie Polski. Uwzględnia ona wpływ potencjalnych, zidentyfikowanych i sklasyfikowanych wcześniej zagrożeń [13, 14, 27, 28].

Ponieważ nauka o ryzyku jest stosunkowo nowa, a używane w literaturze przedmiotu [2, 4, 6–9, 16–20, 22, 36–38, 40–42] terminy nie zawsze są jednoznaczne, autor wskazuje definicje podstawowych pojęć, których używa w pracy:

¹ Katedra Hydrotechniki, Technologii i Organizacji Robót, Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, e-mail: jan_kowalski@sggw.edu.pl.

- ryzyko – możliwość wystąpienia przez nasze działanie, zaniechanie lub siły natury przewidywalnego w określonym czasie negatywnego w skutkach niepożądanego zdarzenia losowego, którego efekt i prawdopodobieństwo wystąpienia jesteśmy w stanie oszacować,
- zdarzenie niepożądane – wymierna forma zrealizowania się jednego lub kilku czynników ryzyka, skutkująca nieosiągnięciem w pełni lub wcale zamierzonego celu, a więc powodująca jakąś stratę,
- czynnik ryzyka (zagrożenie) – potencjalne źródło powstania zdarzenia niepożądanego, które może, ale nie musi, wystąpić w przyszłości [15].

W pracy przedstawiono autorską metodę harmonogramowania inwestycji kolejowych w Polsce, opracowaną w ramach doktoratu [12], umożliwiającą opracowanie harmonogramów realizacji robót kolejowych w Polsce, z uwzględnieniem rzeczywistych zagrożeń wynikających z ich specyfiki, wpływających na czas realizacji poszczególnych procesów i całego przedsięwzięcia.

4.2. BADANIA WŁASNE W ZAKRESIE ROZPOZNANIA CZYNNIKÓW RYZYKA

4.2.1. IDENTYFIKACJA CZYNNIKÓW RYZYKA

Pomocna dla zespołu realizującego przedsięwzięcie budowlane jest sytuacja, gdy zespół ten posiada uprzednio zdefiniowaną listę potencjalnych czynników ryzyka. Niestety, w przypadku inwestycji kolejowych takich list nie ma. Uzupełniając lukę w badaniach nad identyfikacją czynników ryzyka, autor prezentuje własne badania zrealizowane na terenie Polski, obejmujące inwestycje kolejowe. Badanie zostało przeprowadzone w formie eksperckiej ankiety w czterech etapach. Cały proces badawczy został poprzedzony analizą literatury [3, 5, 11, 21, 23–25, 32–35, 39]. Na tej podstawie zaprojektowano badania, wykonano je i zinterpretowano uzyskane wyniki.

W pierwszym etapie zaplanowano i wykonano badanie od strony merytorycznej oraz technicznej. Sprecyzowano cel badań, zarówno diagnostyczny (co i dlaczego badamy), jak i praktyczny (komu i czemu badanie ma służyć). Określono zbiorowość statystyczną (próbę badawczą) i opracowano kwestionariusz ankiety. Po wykonaniu badania pilotażowego w drugim kroku zgromadzono ilościowy materiał statystyczny. Kolejno uporządkowano, pogrupowano i przeanalizowano pozyskane dane statystyczne.

Zaproponowana w niniejszym badaniu lista potencjalnych czynników ryzyka została ograniczona do zagrożeń występujących w trakcie przygotowania i realizacji polskich inwestycji kolejowych. Piętnaście z nich dotyczyło etapu projektowania, jedenaście zaś etapu realizacji prac. Kwestionariusz został rozesłany do

respondentów w 120 egzemplarzach pocztą elektroniczną. Próbę badawczą stanowili przede wszystkim pracownicy przedsiębiorstw budowlanych, pełniący samodzielne funkcje techniczne w budownictwie. Grupa badawcza obejmowała również reprezentantów inwestora instytucjonalnego (PKP PLK SA). W efekcie uzyskano 112 egzemplarzy poprawnie wypełnionych kwestionariuszy w zakresie etapu projektowania oraz 85 egzemplarzy w zakresie etapu realizacji przedsięwzięcia.

4.2.2. ANALIZY STATYSTYCZNE

Częstość występowania i siła oddziaływania czynników, które mogą wpływać na powstawanie opóźnień w terminie zakończenia budowy oraz wzrost kosztów ich realizacji, sprawiają, iż określenie tych odchyleń od planu bazowego jest problemem bardzo złożonym, zwłaszcza gdy czynniki ryzyka nie są pogrupowane, chociażby ze względu na skalę ich wpływu.

Przeprowadzone analizy pomogły wskazać skalę odnotowanego efektu w postaci wpływu czynników ryzyka, np. na czas realizacji przedsięwzięcia. Dokonanie tych analiz było konieczne, ponieważ nie można było jednakowo oceniać zagrożenia związanego np. z „uchybieciem przy sporządzaniu materiałów przetargowych” czy „problemem ze zbyt dużą liczbą instytucji zewnętrznych biorących udział w procesie inwestycyjnym”.

W celu udzielenia odpowiedzi na postawione pytania badawcze wykonano analizy statystyczne przy użyciu pakietu IBM SPSS Statistics 23. Za jego pomocą przeprowadzono testy χ^2 oraz jednoczynnikową analizę wariancji w schemacie międzygrupowym, polegającą na porównaniu wariancji międzygrupowej z wariancją wewnątrzgrupową w celu zweryfikowania, czy waga określonych czynników ryzyka jest podobna czy różna. W schemacie jednoczynnikowym (jednoczynnikowa analiza wariancji) sprawdzone zostało, czy jedna zmienna niezależna wpływała na wyniki drugiej zmiennej zależnej. W przypadku uzyskania z analizy wariancji wyniku istotnego statystycznie wykonywano testy post hoc w celu weryfikacji, które konkretne wydarzenia są oceniane jako bardziej lub mniej zagrażające sprawnej realizacji od innych. Za pomocą współczynnika V Craméra określono siłę odnotowanych efektów. Za poziom istotności statystycznej uznano klasyczny poziom $p < 0,05$.

Analizy statystyczne przeprowadzono oddzielnie dla etapu projektowania oraz etapu realizacji robót. W tabeli 4.1 zaprezentowano przykładowe wyniki w zakresie wag dla określonych czynników ryzyka oddziałujących na etapie projektowania.

Następnie zweryfikowano, czy waga określonych problemów jest podobna czy różna. Wykonano jednoczynnikową analizę wariancji w schemacie międzygrupowym. Odnotowano wynik istotny statystycznie. Z tego względu możliwa była analiza testem post hoc Sidaka.

Tabela 4.1

Wyniki analiz statystycznych. Etap projektowania

Lp.	Czynniki ryzyka	Waga określonych zdarzeń, gdzie: M – ważność poszczególnych czynników ryzyka, SD – odchylenie standardowe		Parametry statystyczne, gdzie: F – testy Fishera, p – istotność statystyczna, η^2 – siła odnotowanego efektu
		M	SD	
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
1	Uchybienia przy sporządzeniu materiałów przetargowych (SIWZ, OPZ, PFU)	5,90	3,18	$F(14, 1665) = 7,79$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,06$
2	Niewłaściwe oszacowanie terminu opracowania dokumentacji projektowej przez zamawiającego	5,00	3,75	
3	Zbyt duża liczba instytucji zewnętrznych biorących udział w procesie inwestycyjnym	4,35	2,87	
4	Konieczność dokonania odstępstw od wytycznych z etapu przetargu	4,68	2,76	
5	Błędy w koncepcyjnej dokumentacji projektowej z etapu przetargu	4,47	3,18	
6	Problemy z pozyskaniem aktualnych map do celów projektowych z kolejowych ośrodków geodezyjnych	6,48	3,28	
7	Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z zewnętrznymi interesariuszami (zarządcy dróg, urzędy itp.)	5,36	2,86	
8	Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z wewnętrznymi spółkami z Grupy PKP SA	4,60	2,85	
9	Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z właścicielami infrastruktury technicznej zlokalizowanej na terenach PKP SA	4,34	2,73	
10	Długotrwałe procedury uzgadniania dokumentacji projektowej wewnątrz PKP PLK	5,11	2,96	
11	Problemy z akceptacją dokumentacji projektowej przez inżyniera kontraktu	3,21	2,94	
12	Czy zamawiający posiadał w terminie komplet prawnych dokumentów dotyczących terenu przewidzianego pod inwestycję?	4,46	3,10	
13	Czy pozyskania decyzji pozwoleń na budowę były opóźnione z winy zamawiającego?	3,51	3,35	
14	Czy pozyskania decyzji pozwoleń na budowę były opóźnione z winy projektanta?	4,21	3,63	
15	Czy pozyskania decyzji pozwoleń na budowę były opóźnione z winy zewnętrznej jednostki, np. dodatkowe uzgodnienia?	5,03	3,62	

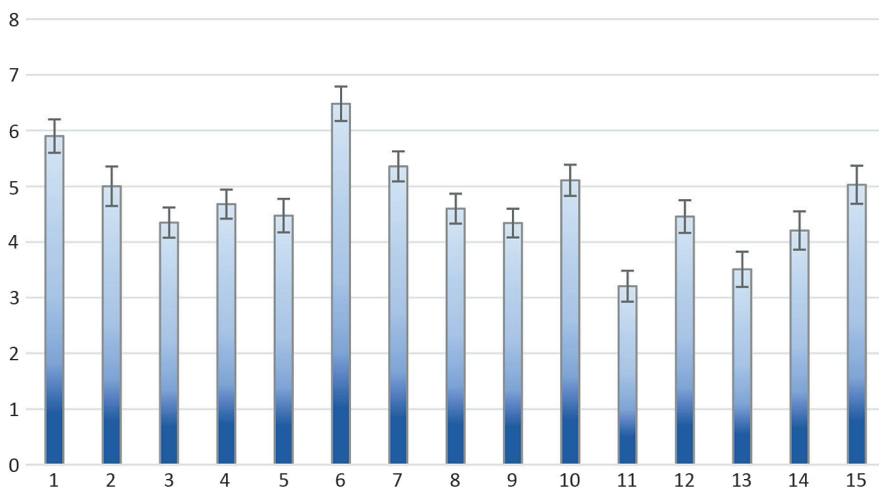
Źródło: oprac. własne

Kolejno odnotowano wiele różnic istotnych statystycznie. Ze względu na ich liczbę poniżej zaprezentowano je w formie przykładowego spisu:

- uchybienie przy sporządzaniu materiałów przetargowych było oceniane jako bardziej problematyczne niż: zbyt duża liczba instytucji zewnętrznych biorących udział w procesie inwestycyjnym ($p = 0,024$); problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z właścicielami infrastruktury technicznej ($p = 0,023$); problemy z akceptacją dokumentacji projektowej przez inżyniera kontraktu ($p < 0,001$); opóźnienia pozyskania decyzji pozwoleń na budowę z winy zamawiającego ($p < 0,001$) oraz projektanta ($p = 0,006$);
- możliwość niewłaściwego oszacowania terminu opracowania dokumentacji projektowej przez zamawiającego było istotnie mniej ważne od problemów z pozyskaniem aktualnych map do celów projektowych z kolejowych ośrodków geodezyjnych ($p = 0,046$), a ważniejsze od problemów z akceptacją dokumentacji projektowej przez inżyniera kontraktu ($p = 0,002$) oraz opóźnienia pozyskania decyzji pozwoleń na budowę z winy zamawiającego ($p = 0,043$);
- zbyt duża liczba instytucji zewnętrznych biorących udział w procesie inwestycyjnym była mniej ważna od problemów z pozyskaniem aktualnych map do celów projektowych z kolejowych ośrodków geodezyjnych ($p < 0,001$);
- błędy w koncepcyjnej dokumentacji projektowej z etapu przetargu były mniej ważne od problemów z pozyskaniem aktualnych map do celów projektowych z kolejowych ośrodków geodezyjnych ($p < 0,001$);
- problemy z pozyskaniem aktualnych map do celów projektowych z kolejowych ośrodków geodezyjnych były ważniejsze od problemów z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z zewnętrznymi interesariuszami ($p = 0,001$);
- problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z zewnętrznymi interesariuszami były ważniejsze od problemów z akceptacją dokumentacji projektowej przez inżyniera kontraktu ($p < 0,001$) oraz opóźnień pozyskania decyzji pozwoleń na budowę z winy zamawiającego ($p = 0,001$).

Uzyskane wyniki dla przykładowego etapu projektowania zaprezentowano w formie graficznej na rys. 4.1. W kolumnie pionowej opisano wagę poszczególnych czynników ryzyka. Numeracja pozioma poszczególnych czynników ryzyka jest zgodna z wartościami z tabeli 4.1.

Ostatecznie, na podstawie literatury, autorskiego badania ankietowego oraz wyników z przeprowadzonych analiz statystycznych, opracowano końcową listę czynników ryzyka, mogących negatywnie wpływać na czas i koszt realizacji polskich przedsięwzięć kolejowych. Wytypowano najważniejsze zidentyfikowane czynniki ryzyka, oddzielnie dla każdego etapu realizacji przedsięwzięcia budowlanego.



Rys. 4.1. Waga określonych czynników ryzyka na etapie projektowania. Źródło: oprac. własne

A. Na etapie projektowania wyróżniono najbardziej istotne czynniki ryzyka:

1. Uchybienia przy sporządzeniu materiałów przetargowych (SIWZ, OPZ, PFU).
2. Niewłaściwe oszacowanie terminu opracowania dokumentacji projektowej przez zamawiającego.
3. Zbyt duża liczba instytucji zewnętrznych biorących udział w procesie inwestycyjnym.
4. Konieczność dokonania odstępstw od wytycznych z etapu przetargu.
5. Błędy w koncepcyjnej dokumentacji projektowej z etapu przetargu.
6. Problemy z pozyskaniem aktualnych map do celów projektowych z kolejowych ośrodków geodezyjnych.
7. Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z zewnętrznymi interesariuszami.
8. Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z wewnętrznymi spółkami z Grupy PKP SA.
9. Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z właścicielami infrastruktury technicznej zlokalizowanej na terenach PKP.
10. Długotrwałe procedury uzgadniania dokumentacji projektowej wewnątrz PKP PLK SA.
11. Problemy z akceptacją dokumentacji projektowej przez inżyniera kontraktu.
12. Brak posiadania przez zamawiającego kompletu prawnych dokumentów dotyczących terenu przewidzianego pod inwestycję.
13. Pozyskanie decyzji pozwoleń na budowę może być opóźnione z winy zamawiającego.
14. Pozyskanie decyzji pozwoleń na budowę może być opóźnione z winy projektanta.

15. Pozyskanie decyzji pozwoleń na budowę może być opóźnione z winy zewnętrznej jednostki, np. dodatkowe uzgodnienia.

B. Na etapie realizacji robót wyróżniono najbardziej istotne czynniki ryzyka:

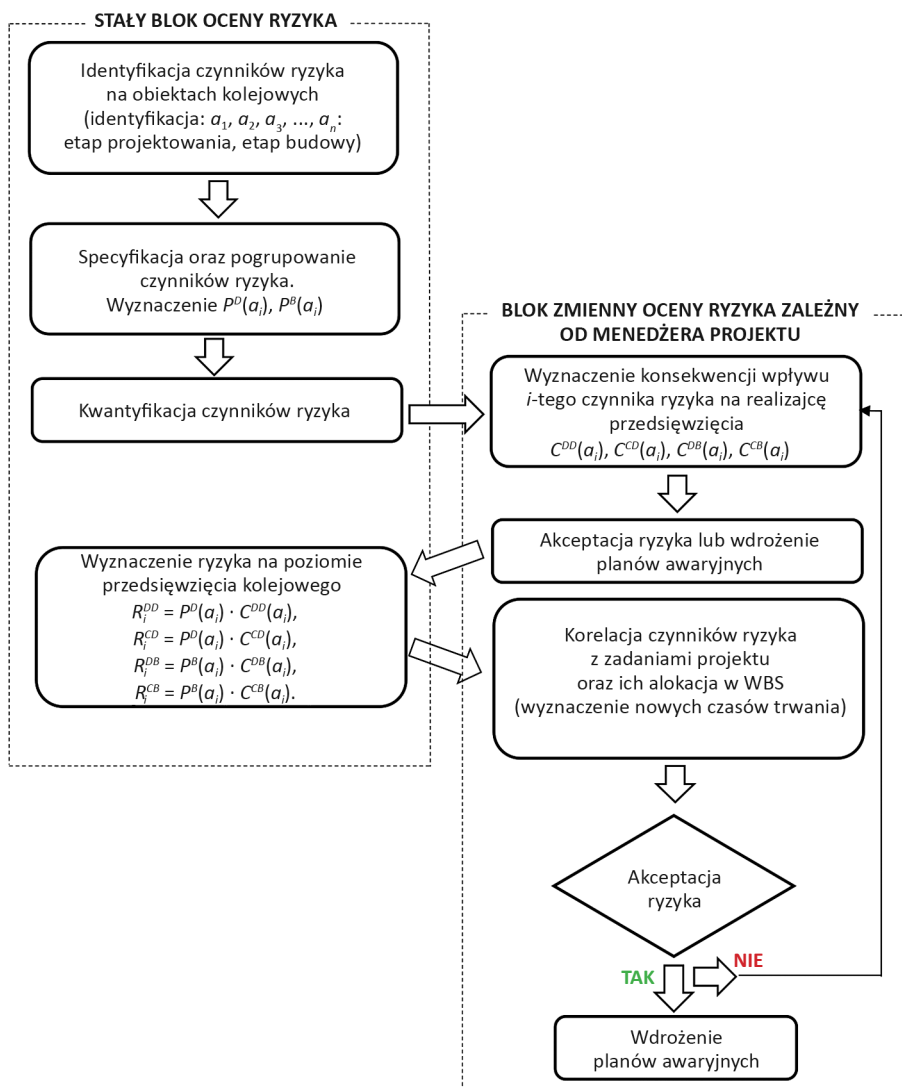
1. Uchybienia przy sporządzeniu materiałów przetargowych (SIWZ, OPZ, PFU).
2. Niewłaściwie oszacowanie terminu opracowania dokumentacji projektowej przez zamawiającego.
3. Zbyt duża liczba instytucji zewnętrznych biorących udział w procesie inwestycyjnym.
4. Warunki umowy niedostosowane do specyfiki kontraktu (FIDIC czerwony, FIDIC żółty, inne).
5. Źle oszacowane koszty inwestycji przez wykonawcę (problemy finansowe wykonawcy).
6. Trudności w przygotowaniu pod względem formalnoprawnym i technicznym terenów pod inwestycję.
7. Wewnętrzne przepisy PKP PLK SA nieskoordynowane z zapisami kontraktów.
8. Błędy w dokumentacji projektowej.
9. Problemy z dostawą materiałów i innych zasobów.
10. Przyznawanie krótszych zamknięć torowych wykonawcy.
11. Problemy z nieaktualnymi materiałami geodezyjnymi (liczne kolizje z niezainwentaryzowaną infrastrukturą podziemną).

4.3. METODA HARMONOGRAMOWANIA INWESTYCJI KOLEJOWYCH W POLSCE

4.3.1. ZAŁOŻENIA I OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA METODY

Podstawowym założeniem autora było opracowanie metody pozwalającej na uzyskanie wiarygodnych terminów oraz kosztów realizacji procesów i etapów przedsięwzięcia, której implementacja w trakcie realizacji dużych przedsięwzięć kolejowych nie będzie wymagała gromadzenia zbyt licznych danych i zaawansowanych obliczeń. Metodę nazwano RMRF (*Railway Matrix of Risk Factors*). Przy użyciu zaproponowanej metody wpływ zidentyfikowanych czynników ryzyka na realizację przedsięwzięcia kolejowego może być oceniany zarówno z punktu widzenia inwestorów, jak i wykonawców robót oraz biur projektowych. Ocena ryzyka dotyczy systemów realizacji kontraktu Projektuj lub Buduj oraz Projektuj i Buduj. Ogólne założenie metody polega na korelacji zidentyfikowanych wcześniej przez autora w skali kraju zagrożeń, występujących podczas realizacji inwestycji kolejowych, ze specyfiką i warunkami wykonania nowo planowanych inwestycji. Autor

ma świadomość wprowadzonych w proponowanej metodzie uproszczeń, ponieważ metoda z założenia jest kompromisem pomiędzy kompleksową, metodologiczną analizą danych a praktyczną (w miarę prostą i logiczną) możliwością implementacji metody w trakcie trwania przedsięwzięcia budowlanego. Proponowana metoda jest również w pewnym sensie metodą modułową, ponieważ została zaprojektowana w taki sposób, aby w przyszłości, gdy zmieni się struktura zbioru czynników ryzyka, była możliwa ich ponowna ocena (ilościowa, jakościowa), a wypracowany schemat metody pozostał bez zmian (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Model ideowy proponowanej metody RMRF. Źródło: oprac. własne

Model ideowy metody (rys. 4.2) przedstawia kolejne kroki obliczeniowe, przypisane do dwóch głównych bloków. Pierwszy z nich to blok stały (analiza ilościowa), niepodlegający zmianom w trakcie jej wdrażania. Drugi blok jest zmienny (analiza jakościowa) i przyjmowane w nim oceny zagrożeń w znacznym stopniu zależą od decyzji menadżera tworzącego harmonogram.

Ostatecznie menadżer dokonuje kompleksowej oceny wpływu każdego czynnika ryzyka, zidentyfikowanego przez autora metody, i ich korelacji z poszczególnymi zadaniami zawartymi w strukturze WBS (*Work Breakdown Structure*) harmonogramu. Menadżer zakłada również, czy dane zidentyfikowane zagrożenie będzie wpływać bezpośrednio na czas i/lub koszt rzeczywistych zadań harmonogramu oraz na cały harmonogram.

Metoda, przez szczegółową korelację czynników z właściwymi podzadaniami struktury WBS, pozwoli określić możliwie najbardziej prawdopodobne terminy zakończenia i/lub koszty poszczególnych etapów robót oraz całego przedsięwzięcia budowlanego. Metoda nie ingeruje w strategię wdrażania planów awaryjnych.

4.3.2. ILOŚCIOWA ANALIZA RYZYKA

Analiza ilościowa wiąże się ze ścisłym podejściem do mierzenia ryzyka. Przedstawia się ją jako kombinację częstości wystąpienia (lub prawdopodobieństwa) stanu lub zdarzenia niepożądanego oraz konsekwencji związanych z tą sytuacją. Można to zapisać w dużym uproszczeniu, sprowadzając do podstawowej postaci wzoru [1]:

$$R_{WW} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot c_i \quad (4.1)$$

gdzie:

- R_{WW} – wartość ważona ryzyka,
- p_i – częstość wystąpienia (prawdopodobieństwo) i -tego ryzyka,
- c_i – konsekwencje (skutek) wystąpienia i -tego ryzyka,
- n – liczba zidentyfikowanych i przyjętych do analizy różnych rodzajów ryzyka.

Należy zauważyć, że wartość ryzyka w dużej mierze zależy od konsekwencji zajścia zdarzenia niepożądanego. Tak więc ryzyko wystąpienia katastrofy o bardzo małym prawdopodobieństwie (np. zniszczenie zapory wodnej), ale powodującej bardzo poważne straty (np. zalanie terenu gęsto zaludnionego czy uprzemysłowionego), może okazać się bardzo duże. Jednak pęknięcie tej samej zapory, przy takim samym prawdopodobieństwie wystąpienia tego zdarzenia, w sytuacji gdy chroni ona tylko niezamieszkane tereny rolnicze, pociąga za sobą znacznie mniejsze ryzyko [31].

W celu uzyskania poprawnego wyniku należy zatem dysponować odpowiednio dużą, jednorodną oraz wiarygodną próbą danych, pozwalającą określić prawdopodobieństwo wystąpienia analizowanego zagrożenia. Wówczas wynik takiej analizy ryzyka będzie najbardziej precyzyjny oraz obciążony możliwie najmniejszym błędem.

Miara ilościowa jest powszechnie utożsamiana z możliwością ujęcia ryzyka w postaci ścisłej formuły oraz jego obliczenia. Istnieje wiele innych miar, opisanych bardziej lub mniej rozbudowanymi wzorami, jednak są to wszystko podobne rozwiązania, różniące się stopniem uszczegółowienia dla konkretnego przypadku obliczeniowego [10].

Wykonanie ilościowej analizy ryzyka dla przyszłych inwestycji kolejowych wymaga, aby poszczególne zagrożenia miały ustalone wymierne wagi. Obliczając te wartości, autor starał się uwzględnić wszystkie elementy oceny ekspertów, jakie były brane pod uwagę w analizowanej ankiecie, a więc ocenę ich ważności (M), pewność oszacowania (SD) oraz ich wpływ na czas i koszt planowanej inwestycji.

Oceny ilościowej poszczególnych czynników ryzyka dokonano na podstawie analizy statystycznej uzyskanych wyników badań i przyjętych założeń. Poniżej zaprezentowano zastosowane formuły obliczeniowe.

W celu określenia wag każdego zagrożenia autor dokonał obliczeń z zastosowaniem równań (4.2–4.27), będących częścią autorskiej metody. Na początku dane zostały znormalizowane, a następnie poszczególne znormalizowane wartości były kolejno agregowane.

- Standaryzowany wpływ i -tego czynnika ryzyka QD_i obliczono zgodnie z następującymi wzorami:
 - Etap projektowania:

$$QD_i^D = \frac{QnD_i^D}{I^D} \quad (4.2)$$

$$QC_i^D = \frac{QnC_i^D}{I^D} \quad (4.3)$$

- Etap realizacji:

$$QD_i^B = \frac{QnD_i^B}{I^B} \quad (4.4)$$

$$QC_i^B = \frac{QnC_i^B}{I^B} \quad (4.5)$$

gdzie:

- QD_i^D, QD_i^B – standaryzowany wpływ i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływający na czas trwania zadań,
- QC_i^D, QC_i^B – standaryzowany wpływ i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływający na koszt zadań,

- QnD_i^D, QnD_i^B – niestandardyzowany wpływ i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływający na czas trwania zadań (liczba wskazań w ankietach),
- QnC_i^D, QnC_i^B – niestandardyzowany wpływ i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływający na koszt zadań (liczba wskazań w ankietach),
- I^D, I^B – liczba ankiet dotyczących oceny czynników ryzyka na etapie projektowania (I^D) lub etapie realizacji (I^B).
- Współczynnik zmienności oceny i -tego czynnika ryzyka:
 - Etap projektowania:

$$V_i^D = \frac{SD_i^D}{M_i^D} \quad (4.6)$$

- Etap realizacji:

$$V_i^B = \frac{SD_i^B}{M_i^B} \quad (4.7)$$

gdzie:

- V_i^D, V_i^B – współczynnik zmienności oceny i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji,
- SD_i^D, SD_i^B – odchylenie standardowe oceny i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji,
- M_i^D, M_i^B – średnia punktowej oceny i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, w skali 0–10.
- Ostateczna waga dla danego i -tego czynnika ryzyka:
 - Etap projektowania:

$$WD_i^D = QD_i^D \cdot [M_i^D - (M_i^D \cdot V_i^D)] \quad (4.8)$$

$$WC_i^D = QC_i^D \cdot [M_i^D - (M_i^D \cdot V_i^D)] \quad (4.9)$$

- Etap realizacji:

$$WD_i^B = QD_i^B \cdot [M_i^B - (M_i^B \cdot V_i^B)] \quad (4.10)$$

$$WC_i^B = QC_i^B \cdot [M_i^B - (M_i^B \cdot V_i^B)] \quad (4.11)$$

gdzie:

- WD_i^D, WD_i^B – waga i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływająca na czas trwania zadań, ustalona na podstawie ocen ekspertów,

WC_i^D, WC_i^B – waga i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływająca na koszt zadań, ustalona na podstawie ocen ekspertów.

- Znormalizowana waga i -tego czynnika ryzyka:
 - Etap projektowania:

$$WDn_i^D = \frac{WD_i^D}{\sum_{i=1}^{N^D} WD_i^D}; \quad \sum_{i=1}^{N^D} WDn_i^D = 1 \quad (4.12)$$

$$WCn_i^D = \frac{WC_i^D}{\sum_{i=1}^{N^D} WC_i^D}; \quad \sum_{i=1}^{N^D} WCn_i^D = 1 \quad (4.13)$$

- Etap realizacji:

$$WDn_i^B = \frac{WD_i^B}{\sum_{i=1}^{N^B} WD_i^B}; \quad \sum_{i=1}^{N^B} WDn_i^B = 1 \quad (4.14)$$

$$WCn_i^B = \frac{WC_i^B}{\sum_{i=1}^{N^B} WC_i^B}; \quad \sum_{i=1}^{N^B} WCn_i^B = 1 \quad (4.15)$$

gdzie:

$WDn_i^D, WCn_i^D, WDn_i^B, WCn_i^B$ – znormalizowana waga i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływająca na czas oraz koszt, ustalona na podstawie ocen ekspertów,

$i = 1, \dots, N^D, 1, \dots, N^B$ – N to liczba zagrożeń w tablicy etapu Projektuj lub etapu Buduj.

- Ocena ryzyka dla poszczególnych rodzajów ryzyka:
 - Etap projektowania:

$$R_i^{DD} = P^D(a_i) \cdot C^{DD}(a_i) \quad (4.16)$$

$$R_i^{CD} = P^D(a_i) \cdot C^{CD}(a_i) \quad (4.17)$$

- Etap realizacji:

$$R_i^{DB} = P^B(a_i) \cdot C^{DB}(a_i) \quad (4.18)$$

$$R_i^{CB} = P^B(a_i) \cdot C^{CB}(a_i) \quad (4.19)$$

gdzie:

- R_i^{DD}, R_i^{DB} – ryzyko dla i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływające na czas trwania inwestycji [%],
- R_i^{CD}, R_i^{CB} – ryzyko dla i -tego czynnika ryzyka dla etapu projektowania lub etapu realizacji, wpływające na koszt inwestycji [%],
- $P^D(a_i), P^B(a_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia i -tego czynnika ryzyka (wyznaczonego na podstawie ogólnopolskiej ankiety) dla etapu projektowania lub etapu realizacji,
- $C^{DD}(a_i), C^{DB}(a_i)$ – konsekwencja wpływu i -tego czynnika ryzyka na czas trwania inwestycji, podanego przez zespół realizujący dany projekt w zakresie projektowania $C^{DD}(a_i)$ lub realizacji $C^{DB}(a_i)$ [%],
- $C^{CD}(a_i), C^{CB}(a_i)$ – konsekwencja wpływu i -tego czynnika ryzyka na koszt inwestycji, podanego przez zespół realizujący dany projekt w zakresie projektowania $C^{CD}(a_i)$ lub realizacji $C^{CB}(a_i)$ [%].

- Wagowa ocena czynnika ryzyka (indeks ryzyka):

– Etap projektowania:

$$W_{Ri}^{DD} = R_i^{DD} \cdot W D n_i^D \quad (4.20)$$

$$W_{Ri}^{CD} = R_i^{CD} \cdot W C n_i^D \quad (4.21)$$

– Etap realizacji:

$$W_{Ri}^{DB} = R_i^{DB} \cdot W D n_i^B \quad (4.22)$$

$$W_{Ri}^{CB} = R_i^{CB} \cdot W C n_i^B \quad (4.23)$$

gdzie:

- W_{Ri}^{DD}, W_{Ri}^{DB} – indeks oceny ryzyka, oparty na wadze dla i -tego czynnika, wpływający na czas trwania inwestycji dla etapu projektowania lub etapu realizacji [%],
- W_{Ri}^{CD}, W_{Ri}^{CB} – poszczególny indeks oceny ryzyka, oparty na wadze dla i -tego czynnika, wpływający na koszt inwestycji dla etapu projektowania lub etapu realizacji [%].

- Suma ważona ryzyka:

– Etap projektowania:

$$S^{DD} = \sum_{i=1}^{N^D} R_i^{DD} \cdot W D n_i^D \quad (4.24)$$

$$S^{CD} = \sum_{i=1}^{N^D} R_i^{CD} \cdot W D n_i^D \quad (4.25)$$

– Etap realizacji:

$$S^{DB} = \sum_{i=1}^{N^B} R_i^{DB} \cdot W D n_i^D \quad (4.26)$$

$$S^{CB} = \sum_{i=1}^{N^B} R_i^{CB} \cdot W D n_i^D \quad (4.27)$$

gdzie:

S^{DD}, S^{DB} – całkowite ważone ryzyko na poziomie projektu budowlanego, na etapie projektowania lub realizacji, wpływające na czas trwania inwestycji [%],

S^{CD}, S^{CB} – całkowite ważone ryzyko na poziomie projektu budowlanego, na etapie projektowania lub realizacji, wpływające na koszt inwestycji [%].

4.3.3. ANALIZA JAKOŚCIOWA

Wagową ocenę ryzyka (indeks ryzyka) wyznacza się przez uzupełnienie przykładowej macierzy ryzyka (tab. 4.4), będącej częścią proponowanej metody. Opracowano arkusz w programie Excel, w którym na podstawie danych zdefiniowanych przez użytkownika oblicza się procentowy indeks wagowej oceny poszczególnych czynników ryzyka. Matryce ryzyka zostały opracowane osobno dla etapu Projektuj oraz etapu Buduj.

W trakcie wdrażania metody z „bazowymi czynnikami ryzyka” użytkownik zobowiązany jest jedynie określić konsekwencję wpływu danego czynnika ryzyka (C), które należy wpisać w specjalnie zdefiniowane pole (tab. 4.4, kolumny 6 i 7). Pozostałe elementy zostały wyznaczone na podstawie zaproponowanych autorских równań.

Aby zwiększyć użyteczność zaprojektowanego arkusza, zdecydowano się na umożliwienie przyszłym użytkownikom zdefiniowania trzech innych zagrożeń, które nie zostały zidentyfikowane na etapie tworzenia arkusza. Nowe zagrożenia można dodać na końcu istniejącej już listy czynników ryzyka. Niezbędne jest również zdefiniowanie przez użytkownika ich wag (tab. 4.4, kolumny 3 i 4, wiersze 16–18). Proponuje się, aby wagi zostały zdefiniowane w przedziałach wskazanych według propozycji podanych w kolumnach 11 i 12 (od minimalnej do maksymalnej wartości bazowej czynników ryzyka). Następnie należy określić wartość prawdopodobieństwa wystąpienia P (kolumna 5, wiersze 16–18, skala: 0,0÷1,0) oraz konsekwencji wpływu C (kolumny 6 i 7, wiersze 16–18, skala: 10÷100%).

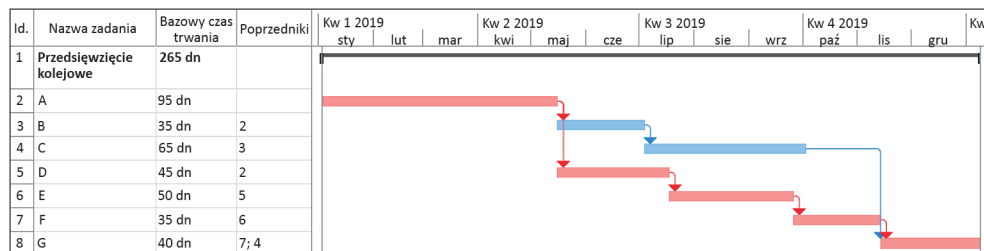
Należy podkreślić, że niezbędnym do użycia proponowanego arkusza krokiem musi być szczegółowe rozpoznanie warunków realizacji planowanej inwestycji.

Powinno ono objąć wszystkie aspekty mogące mieć wpływ na przebieg realizacji przyszłej inwestycji, a więc zarówno techniczne, jak i prawne, finansowe, organizacyjne czy technologiczne. Poprawne rozpoznanie tych warunków ułatwi kwerenda całej dostępnej dokumentacji, a jej wyniki pozwolą zespołowi analizującemu określić konsekwencję wpływu danego czynnika ryzyka na planowaną inwestycję. Istotne jest, aby czynności te zostały wykonane zespołowo. Pozwoli to zminimalizować wpływ subiektywnych ocen poszczególnych ekspertów, co jest uznawane za wadę punktowych ocen ryzyka.

Dopiero połączenie tych dwóch elementów, a więc ogólnej oceny poszczególnych zagrożeń zawartych w matrycy oraz oceny subiektywnej, uwzględniającej warunki realizacji planowanej inwestycji, pozwolą – w zamyśle autora – możliwie precyzyjnie określić elementy ryzyka analizowanej inwestycji i przygotować adekwatne środki zapobiegawcze w postaci właściwie zlokalizowanych i obliczonych buforów czasu i/lub rezerwowych środków finansowych.

4.3.4. ALOKACJA CZYNNIKÓW RYZYKA W HARMONOGRAMIE PRAC

Po identyfikacji i kwantyfikacji czynników ryzyka dokonuje się ich korelacji z konkretnymi zadaniami w procesie realizacji przedsięwzięcia budowlanego (rys. 4.3). Jest to krok do wykonania przez menadżera planującego dane przedsięwzięcie. Należy zatem znaleźć odpowiedzi, które z czynników ryzyka oddziałują na poszczególne rzeczywiste zadania, zawarte w bazowym harmonogramie realizacji przedsięwzięcia i jego strukturze WBS (tab. 4.2).



Rys. 4.3. Przykładowy bazowy harmonogram prac. Źródło: oprac. własne

Przyjęto założenie, że czynniki ryzyka są skorelowane bezpośrednio z zadaniami rzeczywistymi, a nie sumarycznymi. Pozwoli to na dokładniejsze rozpoznanie wpływu zidentyfikowanych czynników ryzyka na przebieg prac na planowanym obiekcie.

W tabeli 4.3 zaprezentowano np. zadanie sumaryczne X o przykładowym numerze Id. = 2,1 (np. Realizacja robót kolejowych, Stacja Kolejowa nr 1 – faza I, faza II), zawierające zadania rzeczywiste od A do G. Jako zadanie sumaryczne nie jest ono skorelowane ilościowo z poszczególnymi czynnikami ryzyka (jak podległe

mu zadania od A do G). Wskazano jedynie oznaczeniem „x”, które czynniki ryzyka występują podczas wykonania poszczególnych zadań rzeczywistych wchodzących w jego skład.

Tabela 4.2

Korelacja zadań rzeczywistych zadania sumarycznego X z czynnikami ryzyka

Czynniki ryzyka	Korelacja czynników ryzyka z harmonogramem (z zadaniami rzeczywistymi)
a1	A, C
a2	C, F, G
a3	B, C, D
a4	A, C, E
a5	C, D, E
a6	D, E, F, G
a7	C, D

Źródło: oprac. własne na podstawie [38]

Tabela 4.3

Alokacja czynników ryzyka w strukturze WBS harmonogramu

Nazwa zadania	Czynniki ryzyka oddziałujące na poszczególne zadania							$\sum_{j=1}^Z W_{Ri}^{rp}$ (potencjalne [%] zwiększenie pierwotnego terminu lub kosztu zakończenia zadania)	T_1 lub K_1	T_2 lub K_2
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7			
Zadanie sumaryczne X (Id. = 2.1)	x	x	x	x	x	x	x			
Id. = 2.1.1 A	WR_i^{rp}			WR_i^{rp}						
Id. = 2.1.2 B			WR_i^{rp}							
Id. = 2.1.3 C	WR_i^{rp}	WR_i^{rp}	WR_i^{rp}	WR_i^{rp}	WR_i^{rp}		WR_i^{rp}			
Id. = 2.1.4 D			WR_i^{rp}		WR_i^{rp}	WR_i^{rp}	WR_i^{rp}			
Id. = 2.1.5 E				WR_i^{rp}	WR_i^{rp}	WR_i^{rp}				
Id. = 2.1.6 F		WR_i^{rp}				WR_i^{rp}				
Id. = 2.1.7 G		WR_i^{rp}				WR_i^{rp}				

Źródło: oprac. własne na podstawie [38]

Następnie dla każdej czynności rzeczywistej obliczany jest najbardziej prawdopodobny czas zakończenia zadania, z uwzględnieniem czynników ryzyka. Obliczenia wykonujemy według poniższych formuł.

$$T_{2,j}^D = T_{1,j}^D + \left(\sum_{i=1}^Z W_{Ri}^{rp} \cdot T_{1,j}^D \right) \quad (4.28)$$

$$T_{2,j}^B = T_{1,j}^B + \left(\sum_{i=1}^Z W_{Ri}^{rp} \cdot T_{1,j}^B \right) \quad (4.29)$$

gdzie:

- $T_{1,j}^D, T_{1,j}^B$ – pierwotny czas zakończenia j -tego zadania dla etapu projektowania lub realizacji,
- $T_{2,j}^D, T_{2,j}^B$ – najbardziej prawdopodobny czas trwania j -tego zadania dla etapu projektowania lub realizacji, z uwzględnieniem czynników ryzyka,
- W_{Ri}^{rp} – indeks wagowej oceny ryzyka dla i -tego czynnika ryzyka na poziomie przedsięwzięcia budowlanego [%],
- Z – liczba czynników ryzyka.

Przekształcając równania (4.28–4.29), możemy analogicznie określić prawdopodobne koszty inwestycji.

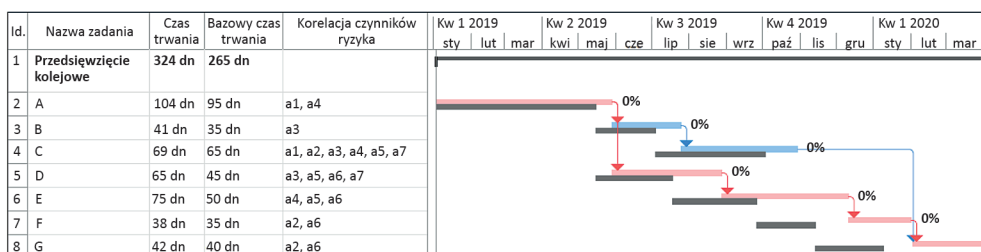
$$K_{2,j}^D = K_{1,j}^D + \left(\sum_{i=1}^Z W_{Ri}^{rp} \cdot K_{1,j}^D \right) \quad (4.30)$$

$$K_{2,j}^B = K_{1,j}^B + \left(\sum_{i=1}^Z W_{Ri}^{rp} \cdot K_{1,j}^B \right) \quad (4.31)$$

gdzie:

- $K_{1,j}^D, K_{1,j}^B$ – pierwotny koszt j -tego zadania, dla etapu projektowania lub realizacji,
- $K_{2,j}^D, K_{2,j}^B$ – najbardziej prawdopodobny koszt j -tego zadania, dla etapu projektowania lub realizacji z uwzględnieniem czynników ryzyka,
- W_{Ri}^{rp} – indeks wagowej oceny ryzyka dla i -tego czynnika ryzyka na poziomie przedsięwzięcia budowlanego [%],
- Z – liczba czynników ryzyka.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń zespoły projektowe otrzymają zmodyfikowane czasy trwania wszystkich zadań rzeczywistych, które po naniesieniu na utworzony wcześniej plan bazowy tworzą zaktualizowaną wersję harmonogramu z uwzględnieniem ryzyka (rys. 4.4). Ze sporządzonego w ten sposób harmonogramu będzie można bardzo łatwo odczytać obliczone wartości odchyłeń od bazowych, pierwotnych terminów realizacyjnych dla poszczególnych zadań rzeczywistych, zadań sumarycznych czy przyjętych kamieni milowych.



Rys. 4.4. Przykładowy plan bazowy i aktualizacja harmonogramu po uwzględnieniu wyników analizy ryzyka. Źródło: oprac. własne

4.4. IMPLEMENTACJA METODY W PRZEDSIĘWZIĘCIU BUDOWLANYM. BADANIE WŁASNE

W celu weryfikacji przyjętych w proponowanej metodzie założeń oraz weryfikacji możliwości aplikacyjnych proponowanej metody zastosowano ją w planowaniu rzeczywistego procesu inwestycyjnego.

Ważnym aspektem, brany pod uwagę na etapie tworzenia proponowanej metody, była możliwość jej zastosowania w praktyce. Przyjęto zatem założenie, że mimo niezbędnych uproszczeń, stosunkowo łatwa we wdrożeniu metoda, bazująca na liście zidentyfikowanych wcześniej zagrożeń i ich ocenie ilościowej, wsparta odpowiednim programem obliczeniowym, zachęci zespoły planujące realizację inwestycji kolejowych do jej stosowania i przyczyni się do zwiększenia wiarygodności planowanych terminów oraz kosztów. Dodatkowym atutem proponowanej metody jest fakt, że może być stosowana zarówno przez inwestora, jak i wykonawców na różnych etapach zaawansowania robót i przy jej użyciu w stosunkowo prosty sposób można opracować awaryjne plany zarządzania dla każdego przedsięwzięcia kolejowego.

Do wyznaczenia indeksów ryzyka wykorzystano równania (4.2–4.27). Przykładowe wyniki dla etapu projektowania przedstawiono w tabeli 4.4.

Na tym etapie do badania zaangażowano dwóch ekspertów, mających znaczne doświadczenie zawodowe w realizacji przedsięwzięć kolejowych.

Ekspert nr 1 był wieloletnim pracownikiem PKP PLK SA (przez 15 lat), od ponad 10 lat zajmował się nadzorowaniem kolejowych procesów projektowych w międzynarodowej firmie projektowej. Ekspert doświadczenie zdobywał na największych inwestycjach w kraju, ma tytuł naukowy doktora, a jego rozprawa doktorska dotyczyła systemów SRK (System Ruchu Kolejowego).

Ekspert nr 2 jest wieloletnim praktykiem. Swoje doświadczenia zdobywał m.in. w spółce PNI Kraków (ok. 20 lat) jako kierownik budów, przedstawiciel wykonawcy bądź dyrektor kontraktu. Obecnie od wielu lat pracuje w przedsiębiorstwie

Tabela 4.4

Matryca ryzyka uzupełniona o ocenę ekspertów. Etap projektowania

MATRYCA RYZYKA_ETAP PROJEKTOWANIA								
Lp.	Czynniki zidentyfikowanych zagrożeń	Waga i-tego czynnika ryzyka WDi	Waga i-tego czynnika ryzyka WCi	Prawdopodobieństwo P	Ocena Zespołu realizuje dane przedsięwzięcie w zakresie przewidywanej konsekwencji wpływu danego czynnika ryzyka na czas, liczona w % [skala 10–100%] C	Ocena Zespołu realizuje dane przedsięwzięcie w zakresie przewidywanej konsekwencji wpływu danego czynnika ryzyka na koszt, liczona w % [skala 10–100%] C	Wagowa ocena ryzyka (indeks ryzyka) WDRi [18 × 22] [czas]	Wagowa ocena ryzyka (indeks ryzyka) WCRi [18 × 22] [koszt]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
1	Uchybienia przy sporządzeniu materiałów przetargowych (SIWZ, OPZ, PFU)	2,280	2,280	0,902	95%	80%	11,40%	11,56%
2	Niewłaściwe oszacowanie terminu opracowania dokumentacji projektowej przez Zamawiającego	0,827	0,648	0,813	65%	20%	2,55%	0,74%
3	Zbyt duża ilość instytucji zewnętrznych biorących udział w procesie inwestycyjnym	1,079	0,723	0,768	90%	30%	4,35%	1,17%
4	Konieczność dokonania odstępstw od wytycznych z etapu przetargu	1,384	1,333	0,866	90%	50%	6,30%	4,06%
5	Błędy w koncepcyjnej dokumentacji projektowej z etapu przetargu	0,865	0,819	0,768	85%	50%	3,29%	2,21%
6	Problemy z pozyskiwaniem aktualnych map do celów projektowych z kolejowych ośrodków geodezyjnych	2,604	2,232	0,893	100%	100%	13,57%	14,01%
7	Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z zewnętrznymi Interesariuszami (np. Zarządcy dróg)	1,962	1,472	0,857	95%	50%	9,33%	4,43%
8	Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z wewnętrznymi spółkami z Grupy PKP S.A.	1,205	0,908	0,786	95%	50%	5,25%	2,51%
9	Problemy z uzgodnieniem dokumentacji projektowej z właścicielami infrastruktury technicznej zlokalizowanej na terenach PKP	1,049	0,920	0,786	95%	50%	4,57%	2,54%
10	Długotrwałe procedury uzgadniania dokumentacji projektowej wewnątrz PKP PLK	1,610	1,054	0,768	85%	60%	6,14%	3,41%
11	Problemy z akceptacją dokumentacji projektowej przez Inżyniera kontraktu	0,123	0,075	0,563	80%	45%	0,32%	0,13%
12	Brak posiadania przez Zamawiającego kompletu prawnych dokumentów dotyczących terenu przewidzianego pod inwestycję	0,907	0,653	0,366	90%	35%	1,74%	0,59%
13	Pozyskanie decyzji pozwoleń na budowę mogą być opóźnione z winy Zamawiającego	0,068	0,059	0,455	55%	20%	0,10%	0,04%
14	Pozyskanie decyzji pozwoleń na budowę mogą być opóźnione z winy Projektanta	0,275	0,209	0,509	50%	20%	0,41%	0,15%
15	Pozyskanie decyzji pozwoleń na budowę mogą być opóźnione z winy zewnętrznej jednostki, np. dodatkowe uzgodnienia	0,892	0,841	0,643	60%	60%	2,01%	2,28%
16	Czynnik ryzyka zidentyfikowany w trakcie realizacji inwestycji, np. nieprzewidziane wcześniej problemy z podwykonawcą prac	0	0	0,00	0%	0%	0,00%	0,00%
17	Inne czynniki ryzyka zidentyfikowane w trakcie realizacji inwestycji	0	0	0,00	0%	0%	0,00%	0,00%
18	Inne czynniki ryzyka zidentyfikowane w trakcie realizacji inwestycji	0	0	0,00	0%	0%	0,00%	0,00%

Źródło: oprac. własne

wykonawczym i z sukcesami realizuje największe inwestycje w kraju jako główny przedstawiciel wykonawcy.

Zgodnie z wcześniejszym założeniem czynniki ryzyka podzielono na cztery obszary. Pierwszy dotyczył etapu danego przedsięwzięcia, gdzie mamy etap Projektuj oraz etap Buduj. Kolejny podział dotyczy wpływu na czas trwania przedsięwzięcia oraz zwiększenie kosztów. Dla każdego z wymienionych obszarów dokonano obliczeń numerycznych.

Zastosowanie ostatnich wzorów (4.28–4.31) umożliwia wstępne oszacowanie ryzyka przekroczenia terminu realizacji przedsięwzięcia budowlanego lub wzrostów kosztów inwestycji. Przed przystąpieniem do alokacji ryzyka w WBS zespół realizujący dane przedsięwzięcie może dokonać ewentualnej redukcji ryzyka.

Ostatnim krokiem w proponowanej metodzie jest wprowadzenie wyników przeprowadzonej kwantyfikacji ryzyka do programu wspomagającego proces harmonogramowania.

Dane w zakresie nowych czasów trwania dla poszczególnych zadań w strukturze WBS, które zostały obliczone w arkuszu kalkulacyjnym Excel, zostały następnie przeniesione do programu wspomagającego proces harmonogramowania (MS Project). Za pomocą oprogramowania, zachowując oryginalne relacje pomiędzy zadaniami, wyznaczono prawdopodobny końcowy termin zakończenia realizacji przedsięwzięcia z uwzględnieniem wpływu czynników ryzyka.

W konsekwencji powyższych działań, czyli po wprowadzeniu czasu T_2 dla każdego zadania osobno, program komputerowy automatycznie wyznaczył prawdopodobną datę końcową inwestycji. W przypadku badanego obiektu odchylenia czasowe wynoszą 330 dni dla etapu projektowania oraz 320 dni dla etapu realizacji.

4.5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Opisana w niniejszej pracy metoda RMRF oraz proces identyfikacji i kwantyfikacji ryzyka, wraz z jego alokacją w harmonogramie przedsięwzięcia, wykazały, że osiągnięcie zakładanej efektywności w zakresie oceny potencjalnego ryzyka wymaga wielu działań na różnych poziomach. Dzięki przedstawionej propozycji działania te są zminimalizowane przede wszystkim do rzetelnej kwerendy dokumentacji, zarówno z etapu przygotowania koncepcyjnego, jak i z etapu jego realizacji.

Jedną z większych zalet proponowanej metody jest zgromadzona baza danych w zakresie zidentyfikowanych zagrożeń. Baza ta może być jednak w przyszłości rozbudowywana i dzięki temu będzie możliwa modyfikacja części ilościowej RMRF bez konieczności modyfikacji samej metody.

Podsumowując, należy jednak stwierdzić, że nie ma jednej właściwej metody do oceny ryzyka w trakcie planowania i realizowania przedsięwzięć budowlanych. Wiele obecnie praktykowanych metod opiera się na analizach wyłącznie finanso-

wych, zapominając o ryzyku technicznym czy związanym z gronem interesariuszy. Jak wykazano w trakcie dokonanych badań, interesariusze mogą mieć znaczący wpływ na przebieg realizacji przedsięwzięć budowlanych – zarówno pozytywny, jak i negatywny.

W związku z faktem, że nawet najnowocześniejsze narzędzia muszą bazować na solidnej, rzeczywistej bazie danych, autor temat ten będzie rozwijać w dalszych badaniach i analizach. W pracy skupiono uwagę na zaprognozowaniu realnych terminów i kosztów dla budów w wybranym, wąskim dziale przemysłu budowlanego, jakim są przedsięwzięcia kolejowe. Jest to przykład zastosowania analiz ryzyka w planowaniu obiektów budowlanych, z uwzględnieniem ich specyfiki, który może być zastosowany w innych obszarach budownictwa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bizon-Górecka J. (2006), *Zastosowanie innowacyjne na przykładzie branży budowlanej*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 87, 175–182.
- [2] Chien K.-F., Wu Z.-H., Huang S.-Ch. (2014), *Identifying and Assessing Critical Risk Factors for BIM Projects: Empirical Study*, Automation in Construction, 45, 1–15.
- [3] Duliniec E. (1994), *Badania marketingowe w zarządzaniu przedsiębiorstwem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [4] Dvir D., Sadeh A. (2010), *The Fit between Entrepreneurs' Personalities and the Profile of the Ventures They Manage and Business Success. An Exploratory Study*, The Journal of High Technology Management Research, 21(1), 43–51.
- [5] Golik-Górecka G. (1999), *Badania marketingowe w przedsiębiorstwach budowlanych*, Forum Budowlane, 4.
- [6] Janczura M., Kuchta D. (2011), *Proactive and Reactive Scheduling in Practice*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 238, 34–51.
- [7] Janczura M., Kuchta D. (2012a), *Harmonogramowanie reaktywne a ryzyko w projekcie*, Studia Ekonomiczne, Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach, 97, 253–269.
- [8] Janczura M., Kuchta D. (2012b), *Proactive and Reactive Scheduling with Fuzzy Activity Times*, [in:] *Uncertainty Modeling in Knowledge Engineering and Decision Making*, Proceedings of the 10 International FLINS Conference, Stambuł, 495–500.
- [9] Kopczyński T. (2000), *Korzyści z metodyki. Project Management w administracji państwowej*, [w:] *Project Management. Profesjonalizm*, Stowarzyszenie Project Management Polska, Jelenia Góra.

- [10] Koper A., Marcinkowski R. (2007), *Analiza ryzyka czasu i kosztów realizacji zadań i przedsięwzięć budowlanych*, [w:] *Materiały, technologie i organizacja w budownictwie*, 53 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTb, Białystok – Krynica, 257–264.
- [11] Kotler Ph. (1994), *Analiza, planowania wdrażania i kontrola*, Gebethner i spółka, Warszawa.
- [12] Kowalski J. (2021), *Harmonogramowanie inwestycji kolejowych w Polsce z uwzględnieniem ryzyka w trakcie ich realizacji*, rozprawa doktorska, Warsaw University of Life Sciences, Warsaw.
- [13] Kowalski J., Połowski M. (2017), *Identyfikacja ryzyka wynikającego z wpływu interesariuszy na realizację inwestycji kolejowych w Polsce*, *Acta Scientiarum Polonorum – Architectura*, 16(4), 83–92.
- [14] Kowalski J., Połowski M. (2018), *Identification of Risk Investment Using the Risk Matrix on Railway Facilities*, *Open Engineering*, 8(1), 506–512.
- [15] Kowalski J., Połowski M., Lendo-Siwicka M. (2019), *Risk Factors for Delays in Rail Investments Implemented in the Design & Build Contracts*, *MATEC Web of Conferences*, 262:07007.
- [16] Koźmiński A. (1991), *Zarządzanie. Teoria i praktyka*, PWN, Warszawa.
- [17] Kuchta D., Ślusarczyk A. (2014), *A Method of Risk Management in Projects Realized by Self-Government Units*, [w:] *Projekty lokalne i regionalne – najlepsze praktyki*, H. Brandenburg (ed.), Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego, Katowice.
- [18] Kunreuther H., Slovic P. (1996), *The Annals of the American Academy of Political and Social Science. Challenges in Risk Assessment and Risk Management*, Sage Periodicals Press, 545(1), 116–125.
- [19] Lambrechts O., Demeulemeester E., Herroelen W. (2008), *Proactive and Reactive Strategies for Resource-Constrained Project Scheduling with Uncertain Resource Availabilities*, *Journal of Scheduling*, 11, 121–136.
- [20] Lipke W., Zwikael O., Henderson K., Anbari F. (2008), *Prediction of Project Outcome The Application of Statistical Methods to Earned Value Management and Earned Schedule Performance Indexes*, *International Journal of Project Management*, 27(4), 400–407.
- [21] Mynarski S. (2000), *Praktyczne metody analizy danych rynkowych i marketingowych*, Zakamycze, Kraków.
- [22] Nicholas J., Herman S. (2017), *Project Management for Engineering, Business and Technology*, Routledge Taylor and Francis Group, New York.
- [23] Pabian A. (1999), *Marketing w budownictwie. Poradnik przedsiębiorcy budowlanego*, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa.
- [24] Pearce P. (1992), *Construction Marketing – a Professional Approach*, Thomas Telford Services Ltd., London.

- [25] Pettinger R. (1998), *Construction Marketing – Strategies for Success*, Macmillan Press Ltd., London.
- [26] PMI (2013), *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 5th ed., Project Management Institute.
- [27] Połoński M., Kowalski J. (2016), *Problemy na etapie uzgadniania dokumentacji projektowej inwestycji kolejowych realizowanych z zastosowaniem warunków kontraktowych FIDIC*, Materiały Budowlane, 6, 162–163.
- [28] Połoński M., Kowalski J. (2017), *The Identification of Hazards Concerning the Character of Construction Works on Railway Sites in Poland*, Technical Transactions. Civil Engineering, 5, 47–56.
- [29] Połoński M., Pruszyński K. (2006), *Probabilistyczne aspekty procesu budowlanego*. Cz. 2, Przegląd Budowlany, 12, 49–53.
- [30] *PRINCE2 – Skuteczne zarządzanie projektami* (2005), TSO, Warszawa.
- [31] Pruszyński K. (2012), *Metoda harmonogramowania realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem buforów czasu*, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.
- [32] Radziszewska-Zielina E. (1999), *Metody badania rynku usług budowlanych. Sterowanie procesami inwestycyjnymi w budownictwie wodnym i morskim*, Konferencja naukowo-techniczna, Politechnika Szczecińska, Szczecin – Międzyzdroje.
- [33] Radziszewska-Zielina E. (2002), *Obiektywne parametry styropianu i wełny mineralnej a ich ocena przez rynek*, Przegląd Budowlany, 4, 31–33.
- [34] Radziszewska-Zielina E. (2005), *Systemy ociepleń w ocenie klienta*, Izolacje, 1, 33–37.
- [35] Radziszewska-Zielina E. (2006), *Metody badań marketingowych w budownictwie*, Know-How Piotr Kaczmarczyk, Kraków.
- [36] Raheja A.S., Subramaniam V. (2002), *Reactive Recovery of Job Shop Schedules – a Review*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19(10), 756–763.
- [37] Shi Qian, Liu Y., Zuo J., Pan N., Ma G. (2015), *On the Management of Social Risks of Hydraulic Infrastructure Projects in China: A Case Study*, International Journal of Project Management, 33(3), 483–496.
- [38] Skorupka D. (2007), *Method of Construction Risk Assessment*, Habilitation Dissertation, Military University of Technology, Warsaw.
- [39] Szafranko E. (2004), *Próba analizy rynku budowlanego na podstawie funkcjonowania biura projektowego*, [w:] *Zarządzanie procesami inwestycyjnymi w budownictwie*, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [40] Trocki M., Grucza B. (2007), *Zarządzanie projektem europejskim*, PWE, Warszawa.
- [41] Trocki M., Grucza B., Ogonek K. (2003), *Zarządzanie projektami*, PWE, Warszawa.

- [42] Winter M., Smith P., Morris P., Cicmil S. (2006), *Directions for Future Research in Project Management: The Main Findings of a UK Government-Funded Research Network*, International Journal of Project Management, 24(8), 638–649.

5. PLANOWANIE DZIAŁAŃ INŻYNIERYJNO-BUDOWLANYCH REALIZOWANYCH PRZEZ JEDNOSTKI O ZHIERARCHIZOWANYCH STRUKTURACH

Radosław Sekunda¹, Roman Marcinkowski²

5.1. WSTĘP

W literaturze z zakresu metodologii planowania [1, 2, 5, 11, 15, 23] sformułowano wiele zasad, wskazówek i modeli procesów planistycznych. W praktycznych sytuacjach decyzyjnych wyróżniamy dwie formy planowania działalności inżynierijno-budowlanej:

- planowanie operacyjne, którego celem jest ustalenie wykonalności zadań stanowiących przedmiot analiz planistycznych,
- planowanie przedsięwzięć i produkcji, którego celem jest przygotowanie harmonogramu realizacji przedsięwzięcia.

Skierujmy uwagę na planowanie operacyjne, które ma charakter doraźny, interwencyjny, realizowany w sytuacjach kryzysowych przez zasoby zorganizowane w celowo zorientowane struktury. Chcemy przedstawić sformalizowane metodyczne i matematyczne podejścia do problemu planowania wykonania zadań inżynierijno-budowlanych, zlokalizowanych na określonych frontach robót, przez jednostki zhierarchizowane. Chodzi o sposób prowadzenia analiz związanych z określeniem wykonalności zadań na frontach robót przez skierowane na te fronty zasoby czynne oraz o zarządzanie rozdziałem zasobów o strukturach hierarchicznych na fronty robót. Zagadnienia te nie zostały dostatecznie rozwiązane w teorii i z tego powodu nie dają się zaimplementować w specjalistycznym oprogramowaniu procesów planistycznych. Problem wymaga formalizacji właśnie z punktu widzenia informatyzacji procesów planistycznych, która współcześnie jest powszechnie stosowana w każdej działalności.

Problem zarządzania zasobami złożonymi był rozpatrywany w przeszłości [14–17, 24], jednak do tej pory nie opracowano ścisłych podstaw naukowych oraz

¹ Biuro Inżynierskie Radosław Sekunda, e-mail: biuro@invest-home.pl.

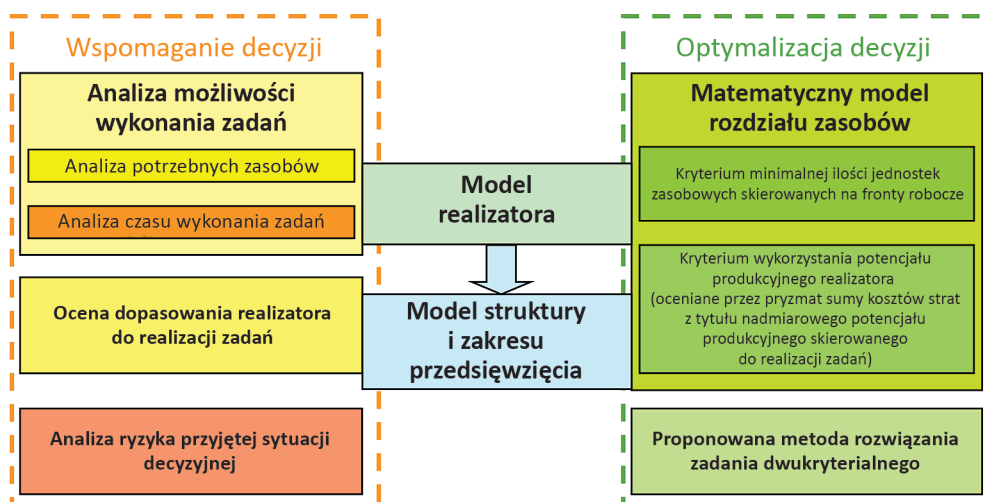
² Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii Politechnika Warszawska, e-mail: roman.marcinkowski@pw.edu.pl.

narzędzi praktycznych na potrzeby takiego planowania. Analizę identyfikacyjną problemu planowania operacyjnego, istotę złożonej struktury zasobów oraz model bilansowania złożonych zasobów czynnych w warunkach deterministycznych opisano w pracy [18]. Autorzy publikacji dążą do implementacji stosowanego w budownictwie sposobu planowania na podstawie norm nakładów rzeczowych (KNR) do nowej sytuacji planistycznej – hierarchicznej struktury zasobów i celowo zorientowanej bazy norm nakładów pracy na wykonanie zadań. Zadania na frontach robót mają narzucone terminy realizacji (od – do) i wyliczoną pracochłonność, a zasoby będące w dyspozycji planującego działania są określone ilościowo na zdefiniowanej strukturze (zespoły, kompanie, brygady). Zadaniem planisty jest ustalenie realizatorów robót na poszczególnych frontach roboczych, tak aby wykonać na nich zadania z uwzględnieniem występujących ograniczeń.

Hierarchizacja zasobów jest powszechnie stosowana w strukturach ratowniczych i zmilitaryzowanych. Ułatwia ona zarządzanie strukturami zasobów i pomaga w kierowaniu działaniami w sytuacjach kryzysowych (katastrofy, klęski żywiołowe, działania wojenne itp.). Nie pozwala jednak na rzeczowe (algorytmicznie określone) dopasowanie struktur wykonawczych do rzeczywistych potrzeb na froncie robót.

Problem ma różne odniesienia (rys. 5.1), z których wyróżniono trzy główne:

- wspomaganie komputerowe analiz związanych z wykonalnością zadań,
- optymalizacja decyzji o doborze wykonawcy pod względem dostosowania jego wydajności (potencjału) do pracochłonności zadań realizowanych na froncie robót,
- analiza ryzyka decyzji przydziału wykonawcy do realizacji zadań na froncie robót.



Rys. 5.1. Struktura problemu planowania operacyjnego

Do zidentyfikowanego na rys. 5.1 zakresu problemowego trzeba dodać jeszcze bazę wiedzy o normach nakładów pracy, obowiązujących w trakcie wykonywania zadań inżyniersko-budowlanych. Powinna to być celowo określona baza, identyfikująca jednostki obmiaru zadań, jednostkowe nakłady pracy i ich niepewność. Rozpatrujemy bowiem działania jednostek zmilitaryzowanych, a więc w sytuacjach obarczonych niepewnością co do przebiegu robót. Dlatego też podczas planowania takich działań należy liczyć się z możliwością wystąpienia zakłóceń na etapie wykonywania robót (ryzyko czasu, ryzyko nakładów pracy i ryzyko sprawności zasobów).

5.2. MODELOWANIE PROBLEMU ALOKACJI ZASOBÓW O HIERARCHICZNEJ STRUKTURZE NA FRONTY ROBÓT

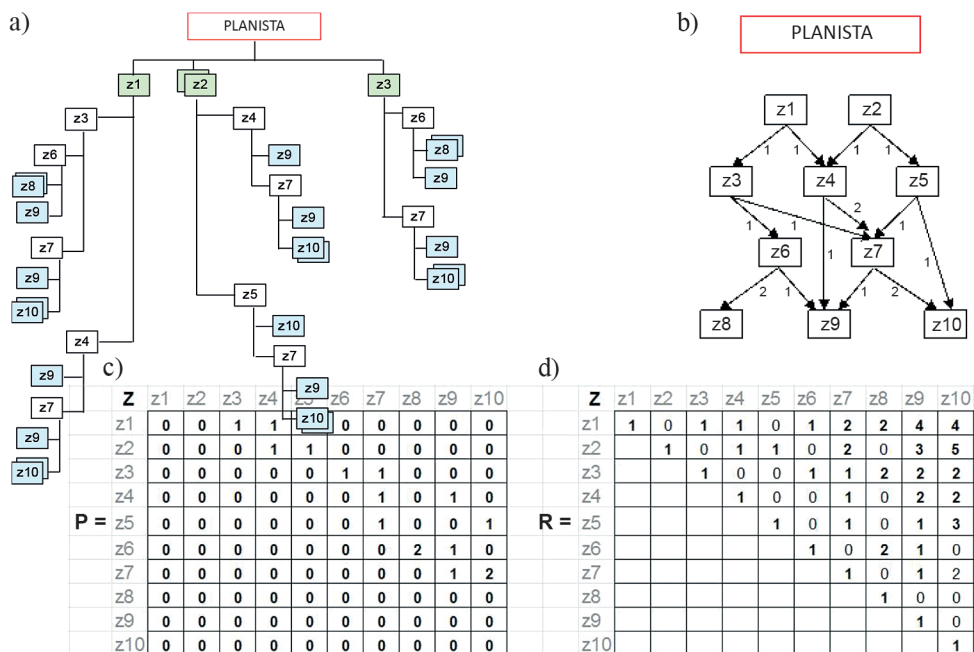
5.2.1. MODEL REALIZATORA ZADAŃ INŻYNIERYJNO-BUDOWLANÝCH

Do realizacji zadań inżyniersko-budowlanych na frontach robót wykorzystywane będą zasoby zorganizowane w strukturę zhierarchizowaną. Niech nazwy zasobów czynnych tworzą zbiór: $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_z\}$. Hierarchię struktury zasobów określa macierz przełożenia – podległości $\mathbf{P} = [p_{sk}]_{z \times z}$, gdzie p_{sk} oznacza liczbę jednostek zasobu o indeksie k : $z_k \in Z$ w każdej jednostce zasobu o indeksie s : $z_s \in Z$, pozostających w bezpośredniej podległości. W modelu wyróżnić można **zasoby podstawowe**, które nie mają w swojej strukturze zasobów szczebla niższego. Stanowią one pewien podzbiór Z' zbioru Z , w którym dla elementów zbioru Z zachodzi zależność: $\sum_{k=1}^z p_{sk} = 0$. Pozostałe zasoby to **zasoby złożone**. Zarówno zbiór Z , jak i macierz $\mathbf{P}$ uszeregowane są topologicznie, tzn. indeksy zasobów nadawane są od góry hierarchii. Istotę złożoności (hierarchii) zasobów przedstawia poglądowo rys. 5.2.

Na podstawie macierzy $\mathbf{P}$ określa się tzw. *macierz stanu jednostek organizacyjnych*: $\mathbf{R} = [r_{sk}]_{z \times z}$, w której elementy macierzy przyjmują wartości:

$$r_{sk} = \begin{cases} 0 & \text{dla elementów, dla których } k < s \\ 1 & \text{dla elementów, dla których } k = s \\ \sum_{i=s}^{k-1} p_{ik} \cdot r_{si} & \text{dla elementów, dla których } k = s + 1, s + 2, \dots, z \end{cases} \quad (5.1)$$

Elementy macierzy $\mathbf{R}$ są rozwinięciem macierzy $\mathbf{P}$, prowadzącym do ustalenia liczby jednostek zasobu o indeksie k : $z_k \in Z$ w każdej jednostce zasobu o indeksie s : $z_s \in Z$. Elementy tej macierzy określają też liczbę zasobów podstawowych, które zawiera analizowana struktura. Jest to istotna informacja z punktu widzenia bilansowania zasobów.



Rys. 5.2. Hierarchiczny układ struktury zasobów realizatora (przykład): a) schemat organizacyjny realizatora; b) graf opisujący hierarchię zasobów; c) interpretacja macierzowa – macierz **P**; d) macierz stanu jednostek organizacyjnych – macierz **R**

Punktem wyjścia do planowania przedsięwzięć jest określenie stanu posiadania zasobów – w naszym przypadku jednostek organizacyjnych. Stan posiadania zasobów $\{z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_z\}$ w aspekcie ilościowym opisuje *macierz struktury złożonej* $Q = [q_{kt}]_{z \times H}$, gdzie q_{kt} określa ilość addytywnych jednostek zasobu o indeksie k : $z_k \in Z$, dostępnych w jednostce czasu $t = 1, 2, \dots, H$ (gdzie: H – horyzont czasu planowania).

Elementy q_{kt} są określane dynamicznie w toku planowania, uwzględniając zajętość zasobów już przydzielonych do realizacji zadań na frontach robót i strukturę zasobów.

5.2.2. MODEL STRUKTURY I ZAKRESU ZADAŃ INŻYNIERYJNO-BUDOWLANYCH

Do planowania działań określona powinna być baza wiedzy o zadaniach. W modelu przyjmijmy, że podstawowymi jednostkami kalkulacyjnymi w planowaniu działań są zadania tworzące zbiór $O = \{o_1, o_2, \dots, o_i, \dots, o_n\}$, dla których określono normatywne nakłady pracy. Nakłady te niech opisuje macierz $N = [n_{ik}]_{n \times z}$, gdzie n_{ik} oznacza nakład czasu pracy (w przyjętych jednostkach czasu, np. godzinach lub dniach) zasobu typu k : $z_k \in Z$ do realizacji przyjętej jednostki obmiarowej zadania i : $o_i \in O$.

Zasoby występujące w jednym zadaniu są zawsze zasobami addytywnymi, mogącymi stanowić jednocześnie elementy zespołu roboczego (utworzonego doraźnie na potrzeby realizacji zadania).

Zadania inżynierijno-budowlane w danej sytuacji planistycznej określone są dla frontów robót. Niech nazwy frontów robót tworzą zbiór $F = \{f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_m\}$, a dla każdego frontu znany jest zakres robót, który określony zostanie przez pryzmat zbioru zadań O . Znana jest więc macierz $\mathbf{K} = [k_{ij}]_{n \times m}$, gdzie k_{ij} określa ilość jednostek obmiarowych zadania i : $o_i \in O$ do wykonania w ramach frontu robót j : $f_j \in F$. Wartości k_{ij} są przedmiarami robót.

Na podstawie znanych nakładów (macierz $\mathbf{N}$) oraz przedmiaru robót (macierz $\mathbf{K}$), czyli rodzaju i ilości zadań w ramach określonych frontów roboczych, obliczyć można pracochłonność zadań na poszczególnych frontach robót:

$$w_{kj} = \sum_{i=1}^n n_{ik} \cdot k_{ij} \quad (5.2)$$

gdzie w_{kj} oznacza nakład czasu pracy zasobu typu k : $z_k \in Z$ do wykonania zadań w ramach frontu j : $f_j \in F$.

Wartości elementów w macierzy $\mathbf{W}$ określają zatem ilości addytywnych (niezależnych od siebie) jednostek zasobowych ze struktury zasobów.

W celu określenia pracochłonności frontów robót przez pryzmat zasobów podstawowych (co jest istotne do bilansowania zasobów na frontach robót) uwzględnić należy wewnętrzną strukturę zasobów („zagnieżdżenie zasobów”), których wymaganą ilość zawiera macierz $\mathbf{W}$. W tym celu generowana zostaje macierz $\mathbf{W}' = [w'_{kj}]_{z \times m}$, w której elementy w'_{kj} przyjmują wartości:

$$\begin{aligned} w'_{1j} &= w_{1j} & \text{dla } j &= 1, 2, \dots, m \\ w'_{kj} &= w_{kj} + \sum_{i=1}^{k-1} p_{ik} \cdot w_{ij} & \text{dla } k &= 2, 3, \dots, z \\ & & \text{dla } j &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5.3)$$

Zakładamy, że wszystkie fronty robót mają określone dyrektywne terminy realizacji (od – do): $\langle e_j^s, e_j^f \rangle$, gdzie: e_j^s oznacza najwcześniejszy możliwy termin rozpoczęcia prac na froncie j : $f_j \in F$, a e_j^f – najpóźniejszy dopuszczalny termin zakończenia prac na froncie j : $f_j \in F$. Terminy te mają wpływ na określenie niezbędnej ilości zasobów, jaką należy skierować na poszczególne fronty robót. Krótki przedział czasowy implikuje potrzebę spiętrzenia prac – skierowania większej ilości zasobów na front robót. I odwrotnie: długi przedział czasowy pozwala na przydział mniejszej ilości zasobów.

5.2.3. ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKONANIA ZADAŃ

Wykorzystując bazę danych o potencjale złożonej struktury zasobów czynnych oraz bazę danych charakteryzującą strukturę i zakres przedsięwzięcia, możemy prowadzić analizę w dwóch aspektach:

- 1) realizacji prac na frontach roboczych ze ścisłym dotrzymaniem terminów dyrektywnych (od – do) (ten sposób analizy nazwijmy: **analizą potrzebnych zasobów**),
- 2) czasu potrzebnego na wykonanie prac na frontach roboczych przy określonym poziomie przydzielonych zasobów (ten sposób nazwijmy: **analizą czasu wykonania zadań**).

W obu przypadkach możliwości realizacyjne ograniczone są m.in. zmienną w czasie dostępnością zasobów czynnych.

Dynamiczna zmiana dostępności zasobów dotyczy jednostek zasobowych z różnego poziomu globalnej struktury, ale zawsze w konsekwencji sprowadza się do analizy dostępności jednostek zasobowych ze szczebla zasobów podstawowych. Dostępność zasobów podstawowych w czasie określimy macierzą $\mathbf{D}=[d_{kt}]_{z \times H}$, gdzie d_{kt} określa ilość jednostek zasobu o indeksie k : $z_k \in Z'$, dostępnych w chwili $t=1, 2, \dots, H$ jako addytywne jednostki zasobowe. Dostępność zasobów jest zawsze wynikiem:

- stanu posiadania (ukompletowania) struktury zasobów w poszczególnych jednostkach czasu (macierz $\mathbf{Q}$),
- alokacji zasobów do realizacji zadań na frontach roboczych.

Zauważmy, że macierz potencjału wykonawczego $\mathbf{Q}$ uwzględnia brak dostępności określonych zasobów w czasie z przyczyn niezwiązanych z prowadzoną analizą planistyczną oraz ewentualne doraźne wsparcie jednostkami zasobowymi pochodzącymi spoza analizowanej struktury zasobów. Zajątość zasobów związana z ich alokacją do realizacji zadań na frontach robót jest natomiast zagadnieniem wymagającym rozwiązania na etapie planowania robót. Problem jest skomplikowany z uwagi na zhierarchizowany charakter potencjału wykonawczego.

Niech decyzję planującego, dotyczącą alokacji addytywnych jednostek zasobowych na fronty robocze, zawiera macierz $\mathbf{X}=[x_{kj}]_{z \times m}$, gdzie x_{kj} oznacza ilość jednostek zasobowych zasobu o indeksie k : $z_k \in Z$, alokowaną decyzyjnie przez planującego do realizacji zadań na froncie robót o indeksie j : $f_j \in F$.

Na potrzeby prowadzenia analizy przez pryzmat zasobów podstawowych uwzględnić należy wewnętrzną strukturę zasobów addytywnych, których wymagana ilość zawiera macierz $\mathbf{X}$.

W tym celu generowana zostaje macierz $\mathbf{X}'=[x'_{kj}]_{z \times m}$, gdzie x'_{kj} oznacza ilość jednostek zasobowych zasobu o numerze k : $z_k \in Z'$, wynikającą z wewnętrznej struktury zasobów, których ilości w realizacji zadań na froncie o indeksie j : $f_j \in F$

określa macierz $\mathbf{X}$. Elementy x'_{kj} , określone tylko dla szerebła zasobów podstawowych, przyjmują wartości:

$$x'_{kj} = \sum_{i=1}^k x_{ij} \cdot r_{ik} \quad \text{dla } k: z_k \in Z', \text{ dla } j: f_j \in F \quad (5.4)$$

W wyniku decyzyjnej alokacji zasobów na fronty robocze zmienia się dostępność jednostek organizacyjnych w określonych przedziałach czasu, wynikających z terminów dyrektywnych realizacji frontów robót $\langle e_j^s, e_j^f \rangle$.

Jak wspomniano, poziom dostępności zasobów podstawowych zawiera macierz $\mathbf{D} = [d_{kt}]_{z \times H}$, gdzie d_{kt} określa ilość jednostek zasobu o indeksie $k: z_k \in Z'$, dostępnych w chwili $t = 1, 2, \dots, H$ w postaci addytywnych jednostek zasobowych. Elementy macierzy $\mathbf{D}$ przyjmują wartości:

$$\begin{aligned} d_{kt} &= q_{kt} - \sum_{i=1}^k x_{ij} \cdot r_{ik} & \text{dla } j: e_j^s \leq t \leq e_j^f, \text{ dla } k: z_k \in Z' \\ d_{kt} &= q_{kt} & \text{dla } j: t > e_j^f \text{ lub } t < e_j^s, \text{ dla } k: z_k \in Z' \end{aligned} \quad (5.5)$$

Tak przedstawione podejście, polegające na prowadzeniu analizy dostępności zasobów w czasie przez pryzmat zasobów podstawowych, oparte jest konsekwentnie na twierdzeniu, że realny potencjał produkcyjny stanowią jednostki organizacyjne ze szerebła zasobów podstawowych.

Analiza potrzebnych zasobów

Celem analizy jest określenie ilości jednostek zasobów podstawowych wymaganych na poszczególnych frontach roboczych, tak aby dyrektywne terminy ich realizacji zostały dotrzymane. W analizie bazuje się na:

- znanej pracochłonności robót na frontach w odniesieniu do szerebła zasobów podstawowych (macierz $\mathbf{W}'$),
- dyrektywnym czasie realizacji zadań na poszczególnych frontach roboczych: $t_j^d = e_j^f - e_j^s$.

Wymaganą obliczeniową ilość jednostek zasobów podstawowych określa macierz $\mathbf{B}' = [b'_{kj}]_{z \times m}$, gdzie b'_{kj} określa obliczeniową liczbę zasobu o indeksie $k: z_k \in Z'$, wymaganą do realizacji zadań na froncie robót o indeksie $j: f_j \in F$ w terminie dyrektywnym. Elementy b'_{kj} przyjmują niecałkowitoliczbowe dodatnie wartości:

$$b'_{kj} = \frac{w'_{kj}}{e_j^f - e_j^s} \quad \text{dla } k: z_k \in Z', \text{ dla } j: f_j \in F \quad (5.6)$$

Zapotrzebowanie poszczególnych frontów roboczych, określone wartościami całkowitoliczbowymi jednostek zasobów podstawowych, opisuje macierz $\mathbf{B}''$:

$$b''_{kj} = \text{ent}[b'_{kj}] \quad (5.7)$$

gdzie: b''_{kj} – wartość całkowitoliczbowa, zawsze zaokrąglana w górę do pełnych wartości.

Decyzję planującego, dotyczącą przydziału zasobów na fronty robocze, opisano w metodzie macierzą $\mathbf{X}=[x_{kj}]_{z \times m}$, gdzie x_{kj} oznacza ilość jednostek zasobów typu k : $z_k \in Z$, alokowaną decyzyjnie przez planującego do realizacji wszystkich zadań występujących na froncie j : $f_j \in F$.

Analiza czasu wykonania zadań

Celem analizy jest określenie czasów realizacji frontów robót, będących konsekwencją decyzyjnego przydziału zasobów do realizacji zadań na frontach. Decydenta może bowiem interesować nie tylko informacja dotycząca ilości niezbędnych zasobów do realizacji prac na frontach w terminach dyrektywnych, pożądana może być również informacja dotycząca **czasu realizacji zadań na frontach robót** po decyzyjnym przydziale określonej ilości zasobów (z różnych poziomów struktury) do ich realizacji.

Czas realizacji zadań na froncie robót o numerze j : $f_j \in F$ jest określany z zależności:

$$t_j^p = \max_{k: z_k \in Z'} \frac{w'_{kj}}{\sum_{i=1}^k x_{ij} \cdot r_{ik}} \quad \text{dla } j=1, 2, \dots, m \quad (5.8)$$

Jest bowiem oczywiste, że czas potrzebny na realizację zadań j -tego frontu j : $f_j \in F$ determinowany jest sumaryczną wydajnością zasobów podstawowych tego rodzaju, dla którego stopień wykorzystania jednostek zasobowych jest w danej sytuacji maksymalny. Zasoby pozostałych typów będą tu wykorzystane w mniejszym stopniu lub wcale.

5.3. MATEMATYCZNY MODEL OPTIMALIZACJI ROZDZIAŁU ZASOBÓW

W prowadzonych w pracy analizach rozpatruje się problem decyzyjny, polegający na określeniu rodzaju oraz ilości zasobów różnych poziomów hierarchii struktury do realizacji zadań na rozpatrywanych, w pewnym przyjętym horyzoncie planowania, frontach robót.

Przyjmijmy konsekwentnie, że w problemie optymalizacyjnym tego rodzaju decyzje opisywać będą zmienne x_{kj} , określające ilość jednostek organizacyjnychaddytywnych zasobów rodzaju k : $z_k \in Z$, delegowanych do realizacji zadań w ramach frontu j : $f_j \in F$. Zmienne decyzyjne zawiera macierz $\mathbf{X}=[x_{kj}]_{z \times m}$.

Warunkami ograniczającymi zbiór decyzji dopuszczalnych są:

1. Wymagana ilość zasobów podstawowych do realizacji frontów robót w terminach dyrektywnych:

$$\sum_{i=1}^z r_{ik} \cdot x_{ij} \geq b''_{kj} \quad \text{dla } k: z_k \in Z', \quad j: f_j \in F \quad (5.9)$$

2. Dostępność zasobów podstawowych:

$$\sum_{i=1}^z r_{ik} \cdot x_{ij} \leq d_{it} \quad \text{dla } k: z_k \in Z', \quad \text{dla } j: f_j \in F, \quad \text{dla } t=1, 2, \dots, H \quad (5.10)$$

3. „Ograniczoność” ilości jednostek zasobowych, wynikająca ze struktury potencjału wykonawczego:

$$x_{kj} \leq q_{k1} \quad \text{dla } k: z_k \in Z, \quad \text{dla } j: f_j \in F \quad (5.11)$$

W tym warunku chodzi o to, żeby przeciwdziałać możliwości utworzenia większej ilości jednostek zasobowych określonego rodzaju zasobu, aniżeli ta wynikająca z „etatowej” struktury zasobów, ale z uwzględnieniem okresowego braku (lub wsparcia) określonych jednostek zasobowych.

4. Całkowitoliczbowość zmiennych decyzyjnych:

$$x_{kj} = \text{int} \quad \text{dla } k: z_k \in Z, \quad \text{dla } j: f_j \in F \quad (5.12)$$

Warunkiem brzegowym jest konieczność osiągnięcia przez zmienne decyzyjne wartości nieujemnych:

$$x_{kj} \geq 0 \quad \text{dla } k: z_k \in Z, \quad \text{dla } j: f_j \in F \quad (5.13)$$

Przy tak sformułowanych zmiennych decyzyjnych oraz warunkach ograniczających kryteria optymalizacji są następujące:

1. **Kryterium minimalnej ilości jednostek zasobowych skierowanych na fronty robocze** (minimalizowana jest sumaryczna ilość przydzielonych zasobów):

$$\min f_1: f_1 = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{kj} \cdot (1 - \varepsilon \cdot k) \quad (5.14)$$

gdzie: ε – współczynnik zapewniający preferencje tym typom zasobów, które znajdują się najniżej w hierarchii (mają wysokie indeksy k). Konsekwentnie zakłada się tu, że macierz $\mathbf{P}$ uszeregowana jest topologicznie.

Wprowadzenie do funkcji celu f_1 współczynnika ε , w powiązaniu ze zmianą indeksu k w zależności od miejsca określonego rodzaju zasobu w hierarchii struktury (im zasób wyżej w hierarchii, tym niższy indeks k), umożliwia prowadzenie analizy przydziału zasobów do realizacji frontów robót „od dołu” hierarchii. Wartość współczynnika ε nie jest oczywista i nie pozostaje bez znaczenia dla wyników obliczeń. Z jednej strony współczynnik ε musi być dostatecznie małym współczynnikiem, tak aby nie wypaczyć wyników analizy, z drugiej zaś – jego wartość powinna być na tyle istotna, żeby spełnił przypisaną mu rolę w formule funkcji celu.

W celu ustalenia związku pomiędzy wynikami zadania optymalizacyjnego a różnymi wartościami współczynnika ε przeprowadzono szereg obliczeń symulacyjnych w odniesieniu do różnorodnych charakterystyk ilościowych analizowanej struktury zasobów oraz przy różnorodnych danych wejściowych zadania optymalizacyjnego. Z przeprowadzonych analiz wynika, że graniczna wartość współczynnika ε , przy której zapewniona będzie poprawność wykonywanych w modelu obliczeń, będzie się zmieniać w zależności od ilości rodzajów zasobów wyróżnionych w strukturze zasobów. Przyjęto jako poprawne następujące wartości współczynnika ε :

- przy liczbie indeksów (reprezentujących rodzaj zasobów):

$$3 \leq k \leq 15 : \varepsilon = 0,08$$

- przy liczbie indeksów zasobów

$$16 \leq k : \varepsilon \leq \frac{1}{\sum_{k=1}^z k} \quad (5.15)$$

Minimalizując liczbę zaangażowanych jednostek zasobowych, możemy doprowadzić do niekorzystnego wyniku w postaci przydziału zasobów w nadmiarze. Dlatego potrzebne jest drugie kryterium, które będzie opisywało minimalizację „kosztów strat” z tytułu skierowania do realizacji zadań na frontach roboczych nadmiarowego potencjału zasobów.

2. **Kryterium wykorzystania potencjału produkcyjnego realizatora (oceniane przez pryzmat sumy kosztów strat z tytułu nadmiarowego potencjału produkcyjnego skierowanego do realizacji zadań)** formułuje się następująco:

$$\min f_2 : f_2 = \sum_{k: z_k \in Z'} \left[\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^z r_{ik} \cdot x_{ij} - b'_{kj} \right] \cdot c_k^{zp} \quad (5.16)$$

W kryterium tym analizujemy skierowany i potrzebny potencjał zasobów, wyrażany przez pryzmat zasobów podstawowych.

W wielu sytuacjach decyzyjnych rozwiązanie optymalne, ze względu na jedno z powyższych kryteriów, może nie być akceptowane z punktu widzenia planisty. Należy podejrzewać, że skierowanie na fronty robót minimalnej sumarycznej ilości jednostek zasobowych skutkować będzie stosunkowo dużym kosztem strat z tytułu niepełnego wykorzystania zasobów podstawowych. I odwrotnie: rozwiązanie, polegające na delegowaniu zasobów według kryterium maksymalnego wykorzystania potencjału produkcyjnego realizatora, spowoduje, że sumaryczna ilość skierowanych jednostek zasobowych będzie stosunkowo duża.

3. Proponowana metoda rozwiązania

Opisany powyżej problem jest dwukryterialnym modelem liniowym. Jego rozwiązanie proponuje się uzyskiwać przez zastosowanie interaktywnej metody Stauera, której istotę – w odniesieniu do sformułowanego zadania – przedstawiono poniżej.

Istota metody polega na kolejnym (iteracyjnym) rozwiązywaniu pięciu zadań z liniową funkcją użyteczności jako funkcją celu. W pierwszej iteracji przyjmuje się wagi: $[w_1, w_2]$ dla kryteriów f_1 i f_2 równe: $\{[0; 1], [0,25; 0,75], [0,5; 0,5], [0,75; 0,25], [1; 0]\}$ i rozwiązuje pięć zadań postaci:

$$\min f: f = x_{z+1} \quad (5.17)$$

przy warunkach ograniczających i brzegowych, opisanych zależnościami (5.9–5.13) oraz dodatkowymi:

$$x_{z+1} \geq (f_1 - f_{1\min}) \cdot w_1 \quad (5.18)$$

$$x_{z+1} \geq (f_2 - f_{2\min}) \cdot w_2 \quad (5.19)$$

gdzie: $f_{1\min}, f_{2\min}$ – rozwiązania idealne, wyznaczone przez rozwiązanie dwóch zadań jednokryterialnych, z każdym kryterium oddzielnie, a x_{z+1} – zmienna pomocnicza wprowadzona dla rozwiązania problemu dwukryterialnego (sformułowania jednokryterialnej funkcji celu).

Tak otrzymane rozwiązania przedstawiamy do oceny decydentowi, który z kolei wybiera jedno z nich, najbardziej go zadowolające. W drugiej iteracji wprowadzamy korektę wag w otoczeniu wektora odpowiadającego wybranemu przez decydenta rozwiązaniu z poprzedniej iteracji. Dla pięciu nowych wektorów wyznaczamy nowe rozwiązanie, które ponownie przedstawiamy do oceny decydentowi. Postępowanie (kolejne iteracje) kończymy, gdy decydent uzna któreś z rozwiązań za całkowicie go satysfakcjonujące.

5.4. ANALIZA RYZYKA W PLANOWANIU PRACY ZASOBÓW ZŁOŻONYCH

Pod pojęciem **ryzyka** rozumie się w proponowanym podejściu możliwość wystąpienia nieoczekiwanych okoliczności, powodujących **konieczność weryfikacji pierwotnych decyzji w zakresie alokacji zasobów** do realizacji zadań na frontach robót w celu **bezwzględного dotrzymania terminów dyrektywnych**.

Analiza ryzyka to rozpoznanie zagrożeń w analizowanej sytuacji decyzyjnej oraz ustalenie ich przyczyn i możliwych następstw.

W pracy rozpatruje się ryzyko mogące wystąpić **w trakcie realizacji przedsięwzięcia**. Nie rozpatruje się ryzyka na poziomie makro (w dalszym otoczeniu

rozpatrywanej sytuacji decyzyjnej) ani na poziomie mikro (w otoczeniu bliższym rozpatrywanej sytuacji decyzyjnej).

Celem analizy ryzyka jest kwantyfikacja niepożądanych czynników losowych, mogących pojawić się w sytuacji decyzyjnej, określenie ich wpływu na przebieg realizacji zadań na frontach robót w przyjętym horyzoncie planowania oraz uświadomienie planującego co do możliwości powstania zakłóceń wraz z ich charakterystyką ilościową, a także wskazanie **sposobu przeciwdziałania tym zakłóceniom**. Praktycznie cel ten sprowadza się do:

- określenia metodyki monitorowania i oceny postępu realizacji zadań na poszczególnych frontach roboczych,
- określenia zasad wyznaczenia rezerw zasobowych przeciwdziałających możliwym zakłóceniom,
- określenia zasad użycia rezerw zasobowych w celu dotrzymania terminów dyrektywnych w realizacji zadań na frontach roboczych.

Prowadzone rozważania oparte są na teorii ograniczeń (*Theory of Constraints* – **TOC**), dostosowanej do potrzeb analizy alokacji zasobów złożonych w realizacji zadań na frontach robót z celem nadrzędnym: zapewnienia możliwie najwyższej **niezawodności dotrzymania ustalonych terminów dyrektywnych** realizacji zadań na frontach robót, **ale** przy racjonalnym poziomie alokacji zasobów. Szerzej o istocie projektowania systemu (tu: planowania działań inżynierijsko-budowlanych) i procesie jego doskonalenia według pięcioetapowej procedury **TOC** napisano w pracy [22].

Analiza ryzyka prowadzona jest przez **ocenę niepewności dotrzymania terminów dyrektywnych** realizacji zadań na frontach roboczych wraz z **zaplanowaniem działań przeciwdziałających ryzyku niedotrzymania tych terminów**. Zadanie proponuje się rozwiązać według następującego porządku:

1. Zakłada się – jak dotychczas – że wszystkie fronty robót mają określone dyrektywne terminy realizacji zdefiniowanych na nich zbiorów zadań $\langle e_j^s, e_j^f \rangle$.
2. Na potrzeby zrealizowania zadań na frontach roboczych określana jest – według zależności (5.6) i (5.7) – obliczeniowa i realna ilość przydzielonych jednostek zasobów podstawowych.
3. Określana jest decyzja alokacji zasobów macierzą **X** oraz jej rozwinięcie do szerebła zasobów podstawowych – macierz $\mathbf{X}' = [x'_{kj}]_{z \times m}$.
W tym kroku spełniony musi być warunek: $x'_{kj} \geq b''_{kj}$ dla każdego $k: z_k \in Z'$ i dla każdego $j: f_j \in F$.

4. Obliczone zostają „normatywne” czasy trwania realizacji zadań na frontach robót dla każdego z rodzaju zasobów podstawowych $t_{jk}^p = \frac{w'_{kj}}{x'_{kj}}$, dla $k: z_k \in Z'$, dla $j: f_j \in F$. Wartości czasów t_{kj}^p są zatem funkcją pracochłonności danego rodzaju zasobu w realizacji zadań na danym froncie robót oraz decyzji alokacyjnej.

5. Obliczony zostaje „**normatywny**” czas wykonania zadań na frontach robót. Czas ten będzie zawsze krótszy od czasu dyrektywnego $t_j^p \leq t_j^d$ i obliczony jest z zależności (5.8).
6. Stawiamy pytanie: **Jak zapewnić eliminację zagrożeń związanych z terminowym zrealizowaniem zadań na frontach robót? Czyli:** Jaką ilość zasobów przydzielić do wykonania zadań na każdym froncie robót, mając na względzie **zagrożenia** określone w procesie identyfikacji czynników ryzyka?
7. Uznajemy dalej, przyjmując założenia teorii ograniczeń, że określony odgórnie termin dyrektywny (t_j^d), na podstawie którego obliczono nakłady zasobów podstawowych do realizacji zadań w ramach frontów robót, może być zrealizowany z prawdopodobieństwem **90%** sukcesu.
8. Szacujemy **najbardziej prawdopodobny czas realizacji zadań na froncie robót** przez zasób będący „wąskim gardłem”. W teorii ograniczeń, której założenia stosujemy, rezerwy czasowe są eliminowane przez ustalenie czasu najbardziej prawdopodobnego, który przy założeniu rozkładu *Beta* jest średnio o 50% krótszy od czasu szacowanego z prawdopodobieństwem 90% ($t_j^s = 0,5t_j^d$) [3, 12].
9. Obliczamy rezerwę zasobową (**RZ**) dla zasobów podstawowych k : $z_k \in Z'$. Rezerwa zasobowa wyrażona jest w postaci ilości zasobów wymaganych do zrealizowania **50%** pozostałego czasu – powyżej czasu określonego z prawdopodobieństwem zrealizowania 50% (t_j^s). **Rezerwę zasobową** liczymy według wzoru:

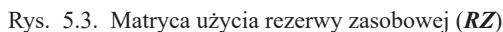
$$b_{kj}^{RZ} = \text{ent} \left[\frac{w'_{kj} - (x'_{kj} \cdot 0,5t_j^d)}{t_j^d} \right] \quad \text{dla } k: z_k \in Z', \text{ dla } j: f_j \in F \quad (5.20)$$

Tak określona ilość jednostek zasobowych ze szczebla zasobów podstawowych pozostaje „w odwodzie” do wykorzystania **w razie konieczności** wzmocnienia dotychczasowego zespołu zasobów.

Kiedy powstaje ta konieczność? Kiedy powstanie moment „uruchomienia” **RZ**?

10. Na potrzeby określenia momentu wprowadzenia zasobów z bufora **RZ** do realizacji zadań na frontach roboczych proponuje się zastosować ideę metod opartych na kontroli postępu realizacji przedsięwzięć. Skorzystamy z idei metod *Earned Schedule Method* [10, 13, 20, 25] oraz *Earned Value Management* [4, 6, 19, 21], wprowadzając pewne autorskie modyfikacje.

Na potrzeby kontroli postępu wykonania zadań na poszczególnych **frontach robót** oraz podjęcia ewentualnych działań niwelujących odchylenia niebezpieczne dla dotrzymania terminu dyrektywnego ich zakończenia budowana jest matryca użycia **RZ**. W sposób schematyczny przedstawiono ją na rys. 5.3.



- czas zakończenia zadań na froncie w terminie dyrektywnym – t_j^d ,
- czas zakończenia robót w terminie wynikającym z decyzji alokacyjnej – t_j^p ,
- najbardziej prawdopodobny czas realizacji zadań na froncie robót, oparty na założeniach metody **TOC** – t_j^s ,
- punkty kontrolne (**PK**), w których prowadzona będzie analiza postępu wykonania zadań w ramach frontu.

Matryca budowana jest odrębnie dla każdego frontu robót, rozpatrywane-
go w przyjętym horyzoncie planowania.

Na tak przygotowaną matrycę nanoszone są następnie wykresy:

- **HTO** – wykres postępu robót według prognozowanego czasu optymistycz-
nego (według założeń **TOC** – najbardziej prawdopodobnego) t_j^s ,
- **HTP** – wykres postępu robót według prognozowanego czasu wynikające-
go z decyzji alokacyjnej t_j^p ,
- **HTD** – wykres postępu robót według czasu dyrektywnego t_j^d .

Wykresy dzielą matrycę na określone strefy (patrz rys. 5.3). Strefa zielona
jest strefą **ryzyka pomijalnego**, w której ryzyko w zasadzie nie występuje
i może nie być brane pod uwagę na danym etapie analizy. Strefa żółta to strefa
ryzyka akceptowalnego. Jest to ryzyko dopuszczalne (ale warunkowo), któ-
re należy już brać pod uwagę podczas dalszej analizy. Strefa pomarańczowa
to **ryzyko istotne**, wymagające podjęcia działań niwelujących zagrożenie.
Strefa czerwona to **ryzyko niedopuszczalne**.

Monitorowanie postępu wykonywania zadań oraz ewentualnych odchyień
od harmonogramu w realizacji zadań j-tego frontu robót przebiega według
następującej metodyki:

- a. W każdym **PK** planujący podaje wartość procentową rzeczywistego stanu
zaawansowania robót, budując wykres stanu zaawansowania robót (**SZR**).
- b. W każdym **PK** określone (odczytywane z osi rzędnych) są wartości **HTO**,
HTP i **HTD**.

Dla przykładu – na rys. 5.3 zaznaczono w punkcie kontrolnym **PK2** wska-
zaną przez planującego wartość **SZR** = 40% oraz wartości **HTO** = 51%,
HTP = 32% i **HTD** = 25%.

- c. Na podstawie powyższych danych obliczane są wskaźniki odchylenia har-
monogramu (**WOH**) w odniesieniu do poszczególnych wykresów progno-
zowanego postępu robót, tj.:

- i. wskaźnik odchylenia harmonogramu według prognozowanego cza-
su optymistycznego (według założeń **TOC** – najbardziej prawdopo-
dobnego) **HTO**: $WOHTO = \frac{SZR}{HTO}$, gdzie: **SZR** – wartość wyrażona
w punktach procentowych [%], podana przez planującego jako rze-
czywisty stan zaawansowania prac; **HTO** – wartość wyrażona w punk-
tach procentowych [%], odczytana z osi rzędnych dla wykresu **HTO**;
- ii. wskaźnik odchylenia harmonogramu według prognozowanego czasu,
wynikającego z decyzji alokacyjnej **HTP**: $WOHTP = \frac{SZR}{HTP}$, gdzie:
SZR – jak wyżej; **HTP** – wartość wyrażona w punktach procento-
wych [%], odczytana z osi rzędnych dla wykresu **HTP**;

- iii. wskaźnik odchylenia harmonogramu według czasu dyrektywnego
 HTD : $WOHTD = \frac{SZR}{HTD}$, gdzie: SZR – jak wyżej; HTD – wartość wyrażona w punktach procentowych [%], odczytana z osi rzędnych dla wykresu HTD .

Umieszczenie wykresu SZR w określonych strefach ryzyka w zależności od wartości wskaźników WOH przedstawia tabela 5.1.

Tabela 5.1

Umieszczenie SZR w poszczególnych strefach ryzyka

Wartości wskaźników <i>WOH</i>					
<i>WOHTO</i>		<i>WOHTP</i>		<i>WOHTD</i>	
≥ 1	< 1	≥ 1	< 1	≥ 1	< 1
RYZYO POMIJALNE	RYZYO AKCEPTOWALNE	RYZYO ISTOTNE	RYZYO NIEDOPUSZCZALNE		
STREFY RYZYKA W TRAKCIE REALIZACJI ROBÓT					

- d. Dodatkowo obliczony zostaje prognozowany termin zakończenia frontu robót: $e_j^{fp} = e_j^f - t \cdot (WOHTD - 1)$, gdzie: e_j^{fp} – szacowany (prognozowany) czas zakończeniu robót na j -tym froncie, przy założeniu, że postęp prac w dalszej realizacji zadań będzie taki, jak planowano; e_j^f – planowany termin dyrektywny zakończenia j -tego frontu roboczego; t – czas, w którym dokonywana jest analiza (będzie to z reguły któryś z PK); $WOHTD$ – wskaźnik odchylenia harmonogramu według czasu dyrektywnego HTD .

Przeprowadzona analiza ryzyka pozwala na określenie momentu podjęcia działań niwelujących odchylenia niebezpieczne dla dotrzymania terminu dyrektywnego zakończenia frontu robót. W tym aspekcie istotna jest wartość wskaźnika $WOHTP$. **Ryzyko istotne**, wymagające „uruchomienia” zasobów z RZ , pojawia się w punkcie kontrolnym, w którym zachodzi zależność:

$$WOHTP < 1 \quad (5.21)$$

W tabeli 5.2 przedstawiono przykładowe zestawienie danych odczytanych z matrycy użycia rezerwy RZ (rys. 5.3) wraz z wynikami analizy dla przyjętego przebiegu wykresu SZR . W przykładzie założono: $e_j^s = 0$, $e_j^f = 12$.

11. Określana jest dostępność zasobów podstawowych z uwzględnieniem decyzji alokacyjnej oraz potencjału rezerwy zasobowej. Przyjmujemy, że poziom dostępności zasobów podstawowych zawiera macierz $\mathbf{D} = [d_{kt}]_{z \times H}$, gdzie d_{kt} określa ilość jednostek zasobu o indeksie k : $z_k \in Z'$, dostępnych w chwili $t = 1, 2, \dots, H$ w postaci addytywnych jednostek zasobowych. Przy czym

obecnie, po uwzględnieniu nie tylko decyzji alokacyjnej, ale także zasobów z rezerwy **RZ**, elementy macierzy **D** przyjmują wartości:

$$\begin{aligned} d_{kt} &= q_{kt} - (x'_{kj} + b^{RZ}_{kj}) \quad \text{dla } j: e_j^s \leq t \leq e_j^f, \text{ dla } k: z_k \in Z' \\ d_{kt} &= q_{kt} \quad \text{dla } j: t > e_j^f \text{ oraz } t < e_j^s, \text{ dla } k: z_k \in Z' \end{aligned} \quad (5.22)$$

Tabela 5.2

Przebieg wykresu **SZR** przez strefy ryzyka w macierzy użycia **RZ** – przykład

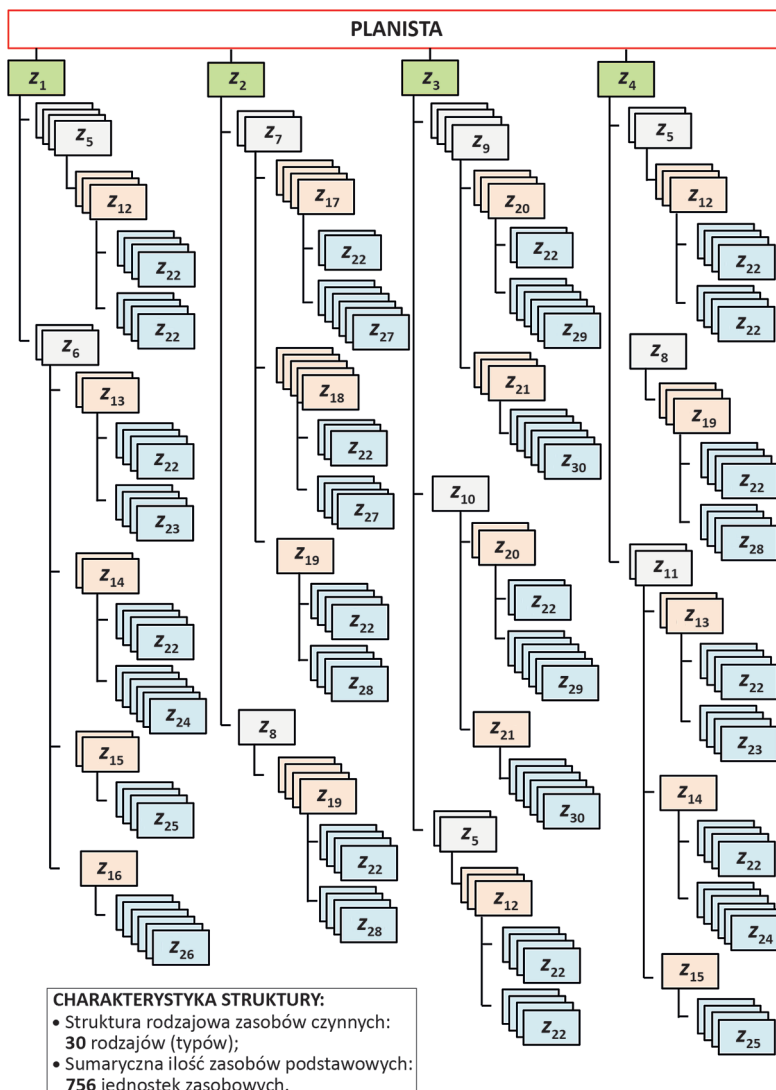
Nr <i>PK</i>	Termin <i>PK</i>	Podana wartość <i>SZK</i>	Prognozowana wartość			Wskaźniki odchylenia harmonogramu			Termin e_j^{fp}
			<i>HTO</i>	<i>HTP</i>	<i>HTD</i>	<i>WOHTO</i>	<i>WOHTP</i>	<i>WOHTD</i>	
	[<i>t</i>]	[%]	[%]	[%]	[%]				
0	0	0	0	0	0	–	–	–	–
1	1,5	30	25	17	12	1,20	1,76	2,50	9,75
2	3	40	51	32	25	0,78	1,25	1,60	10,2
3	4,5	50	74	48	37	0,68	1,04	1,35	10,42
t_j^s	6	75	100	63	50	0,75	1,19	1,50	9
5	7,5	80	100	79	62	0,80	1,01	1,29	9,82
6	9	90	100	96	74	0,90	0,94	1,22	10,05
t_j^p	9,4	92	100	100	76	0,92	0,92	1,21	10,02
7	10,5	95	100	100	87	0,95	0,95	1,09	11,03
t_j^z	10,8	100	100	100	88	1,00	1,00	1,14	10,53
t_j^d	12	100	100	100	100	1,00	1,00	1	12

Zauważmy, że zasoby **RZ** są „zamrażane” w całym okresie pomiędzy terminami dyrektywnymi $\langle e_j^s, e_j^f \rangle$ – nie wiadomo bowiem, kiedy wystąpi potrzeba ich użycia. Jest to pewna niedogodność, powodująca stosunkowo wysoki wskaźnik zajętości zasobów (czyli braku ich dostępności w dalszych analizach). Stanowi natomiast warunek konieczny przy założeniu potrzeby bezwzględного dotrzymania terminu dyrektywnego zakończenia frontu oraz przy przyjętym w pracy sposobie analizy ryzyka i jego kontroli.

12. Prowadzony jest dalszy monitoring przebiegu robót w czasie według metodyki opisanej w punkcie 10.

5.5. PRZYKŁAD HARMONOGRAMOWANIA PRACY ZASOBÓW ZŁOŻONYCH Z UŻYCIEM DEDYKOWANEJ APLIKACJI KOMPUTEROWEJ

Zadanie polega na bilansowaniu hierarchicznej struktury zasobów czynnych w planowaniu przedsięwzięć inżyniersko-budowlanych (zadań), realizowanych w ramach wydzielonych frontów roboczych. Czteropoziomowa hierarchiczna struktura



Rys. 5.4. Hierarchiczny układ struktury zasobów realizatora – przykład

zasobów (rys. 5.4) składa się z 30 rodzajów zasobów złożonych, z realnym potencjałem wykonawczym w liczbie 756 jednostek zasobowych. Interpretację macierzową (macierz **P**) struktury realizatora z rys. 5.4 pokazano w tabeli 5.3.

W tabeli kolorem czerwonym zaznaczono niezerowe wartości, określające ilość jednostek zasobowych zasobu o indeksie k : $z_k \in Z$ w każdej jednostce zasobu o indeksie s : $z_s \in Z$. Zacieniono komórki stanowiące reprezentację poziomu zasobów podstawowych.

Tabela 5.3

Interpretacja macierzowa (macierz **P**) struktury realizatora z rys. 5.4

HIERARCHIA STRUKTURY ZASOBÓW – RODZAJ I LICZBA JEDNOSTEK ZASOBÓW CZYNNYCH POZOSTAJĄCYCH ZE SOBĄ W BEZPOŚREDNIEJ PODLEGŁOŚCI																															
LEGENDA: <i>RZP</i> – rodzaj zasobu bezpośrednio podległego; <i>RZN</i> – rodzaj zasobu bezpośrednio nadrzędnego																															
<i>RZP</i> <i>RZN</i>																						zasoby podstawowe									
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}	z_{11}	z_{12}	z_{13}	z_{14}	z_{15}	z_{16}	z_{17}	z_{18}	z_{19}	z_{20}	z_{21}	z_{22}	z_{23}	z_{24}	z_{25}	z_{26}	z_{27}	z_{28}	z_{29}	z_{30}	
z_1	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_2	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_3	0	0	0	0	2	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_4	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0
z_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	6	0	0	0	0	0	0	0
z_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
z_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
z_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	6	0	0	0	0
z_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0
z_{19}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4	0	0	0
z_{20}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	6	0
z_{21}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0

Jako planistyczną jednostkę czasu przyjęto **roboczy dzień pracy** (liczony jako 10 godzin pracy w ciągu doby) (rys. 5.5a).

Jednostkowe „koszty strat” niewykorzystania zasobów podstawowych, odniesione do przyjętych jednostek czasu (w modelu jest to wektor C^{zp}), przedstawia tabela 5.4.

W przykładzie zasoby złożone będą określane symbolem i nazwą skróconą ćwiczebnych pododdziałów jednostek wojsk inżynieryjnych – bez podania pełnej nazwy zasobu, natomiast zasoby podstawowe oznaczono jedynie symbolem i nazwą (rys. 5.5b).

Tabela 5.4

Jednostkowe „koszty strat” niewykorzystania zasobów podstawowych – przykład

JEDNOSTKOWE „KOSZTY STRAT” ZWIĄZANE Z PRZESTOJEM ZASOBÓW PODSTAWOWYCH NA FRONTACH ROBOCZYCH									
Rodzaj zasobu podstawowego	z ₂₂	z ₂₃	z ₂₄	z ₂₅	z ₂₆	z ₂₇	z ₂₈	z ₂₉	z ₃₀
„Koszt jednostkowy” związany z niepełnym wykorzystaniem potencjału zasobu delegowanego do realizacji zadań na frontach roboczych [wskaźnik oceny / jednostkę czasu]	2	6	7	10	8	4	8	4	8

BAZA DANYCH O STRUKTURZE

a)

DEFINIOWANIE ILOŚCI ORAZ NAZW ZASOBÓW CZYNNYCH

PODAJ NAZWY RODZAJOWE ZASOBÓW CZYNNYCH

Lista zdefiniowanych zasobów

Z	Nazwa zasobu	Zasób podstawowy
z1	kdm	NIE
z2	kmst	NIE
z3	kpont	NIE
z4	kminz	NIE
z5	plsap	NIE
z6	pldm	NIE
z7	pldem-mont	NIE
z8	pltransp	NIE
z9	plpont	NIE
z10	plprzepraw	NIE

**szare wiersze oznaczają zasoby podstawowe

*aby edytować, kliknij dwukrotnie wybraną komórkę lub zaznacz komórkę do edycji i kliknij przycisk Edytuj

b)

DEFINIOWANIE CZASU, OKREŚLENIE HORYZONTU PLANOWANIA

Zdefiniuj planistyczne jednostki czasu:

☐ Godzina pracy

☒ Doba pracy

Określ horyzont czasu planowania:

Początek t1: 1

Koniec t-H: 30

Zapisz

Anuluj

OK

Rys. 5.5. Ekran programu – „Definiowanie danych podstawowych”. Otwarte okna:
a) definiowania liczby i nazw zasobów; b) definiowania czasu

Lista zadań rozpatrywanych w przykładzie (w modelu jest to zbiór *O*) wraz z ich jednostkami obmiarowymi oraz nakładami pracy na ich wykonanie, wyrażonymi przez strukturę zasobów (w modelu jest to macierz *N'*), wprowadzone zostają do pozostałych tabel aplikacji. Przyjęto, że zadania realizowane będą na dziesięciu addytywnych frontach roboczych (w modelu jest to zbiór *F*) z określonymi przedmiotami zadań do wykonania (w modelu jest to macierz *K*). Horyzont czasu planowania określa się **na 30 dni** (patrz rys. 5.5b). Przyjęto, że do realizacji zadań inżynieryjno-budowlanych na analizowanych frontach roboczych planuje się wykorzystanie

pełnej struktury zasobów, która została przedstawiona na rys. 5.6. Założono, że we wstępnym okresie planowania nie przewidziano okresowego wsparcia dodatkowymi zasobami oraz okresowych braków zasobów w potencjale realizacyjnym.

Rozwiązanie zadania jest możliwe w dwóch aspektach:

- wspomaganie decyzji w zakresie przydziału zasobów do zadań w warunkach deterministycznych,
- wspomaganie decyzji w zakresie przydziału zasobów z uwzględnieniem analizy ryzyka w procesie planowania i realizacji zadań.

Wybór sposobu analizy dokonywany jest w drugim kroku analizy na ekranie głównym aplikacji.

Analiza deterministyczna

Zgodnie z metodyką opisaną modelem matematycznym, wspomaganie decyzji w warunkach deterministycznych polega na prowadzeniu analizy możliwości wykonania zadań, w tym analizy potrzebnych zasobów oraz analizy czasu wykonania zadań. Oba rodzaje analiz kontrolowane są oceną stopnia dopasowania realizatora do realizacji zadań. Poniżej (rys. 5.6) pokazano okno „oceny dopasowania realizatora do realizacji zadań”, na którym widoczne są wyliczenia „kosztów strat” poszczególnych zasobów podstawowych w realizacji frontów robót, z wyróżnieniem kolejnych frontów roboczych.

OCENA DOPASOWANIA REALIZATORA DO REALIZACJI ZADAŃ											
"KOSZTY STRAT" Z TYTUŁU NIEPEŁNEGO WYKORZYSTANIA POTENCJAŁU PRODUKCYJNEGO REALIZACJI ZADAŃ NA FRONTACH ROBOCZYCH											
<Koszty> poszczególnych zasobów podstawowych na frontach roboczych - tablica L											
<Sumaryczne koszty strat> odniesione do frontów roboczych - wektor C											
Rodzaj zasobu podstawowego	C	80,3	236,1	112,1	34,3	38,5	100,6	96,9	116	80,2	73,9
	L	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10
	z22	1,5	60	21	13,7	9,1	8	13,1	17,5	6,5	11,2
	z23	15	43,8	0	0	13,9	0	0	0	0	16
	z24	36,8	46,9	10,3	0	15,5	23,3	0	8,6	0	16,8
	z25	0	44,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	z26	5	16,9	0	0	0	7,1	0	0	0	6,4
	z27	0	4,6	12	0	0	0	14,8	20	10,6	0
	z28	22	19,2	3,8	0	0	24,9	2,5	2,4	11,3	23,5
	z29	0	0	6,6	13,7	0	5,3	22,2	23,1	23	0
	z30	0	0	58,4	6,9	0	32	44,3	44,4	28,8	0

Rys. 5.6. Ekran programu – „Ocena dopasowania realizatora do realizacji zadań”

Ocena stopnia dopasowania realizatora do realizacji zadań kończy zakres analizy dotyczący wspomaganie decyzji w zakresie przydziału zasobów w warunkach deterministycznych.

Analiza ryzyka przyjętej sytuacji decyzyjnej

Analiza, zarządzanie oraz kontrolowanie ryzyka w prezentowanym modelu i rozpatrywanym przykładzie prowadzone są dwuetapowo:

- na etapie planowania robót – przez wyliczenie niezbędnych rezerw zasobowych,
- na etapie realizacji robót – przez monitorowanie stanu zaawansowania robót i ocenę ryzyka niedotrzymania terminów dyrektywnych na poszczególnych frontach roboczych.

Jak opisano powyżej – w modelu (także w aplikacji) – wyliczony zostaje potencjał **RZ**, odniesiony do poszczególnych frontów robót. Rezerwy zasobowe zwiększają automatycznie zapotrzebowanie na globalny potencjał produkcyjny w skali czasu. Niezbędna jest zatem analiza dostępności zasobów podstawowych z uwzględnieniem potencjału **RZ**. Analizę taką pokazano na rys. 5.7. Jak widać, z zobrazonej graficznie analizy wynika, że dla zasobu typu z_{28} poziom potrzeb przekracza poziom możliwości. Potrzebna jest zatem zmiana warunków realizacji zadania, np. przez okresowe wsparcie analizowanej struktury zasobów dodatkowymi jednostkami zasobowymi.

Monitorowanie stanu zaawansowania robót i ocena ryzyka niedotrzymania dyrektywnego terminu zakończenia robót odbywa się odrębnie dla każdego analizowanego frontu robót. Po dokonaniu wyboru frontu do takiej analizy wyświetla się



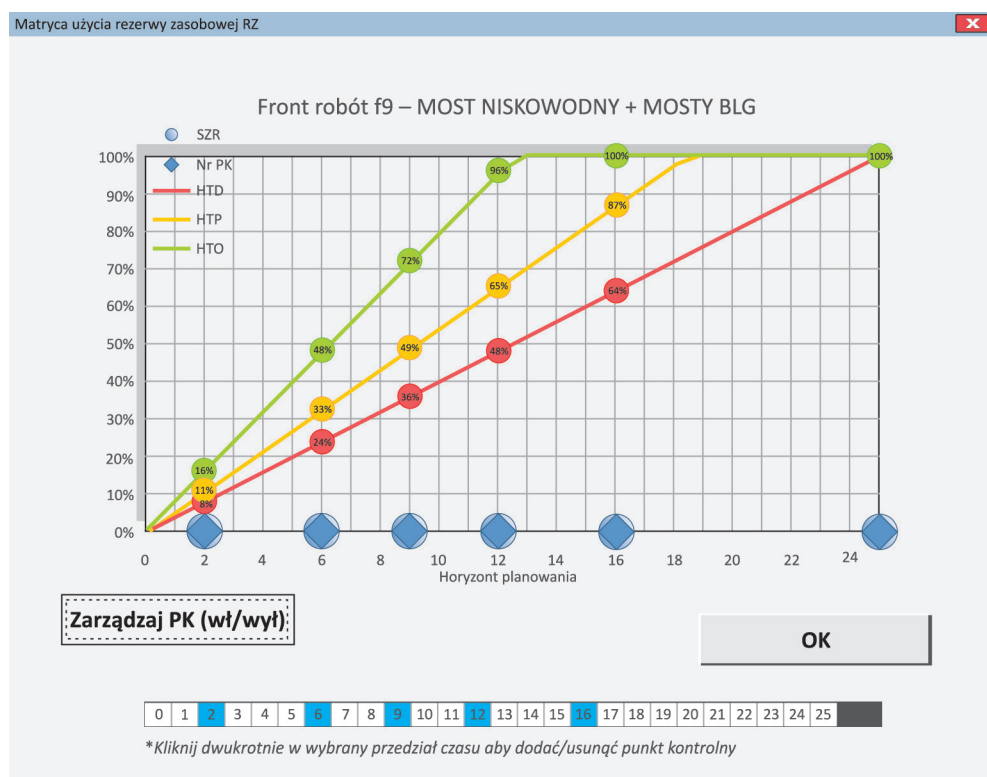
Rys. 5.7. Wykres zatrudnienia z uwzględnieniem **RZ** zasobu z_4 w skali czasu

zbudowana automatycznie przez program „matryca użycia rezerwy zasobowej”. Przykładowo, na rys. 5.7 pokazano „matrycę użycia rezerwy zasobowej” zbudowaną dla frontu f_9 , z uaktywnionymi przez użytkownika pięcioma punktami kontrolnymi, w których planowany jest monitoring stanu zaawansowania robót. Na tym etapie stan zaawansowania robót jest „zerowy”.

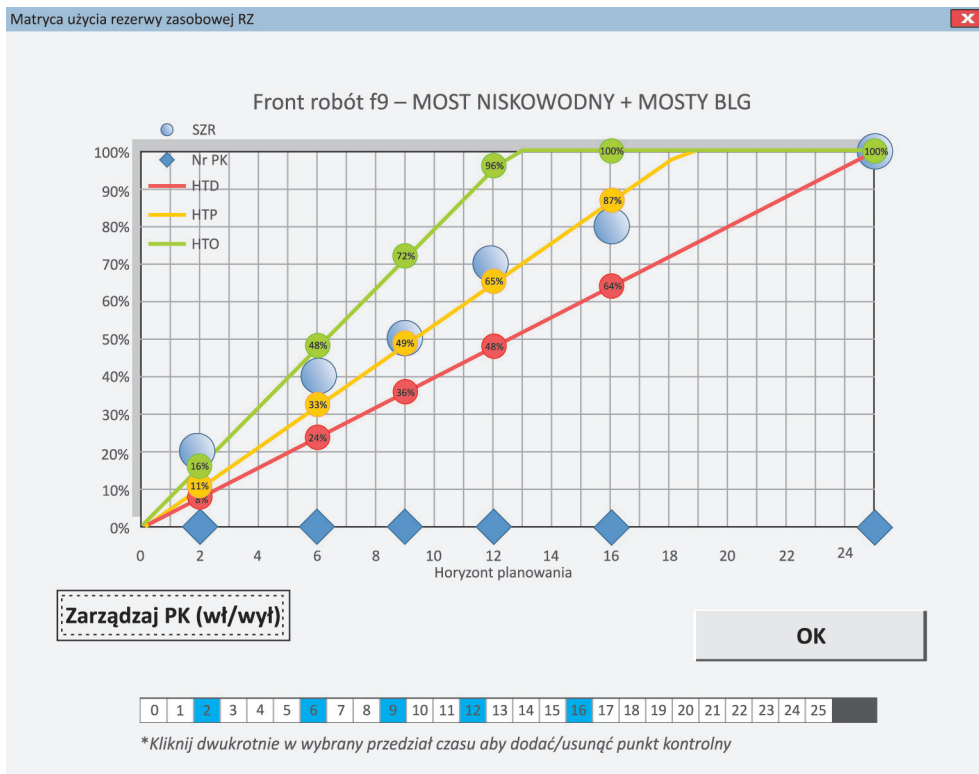
Na rys. 5.8 pokazano „matrycę użycia rezerwy zasobowej” z wypełnionymi przykładowymi wartościami stanu zaawansowania robót.

Z analizy matrycy wynika, że w pierwszym punkcie kontrolnym (**PK1**) wykres **SZR** (20%) znajduje się w strefie ryzyka pomijalnego (kolor zielony). W terminie $\langle 6, 12 \rangle$ wykres **SZR** (40%, 50%, 70%) przebiega przez strefę ryzyka akceptowalnego (kolor żółty), natomiast w **PK5** (80%) przechodzi w strefę ryzyka istotnego (kolor pomarańczowy), co wymusiłoby podjęcie czynności przeciwdziałających temu ryzyku, czyli uruchomienie potencjału **RZ**.

Budowa „matrycy użycia rezerwy zasobowej” kończy zadanie w aspekcie wspomagania decyzji w zakresie przydziału zasobów, z uwzględnieniem analizy ryzyka w procesie planowania i realizacji zadań.



Rys. 5.8. Matryca użycia **RZ** dla analizowanego w zadaniu frontu f_9 – brak danych o stanie zaawansowania robót



Rys. 5.9. Matryca użycia **RZ** dla analizowanego w zadaniu frontu f_9 – dane o stanie zaawansowania robót w poszczególnych **PK**

5.6. PODSUMOWANIE

Przedmiotem zaprezentowanej w pracy analizy są problemy planowania działalności inżynierijno-budowlanej jednostek zmilitaryzowanych oraz innych jednostek mających złożoną strukturę zasobów (o charakterze hierarchicznym) w realizacji zadań budowlanych realizowanych na addytywnych (oddzielnych) frontach robót. Działalność taka prowadzona jest z reguły w sytuacjach kryzysowych w ramach utrzymania infrastruktury budowlanej przez wydzielone, zorganizowane w struktury sztabowo-liniowe jednostki organizacyjne.

Podjęty temat osadzony jest w praktyce planowania działań inżynierijno-budowlanych, uwzględniających potrzeby planistów zarządzających złożoną strukturą zasobów. Zaproponowany sposób planowania działalności jednostek zasobowych o hierarchicznie zorganizowanej strukturze bazuje na normalizacji zadań inżynierijno-budowlanych, jaką stosuje się powszechnie w budownictwie. Sposób ten dedykuje się planowaniu działań w sytuacjach kryzysowych, w których potencjalne

(przewidywane) zadania powinny być również znormowane, uzupełniając bazę KNR. Charakter przedmiotu planowania wymusił potrzebę uwzględnienia w opracowanej metodzie niepewności danych ilościowych wykorzystywanych w planowaniu. W tym aspekcie zaprezentowano koncepcję zarządzania ryzykiem, przede wszystkim zaś – sposób przeciwdziałania zagrożeniom niedotrzymania terminów dyrektywnych na etapie planowania i podczas realizacji robót inżyniersko-budowlanych na frontach roboczych.

W rozwiązaniu podjętych w rozprawie zagadnień zastosowano metody analizy matematycznej i badań operacyjnych oraz współczesne osiągnięcia teorii harmonogramowania procesów pracy.

Podjęty temat oraz zaprezentowane w pracy podejście do planowania operacyjnego, przez pryzmat jednostek złożonych (zhierarchizowanych) i frontów robót, stanowi **nowy problem w obszarze harmonogramowania pracy zasobów czynnych**.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamiecki K. (1985), *O nauce organizacji*, PWE, Warszawa.
- [2] Afanasjev V.A, Afanasjev A.V. (2000), *Potocnaja organizacija rabot v stroitelstwie*, Sankt-Petersburg.
- [3] Bednarz L. (2009), *Planowanie zadań i zasobów w projektach logistycznych metodą łańcucha krytycznego*, XI Konferencja Naukowa PTZP: Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. Materiały konferencyjne, Zakopane, 80–87.
- [4] Czarnigowska A. (2009), *Kontrola postępu realizacji przedsięwzięcia metodą Earned Value*, Przegląd Budowlany, 2, 50–55.
- [5] Czarnigowska A., Jaśkowski P., Sobotka A. (2004), *Zastosowanie metody łańcucha krytycznego w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych*, Konferencja Naukowa: Zarządzanie procesami inwestycyjnymi w budownictwie, Kraków.
- [6] Dziadosz A., Kapliński O., Rejment M. (2008), *Ryzyko w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Retrospekcja z konferencji w Ciechocinku (1999–2007)*, [w:] *Ryzyko. Zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwie. Strategie zarządzania ryzykiem w przedsiębiorstwie – ryzyko przedsiębiorstwa a ryzyko projektu*, J. Bizon-Górecka (red. nauk.), TNOiK, Bydgoszcz, 29–46.
- [7] Goldratt E.M. (2007), *Cel II. To nie przypadek*, Mint Books, Warszawa.
- [8] Goldratt E.M. (2009), *Łańcuch krytyczny*, Mint Books, Warszawa.
- [9] Goldratt E.M., Cox J. (2007), *Cel I. Doskonałość w produkcji*, Mint Books, Warszawa.
- [10] Henderson K. (2007), *Earned Schedule: A Breakthrough Extension to Earned Value Management*, Proceedings of PMI Global Congress Asia Pacific, www.earnedschedule.com/papers.

- [11] Jaworski K.M. (1999), *Metodologia projektowania realizacji budowy*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [12] Leach L.P. (2005), *Lean Project Management: Eight Principles for Success*, South Pegasus Way, Boise.
- [13] Lipke W., Henderson K., *Earned Schedule-an emerging to EVM*, www.pmicos.org/topics/EVMDEC07.pdf.
- [14] Marcinkowski R. (2002a), *Alokacja hierarchicznych struktur realizatorów w planowaniu wojskowych przedsięwzięć inżynierskich*, Biuletyn WAT, XLV, 7.
- [15] Marcinkowski R. (2002b), *Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżyniersko-budowlanej*, WAT, Warszawa.
- [16] Marcinkowski R. (1996), *Planowanie przedsięwzięć z analizą hierarchicznych struktur realizatorów*, XLII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTb, Krynica.
- [17] Marcinkowski R. (2002), *Zarządzanie zasobami o strukturach złożonych w działalności inżyniersko-budowlanej*, XVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTb, Opole – Krynica.
- [18] Marcinkowski R., Sekunda R. (2015), *Bilansowanie hierarchicznej struktury zasobów w planowaniu przedsięwzięć inżyniersko-budowlanych*, Biuletyn WAT, LXIV, 3, 113–130.
- [19] Połowski M. (2010), *Kontrola kosztów budowy metodą EVM jako metodą prognozowania ryzyka przekroczenia planowanego budżetu*, Przegląd Budowlany, 10, 46–52.
- [20] Połowski M. (2012), *Prognozowanie czasu zakończenia inwestycji na podstawie jej bieżącego zaawansowania*, Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych, 13(3), 169–179.
- [21] Połowski M., Komendarek P. (2011), *Bieżąca kontrola kosztów realizacji obiektu budowlanego metodą earned value*, Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych, 12(2), 279–290.
- [22] Sekunda R. (2017), *Planowanie działań inżyniersko-budowlanych realizowanych przez jednostki o zhierarchizowanych strukturach zasobów*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa.
- [23] Smutnicki C. (2002), *Algorytmy szeregowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- [24] Świątnicki Z. (1995), *Wojskowe systemy eksperckie*, Bellona, Warszawa.
- [25] Van De Velde R. (2007), *Time is up: Assessing Schedule Performance with Earned Value*, PM World Today, IX, X, www.earnedschedule.com/papers.

6. PROAKTYWNE PODEJŚCIE DO PLANOWANIA PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH Z WYKORZYSTANIEM TEORII METASIECI

Grzegorz Śladowski¹

6.1. WSTĘP

Zasadniczym źródłem problemów z dotrzymaniem planowanego czasu i nieprzekroczenia budżetu przedsięwzięcia budowlanego jest wysoki poziom ryzyka i niepewności, który towarzyszy jego realizacji. Brak pełnej wiedzy na temat możliwych zdarzeń i ich wpływu na przebieg wykonania przedsięwzięcia często zniechęca decydentów do szczegółowego uwzględniania ryzyka w ramach prac planistycznych. Fakt ten powoduje, że pożądane proaktywne podejście do planowania przedsięwzięć budowlanych w praktyce ustępuje temu reaktywnemu i zdeintegrowanemu [38].

Słowo „ryzyko” pochodzi od staro włoskiego *risicare* (‘odważyć się’) i wiąże się z podejmowaniem decyzji, a nie bierną postawą wobec tzw. przeznaczenia [4]. W literaturze ryzyko jest definiowane na wiele sposobów, jednak większość interpretacji określa je jako niepewność, którą można zmierzyć, w przeciwieństwie do tzw. niepewności *sensu stricto* [22]. Ryzyko w budownictwie może mieć prawny, ekonomiczny, techniczny, jak również technologiczno-organizacyjny charakter [21]. Zarządzanie ryzykiem może być podejmowane zarówno z poziomu makro, jak i mikro otoczenia oraz na poziomie samego przedsięwzięcia [32]. Zarządzanie ryzykiem można sprowadzić do trzech zasadniczych etapów: identyfikacji ryzyka, jego kwantyfikacji oraz opracowania reakcji na to ryzyko [10]. Zasadniczo reakcja ta nie powinna polegać na akceptacji negatywnych skutków ryzyka, tylko zmierzać do wypracowania sposobów jego unikania, redukcji lub np. przeniesienia na inne podmioty [10, 32]. Ważną cechą ryzyka jest jego podmiotowość, co oznacza, że zarządzanie nim może być zróżnicowane, ponieważ zależne jest od interesariuszy. Inne podejście do ryzyka może mieć np. inwestor, inne projektant, a jeszcze inne wykonawca [5].

W literaturze przedmiotu do oceny wpływu ryzyka na przedsięwzięcie wykorzystuje się tzw. miarę ryzyka, która wiąże prawdopodobieństwo wystąpienia danego zdarzenia z jego skutkiem. Jednak w klasycznej ocenie ryzyka – zarówno jakościowo-

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

wej, jak i ilościowej – nie uwzględnia się emergentnych właściwości (np. podatności na zakłócenia, zdolności do adaptacji po perturbacjach) złożonych systemów, jakimi bez wątpienia są przedsięwzięcia budowlane.

W ramach proaktywnego podejścia w planowaniu przedsięwzięć budowlanych opracowano wiele sposobów zwiększania odporności terminów realizacji tych przedsięwzięć na wpływ czynników, które opierają się na koncepcji tzw. harmonogramów predyktywnych. Sprowadza się to przede wszystkim do modyfikacji parametrów rozkładów zmiennych losowych czasu i kosztów realizacji planowanych zadań [32], zastosowania metod ich szeregowania [24] lub alokacji buforów w harmonogramie [20]. Jednak na przestrzeni ostatnich kilku lat, równolegle do harmonogramowania predyktywnego, rozwijane jest ujęcie systemowe problemu zwiększania odporności harmonogramów przedsięwzięć budowlanych, które skupia się na analizie wcześniej wymienionych emergentnych właściwości systemu, ponieważ są one istotną i wartą zbadania formą reakcji przedsięwzięcia budowlanego na materializację czynników ryzyka. Zwiększanie odporności systemowej harmonogramów takich przedsięwzięć na wpływ czynników ryzyka opiera się na wprowadzeniu rozwiązań systemowych, np. takich jak: decentralizacja, redundancja, współpraca, alternatywne zasoby czy zadania [34, 43].

6.2. PRZEDSIĘWZIĘCIE BUDOWLANE JAKO SYSTEM ZŁOŻONY

Przedsięwzięcia budowlane są złożonymi, otwartymi systemami organizacyjnymi o tymczasowym charakterze [44]. Według teorii systemów [27, 39] należy je traktować jako zbiór elementów (zadania, ludzie, maszyny, materiały i wiedza) wzajemnie ze sobą i otoczeniem powiązanych, zorganizowanych zatem na potrzeby osiągnięcia konkretnego celu. Zasadniczo w przedsięwzięciach budowlanych można wyróżnić złożoność szczegółów (ang. *detail complexity*), która wynika z ich struktury i jest niezależna od czasu, oraz złożoność dynamiczną (ang. *dynamic complexity*), dotyczącą zmieniających się w czasie zachowań operacyjnych systemu [43]. Zrozumienie zachowań złożonych systemów wymaga ich analizy jako całości, wraz z relacjami, a nie tylko pojedynczych, zdekomponowanych elementów. Każda zmiana w strukturze systemu z reguły prowadzi do zmiany jego zachowania. Zmiana w jednym miejscu w systemie może w wyniku propagacji prowadzić do zakłóceń w innej jego części. Sprzężenia zwrotne w relacjach między elementami powodują, że skutek danego zachowania systemu staje się jednocześnie jego przyczyną [49]. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że podstawą funkcjonowania wielu złożonych systemów jest przepływ informacji. Szczególnie istotne są emergentne właściwości złożonych systemów, które mogą mieć duże znaczenie w ocenie ich odporności na zakłócenia [43]. Jedną z ważniejszych emergentnych właściwości złożonego systemu jest jego podatność (ang. *project vulnerability*)

na zakłócenia [42]. Rodzaj i rozmiar potencjalnych zakłóceń w systemie zależy od jego struktury, czyli elementów (np. wykonawców, zadań, zasobów) i ich wzajemnego powiązania (np. przydział wykonawców i zasobów do zadań, zależności pomiędzy zadaniami, komunikacja pomiędzy wykonawcami). Im podatność systemu jest niższa, tym system jest lepiej chroniony przed zakłóceniami. Podatność jest cechą wewnętrzną złożonych systemów i ma znaczenie w momencie pojawienia się zagrożenia [42]. Zmiana wpływu czynników ryzyka na przedsięwzięcie nie zmienia zatem jego podatności [1].

Właściwością przedsięwzięcia do radzenia sobie z zakłóceniami jest jego zdolność adaptacyjna (ang. *adaptive capacity*) do nowych warunków realizacji, jakie te zakłócenia generują. Powrót systemu do stanu równowagi związany będzie z upływem czasu lub poniesieniem pewnych kosztów. Zdolność adaptacyjna przedsięwzięcia może się zmieniać w czasie, np. ze względu na zmiany jego zakresu lub sposobu realizacji [29]. Wyniki przeprowadzonych badań ankietowych [46] wskazują, że na zwiększenie zdolności adaptacyjnej przedsięwzięć budowlanych wpływają przede wszystkim: umiejętność wypracowania alternatywnych rozwiązań technicznych, technologicznych i organizacyjnych, zdolność do szybkiego podejmowania decyzji, chęć nawiązywania współpracy, w tym efektywna komunikacja.

Zarówno podatność złożonego systemu, jak i jego zdolność adaptacyjna w konsekwencji określają jego odporność (ang. *resilience*) na zakłócenia. W literaturze przedmiotu odporność złożonych systemów jest definiowana na różne sposoby [18, 34]. W przypadku przedsięwzięć budowlanych odporność systemowa jest efektem współzależnych relacji między elementami systemu oraz ich dynamicznych zachowań. Z przeprowadzonych badań studiów przypadku przedsięwzięć budowlanych [43] wynika, że: 1) podatność systemów jest dodatnio skorelowana z ich złożonością i ekspozycją na czynniki zakłócające; 2) podatność i zdolność adaptacyjna złożonych systemów wpływa na ich odporność; 3) odporność systemowa wykazuje ujemną korelację z podatnością oraz dodatnią ze zdolnością adaptacyjną.

6.3. WYKORZYSTANIE TEORII METASIECI DO MODELOWANIA I ANALIZY ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW

Modelowanie i analiza złożonych systemów wymaga wykorzystania odpowiednich metod i narzędzi. Zastosowanie do tego celu teorii sieci okazuje się być właściwym podejściem. Rozwój teorii sieci zapoczątkował w 1736 roku Leonard Euler, publikując pracę na temat tzw. problemu mostów królewskich [13]. J.J. Sylvester jako pierwszy wprowadził pojęcie grafu (ang. *graph*), od którego wywodzi się nazwa dziedziny, jaką jest teoria grafów [33]. Psycholog i zarazem socjolog J.L. Moreno na podstawie wyżej wymienionych teorii opracował tzw. socjogramy [28], kładąc podwaliny pod analizę tzw. sieci społecznych, określanych skrótem SNA

(ang. *Social Network Analysis*). Kolejne ważne prace dotyczyły tzw. grafów losowych (ang. *random graphs*), opracowanych przez Erdős i Rényi [12], oraz tzw. sieci bezskalowych (ang. *scale-free networks*) [2].

Teoria sieci jest szeroko wykorzystywana w wielu dziedzinach do badań różnych zjawisk. W budownictwie znalazła zastosowanie przede wszystkim w planowaniu przedsięwzięć budowlanych. Od kilkudziesięciu lat wykorzystywane są do tego celu tzw. sieci zadaniowe, których struktura logiczna, składająca się z węzłów i łuków grafu, może być deterministyczna, decyzyjna lub stochastyczna, czy też przyjmować rozmyty charakter. Struktura tych sieci umożliwia modelowanie zależności technologiczno-organizacyjnych między zadaniami planowanego przedsięwzięcia. Funkcje określone na węzłach i łukach grafu określają z kolei parametry przedsięwzięcia (np. czas, koszt planowanych zadań czy też zapotrzebowanie na zasoby). Wartości tych parametrów mogą być jednoznacznie określone lub przyjmować probabilistyczny albo rozmyty charakter. Zostało opracowanych wiele metod planowania sieciowego przedsięwzięć, z których najbardziej rozpowszechniły się: CPM (ang. *Critical Path Method*), PERT (ang. *Program Evaluation and Review Technique*), MPM (ang. *Metra Potential Methode*), GERT (ang. *Graphical Evaluation and Review Technique*), CCPM (ang. *Critical Chain Project Management*). Planowanie przedsięwzięć budowlanych, oparte na wyżej wymienionych metodach, zasadniczo ogranicza się do modelowania sekwencji zadań przewidzianych do realizacji i ich analizy z perspektywy określonych kryteriów. Pełne modelowanie i analiza złożonych systemów oprócz zadań powinny uwzględniać również inne elementy, takie jak: zasoby, informacje, uczestników przedsięwzięcia itd., oraz współzależne relacje między nimi. Takie podejście pozwala uchwycić złożoność analizowanego systemu i zbadać jego emergentne właściwości, co ma kluczowe znaczenie w ocenie wydajności rozważanego przedsięwzięcia [9, 43].

W 1998 roku K.D. Krakchhardt i K. Carley [23] opracowali koncepcję metasieci (ang. *meta-network*) z modelem PCANS (ang. *Precedence, Commitment of resources, Assignment of individuals to tasks, Networks of relations among personnel and Skills linking individuals to resources*), interpretowaną jako sieciowy model relacji pomiędzy elementami (zadania, zasoby, wiedza i ludzie) złożonego systemu. Wyżej wymienioną koncepcję mapowania systemów uzupełnia ich dynamiczna analiza DNA (ang. *dynamic network analysis*), co razem stanowi istotny wkład w rozwój tzw. nauk o sieciach (ang. *network science*) [14]. W literaturze można znaleźć wiele zastosowań metasieci do modelowania i analizy problemów w różnych dziedzinach, takich jak np.: działania antyterrorystyczne [7], zarządzanie kryzysowe w obliczu katastrof [48], medycyna [11], wojsko [3] itd.

Jedną z pierwszych prób zastosowania koncepcji metasieci w modelowaniu i analizie przedsięwzięć budowlanych można znaleźć w pracy [9]. Jej autorzy zbadali związek wymaganej komunikacji między uczestnikami konkretnego przedsięwzięcia budowlanego a planowanymi zadaniami, które uczestnicy ci realizują,

wykorzystując do tego celu zintegrowany model sieciowy i odpowiednie metody analizy: sieci społecznych (SNA) oraz ścieżki krytycznej (CPM).

Z kolei w pracach [25, 26] zwrócono uwagę na potrzebę rozszerzenia wyżej wymienionego modelu sieciowego o informację na temat wiedzy potrzebnej do realizacji zadań rozważanego przedsięwzięcia. Opracowana koncepcja dotyczyła badania wydajności przedsięwzięć budowlanych w związku z budową salonów samochodowych w Chinach i opierała się na jednoczesnej analizie wielu sieci relacji, uwzględniających współzależności różnych elementów (uczestnicy przedsięwzięcia, wiedza i zadania) w rozważanym systemie.

W pracy [40] wykorzystano teorię metasieci do zarządzania różnymi ograniczeniami w ramach projektowania i realizacji dużych przedsięwzięć związanych z budową sieci skroplonego gazu ziemnego (LNG).

Na temat analizy odporności systemowej przedsięwzięć budowlanych na wpływ czynników ryzyka powstało w ostatnim czasie kilka prac. Część z nich dotyczyła analizy kluczowych (w aspekcie podatności na zakłócenia) uczestników przedsięwzięć budowlanych, wiedzy i innych zasobów potrzebnych do realizacji zadań budowlanych [36, 45]. Pozostałe badania z wykorzystaniem teorii metasieci związane były z podejściem proaktywnym w ramach zwiększania odporności systemowej przebiegu realizacji przedsięwzięć budowlanych [34, 37, 43].

6.3.1. MODELOWANIE STRUKTURY SYSTEMU

Koncepcja modelowania elementów systemu i relacji między nimi za pomocą metasieci wymaga przyjęcia odpowiedniej jej definicji. Przyjmijmy, że dany jest zestaw sieci, z którego każda oparta jest na skierowanym grafie, składającym się z dwóch zbiorów elementów, U i V , oraz zbioru relacji $E \subset U \times V$. Każda dowolna para elementów $(i, j) \in E$ dla $i \in U$ oraz $j \in V$, określa relację między i oraz j . Zestaw sieci zawierających takie relacje nazywamy metasiecią [26, 36]. W sensie graficznym węzły (wierzchołki) metasieci symbolizują elementy modelowanego systemu, np. ludzi lub organizacje, wiedzę, pozostałe zasoby, zadania itd., a połączenia (łuki) metasieci oznaczają relacje między nimi. Reprezentacją metasieci jest metamacierz, składająca się z macierzy, z której każda odpowiada jedno- lub dwumodowej sieci relacji pomiędzy $i \in U$ oraz $j \in V$. Przykładową metamacierz, reprezentującą metasieć przedsięwzięcia, przedstawia tabela 6.1.

Na przekątnej metamacierzy umieszczone są kwadratowe macierze sąsiedztwa, reprezentujące relacje między elementami (węzłami) tego samego rodzaju w systemie. Reszta metamacierzy reprezentuje sieci określające relacje pomiędzy różnymi rodzajami węzłów.

Należy zwrócić uwagę, że liczba rodzajów węzłów nie jest ograniczona i w literaturze występują przykłady węzłów metasieci, które symbolizują np. funkcje pełnione przez uczestników przedsięwzięcia, wydarzenia, lokalizację itd. [6, 8, 34].

Tabela 6.1

Metamacierz zawierająca macierze określające sześć podstawowych rodzajów sieci, które tworzą strukturę modelowanego przedsiębiorstwa

$\begin{matrix} \text{V} \\ \text{U} \end{matrix}$	O (Organizacja)	R (Zasoby)	T (Zadanie)
O (Organizacja)	(OO) <i>Kto z kim współpracuje</i>	(OR) <i>Jakimi zasobami dysponuje dana organizacja</i>	(OT) <i>Jakie zadania realizuje dana organizacja</i>
R (Zasoby)	*	(RR) <i>Jaka jest zależność pomiędzy zasobami</i>	(RT) <i>Realizację jakich zadań umożliwia dany zasób</i>
T (Zadanie)	*	*	(TT) <i>Jaka jest zależność pomiędzy zadaniami</i>

Źródło: oprac. własne na podstawie [36]

6.3.2. ANALIZA STRUKTURALNA SYSTEMU

Model strukturalny systemu wymaga podstawowej analizy na podstawie zestawu miar strukturalnych, które dostarczają wielu istotnych informacji o modelowanym systemie. Miary strukturalne, np. takie jak gęstość (ang. *denisty*), stopnie węzłów (ang. *degree*) i inne, zostały opracowane dla sieci jednomodowych, np. w ramach analizy SNA [41]. Istnieje również wiele miar strukturalnych dla wielomodowych sieci, wykorzystywanych w ramach analizy DNA [30]. Poniżej przedstawiono kilka przykładowych miar strukturalnych [30] dla metasieci reprezentowanej przez meta-macierz z tabeli 6.1.

Wydajność (ang. *performance*) metasieci pozwala zbadać zgodność przypisania organizacji do poszczególnych zadań, do realizacji których organizacja posiada niezbędne zasoby, obliczana jest zgodnie z formułami (6.1–6.3):

$$p_R = \frac{|\mathbf{TT}| - |S_{TR}|}{|\mathbf{TT}|} \quad (6.1)$$

$$S_{TR} = \{t \in T \wedge r \in R : \mathbf{N}_{TR}(i, j) < 0\} \quad (6.2)$$

gdzie:

T – zbiór zadań,

S_{TR} – zbiór zadań, których nie można zrealizować ze względu na brak organizacji z wymaganymi zasobami przypisanymi do ich realizacji,

$\mathbf{N}_{TR}$ – macierz luki w dysponowaniu zasobami (w kontekście zadań, których nie można zrealizować ze względu na brak organizacji z wymaganymi zasobami przypisanymi do ich realizacji),

$$N_{TR} = (OT' \cdot OR) - RT' \quad (6.3)$$

gdzie:

- OT'** – transponowana macierz organizacji przypisanych do zadań,
- OR** – macierz organizacji dysponujących zasobami,
- RT'** – transponowana macierz zasobów przypisanych do zadań.

Wydajność metasieci w konsekwencji określa procent zadań, jakie mogą być zrealizowane dzięki posiadanym przez organizację, przypisanym do tych zadań wymagany zasobom. Wartość miary wydajności powinna zawierać się w zakresie od 0 do 1.

Zgodność komunikacyjna (ang. *communication congruence*) pozwala określić stopień relacji (komunikacji) między organizacjami, który jest wyrażony stosunkiem wymaganej komunikacji do całkowitej możliwej komunikacji w metasieci.

$$c = \frac{card\{(i, j) | [(OO(i, j) > 0) = (Q(i, j) > 0)]\}}{|O| \cdot (|O| - 1)} \quad (6.4)$$

gdzie:

- Q(i, j)** – macierz wymaganej komunikacji pomiędzy agentami na potrzeby realizacji zadań:

$$Q(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{jeśli } [(H + C + N) + (H + C + N)'], (i, j) > 0 \\ 0, & \text{dla pozostałych} \end{cases} \quad (6.5)$$

gdzie:

- C** – macierz wymaganej komunikacji pomiędzy organizacjami przypisanymi do realizacji tych samych zadań: **C** = **OT** · **OT'**,
- H** – macierz wymaganej komunikacji pomiędzy organizacjami realizującymi zadania występujące w sekwencji bezpośredniego poprzedzania: **H** = **OT** · **TT** · **OT'**,
- N** – macierz potrzebnej relacji w formie komunikacji pomiędzy agentami w ramach udostępniania wymaganych zasobów do realizacji zadań:

$$N = OT \cdot Z_R \cdot OR' \quad \text{gdzie} \quad Z(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{jeśli } [OT' \cdot OR - RT'], (i, j) < 0 \\ 0, & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \quad (6.6)$$

Wartość zgodności komunikacyjnej w metasieci zawiera się w zakresie od 0 do 1.

Obciążenie pracą (ang. *workload*) odnosi się do danej organizacji ze względu na posiadane przez nią zasoby do realizacji konkretnych zadań. Obciążenie pracą może być potencjalne (ang. *potential workload*) – wtedy oblicza się je zgodnie z formułą (6.7) dla organizacji posiadającej zasoby umożliwiające realizację zadań, z których część niekoniecznie musi być do niej przypisana. Obciążenie pracą aktualne (ang. *actual workload*) wyznacza się na podstawie formuły (6.8) – uwzględnia realizację tylko tych zadań, do których dana organizacja jest przypisana.

$$w_i^p = \frac{\sum_j^{|T|} (\mathbf{OR} \cdot \mathbf{RT})(i, j)}{\sum \mathbf{RT}} \quad (6.7)$$

$$w_i^A = \frac{\sum_i^{|O|} (\mathbf{OR} \cdot \mathbf{RT} \cdot \mathbf{OT}')(i, i)}{\sum \mathbf{RT}} \quad (6.8)$$

gdzie:

- OT'** – transponowana macierz organizacji przypisanych do zadań,
- OR** – macierz organizacji dysponujących zasobami,
- RT** – macierz zasobów przypisanych do zadań,
- RT'** – transponowana macierz zasobów przypisanych do zadań.

Wartości powyższych miar powinny zawierać się w zakresie od 0 do 1.

Inne przykładowe miary strukturalne metasieci, odniesione do całego modelowanego systemu lub tylko jego poszczególnych elementów, takich jak np. zasoby, to:

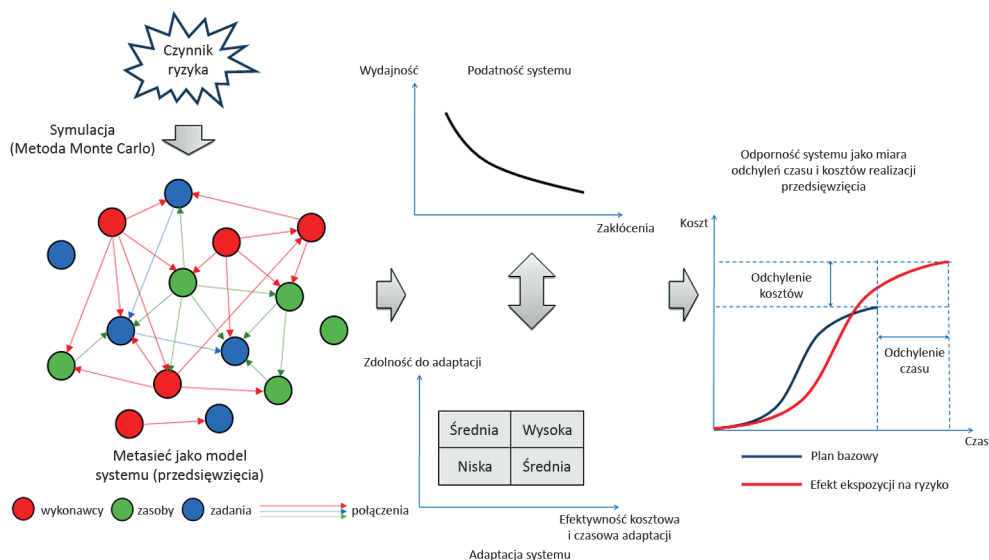
- **zapotrzebowanie** (ang. *needs*) na zasoby niezbędne do realizacji zadań,
- **nadmiar** (ang. *waste*) zasobów w odniesieniu do wymaganych w ramach realizacji zadań,
- **możliwość ponownego wykorzystania** (ang. *needs*) zasobów do realizacji innych zadań.

6.4. PODEJŚCIE PROAKTYWNE DO ZWIĘKSZANIA ODPORNOŚCI SYSTEMOWEJ PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH NA CZYNNIKI RYZYKA

Stosowane zwykle w praktyce reaktywne podejście do radzenia sobie z warunkami ryzyka przedsięwzięć budowlanych jest często nieefektywne. Wszelkie opóźnienia w przekazie informacji zwrotnych w systemie powodują, że powstałe w nim zakłócenia w chwili ich ujawnienia mogą być już trudne do usunięcia w ramach reaktywnych działań [27]. Reaktywne podejście powinno więc zostać zastąpione podejściem proaktywnym, zgodnie z zasadą „lepiej zapobiegać, niż leczyć”. W literaturze przedmiotu w ramach proaktywnych działań dominują jakościowe metody zwiększania odporności systemowej przedsięwzięć budowlanych. Wykorzystanie teorii metasieci w ramach analiz o charakterze ilościowym stosowane jest od niedawna i wymaga dalszego rozwijania.

6.4.1. OCENA ODPORNOŚCI SYSTEMOWEJ PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO

Koncepcja ilościowego podejścia do zwiększania odporności systemowej przedsięwzięć budowlanych na wpływ czynników ryzyka opiera się na budowie sieciowego modelu systemu i poddawaniu go symulowanym działaniom określonych czynników ryzyka [34, 37, 43, 45–47]. Symulowana materializacja czynników ryzyka zmienia (przez utratę wybranych węzłów i połączeń w metasieci) strukturę modelowanego systemu, powodując w nim zakłócenia. Zmiana wartości wybranych miar strukturalnych w metasieci (np. wydajności, poziomu wymaganej komunikacji) umożliwia ocenę podatności tego systemu na wpływ ryzyka. Ocena zdolności adaptacyjnej systemu w ramach radzenia sobie z zakłóceniami związana jest z kolei z analizą upływu czasu [43] oraz dodatkowych kosztów [34, 37] związanych z powrotem przedsięwzięcia do stanu równowagi. Odchylenia czasu i kosztu realizacji przedsięwzięcia od wartości planowanych przed wystąpieniem zakłóceń określają poziom odporności tego przedsięwzięcia na wpływ czynników ryzyka (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Schemat ideowy oceny odporności systemu. Źródło: oprac. własne na podstawie [34, 43]

6.4.2. ZWIĘKSZANIE ODPORNOŚCI SYSTEMOWEJ PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO

Zwiększanie odporności systemowej przedsięwzięć budowlanych na wpływ czynników ryzyka badane jest od niedawna. W ramach tzw. myślenia systemowego autorzy prac [31, 34, 43] przeanalizowali różne złożone systemy i zwrócili uwagę

na potencjalną skuteczność podstawowych koncepcji zwiększania ich odporności systemowej. Koncepcje te związane są z wprowadzaniem do przedsięwzięć rozwiązań systemowych o charakterze technicznym, technologicznym i organizacyjnym. Do podstawowych rozwiązań zwiększających odporność systemową przedsięwzięć budowlanych można zatem zaliczyć:

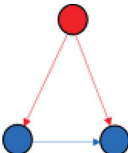
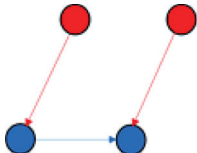
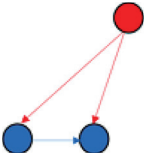
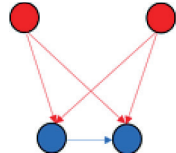
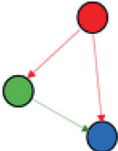
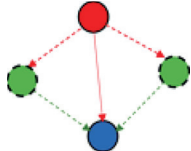
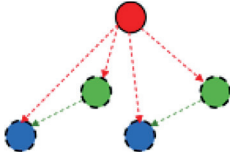
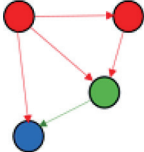
- **decentralizację** w realizacji procesów, która jest związana z dążeniem do różnorodności w systemie przez rozdział zadań pomiędzy jego elementami, co powoduje, że jest on bardziej odporny na wpływ warunków ryzyka, np. stawianie nie na jednego, lecz na wielu różnych wykonawców realizujących dane roboty budowlane [31, 43];
- **redundancję systemową**, czyli stosowanie nadmiarowości w systemie, np. zaangażowanie do wykonania danej roboty budowlanej nadmiarowej liczby maszyn znacznie zmniejsza ryzyko przestojów realizacyjnych z powodu ich awarii. Należy bowiem zwrócić uwagę, że prawdopodobieństwo wystąpienia awarii wszystkich maszyn jednocześnie jest odpowiednio dużo niższe. Redundancja jest często dosyć kosztowna, lecz w uzasadnionych sytuacjach może przynieść wymierne korzyści [43];
- **rozwiązania zamienne w zakresie zasobów**, które polegają na rozważeniu możliwości wykorzystania w ramach planowanego przedsięwzięcia alternatywnych zasobów, które są mniej podatne na wpływ ryzyka, np. zatrudnienie wysoko wykwalifikowanych pracowników budowlanych, wykazujących dodatkowo niski wskaźnik absencji chorobowej [34];
- **rozwiązania zamienne w zakresie zadań**, które polegają na rozważeniu możliwości wprowadzenia w ramach planowanego przedsięwzięcia alternatywnych zadań, mniej podatnych na wpływ czynników ryzyka. Przykładowo, w związku z planowaną realizacją podbijania fundamentów obiektu budowlanego prace te można wykonać metodą tradycyjną (podkop pod fundament na wyznaczonych odcinkach i następnie wykonanie podbicia) lub za pomocą mikropali w formie iniekcji. Druga metoda ze względu na bezwykopowy charakter jest względnie bezpieczniejsza w zastosowaniu i mniej podatna np. na ryzyko przeprowadzenia często czasochłonnych badań archeologicznych, ze względu na konieczność wykonania wykopów (co dzieje się w przypadku tradycyjnej metody podbijania fundamentów). Dodatkowo same roboty ziemne są wrażliwe na niekorzystny wpływ warunków atmosferycznych [34];
- **współpracę**, która polega na stworzeniu w ramach realizacji planowanego przedsięwzięcia warunków do wspólnego wspierania się jego uczestników na potrzeby realizacji danych zadań. Każdy z uczestników przedsięwzięcia w zakresie swojej specjalizacji i potencjału produkcyjnego dostarcza odpowiedniej wiedzy i innych zasobów (np. maszyn czy materiałów budowlanych), niezbędnych do realizacji konkretnych zadań. Współpraca czyni

przedsięwzięcie bardziej odporne np. na ryzyko możliwych problemów z zasobami [31, 34].

Ilościowe podejście do zwiększania odporności systemowej modelowanych za pomocą metasieci przedsięwzięć budowlanych wymaga opracowania odpowiedniej reprezentacji strukturalnej wyżej wymienionych rozwiązań (tab. 6.2).

Tabela 6.2

Reprezentacja strukturalna podstawowych koncepcji zwiększania odporności systemowej przedsięwzięć. Źródło: [35]

Nazwa strategii zwiększania odporności systemowej	Wyjściowy model systemu	Model systemu z uwzględnieniem strategii zwiększania odporności systemowej
Decentralizacja w realizacji procesów		
Redundancja systemowa		
Rozwiązania zamienne w zakresie zadań		
Rozwiązania zamienne w zakresie zasobów		
Współpraca		
Oznaczenie symboli  wykonawcy  zasoby  zadania  elementy alternatywne  połączenia  połączenia alternatywne		

Zwiększanie odporności systemowej przedsięwzięcia budowlanego wymaga optymalizacyjnego podejścia w doborze koncepcji zwiększających odporność przedsięwzięcia. Sprowadza się to do analizy strukturalnej metasieci i jej parametrów, z uwzględnieniem różnych kombinacji koncepcji zwiększania odporności systemu na symulowany wpływ ryzyka [34]. Przyjmując założenie, że miara odporności przedsięwzięcia związana jest z odchyleniami czasu i kosztów jego realizacji, problem optymalizacyjny powinien mieć dwukryterialny charakter. Jednym ze sposobów powiązania dwóch różnych funkcji celu w modelu matematycznym jest wprowadzenie linowej kombinacji wypukłej w formie tzw. funkcji metakryterium [18, 34]. Odpowiednie sformułowanie funkcji metakryterium umożliwia poprawne wykonywanie działań arytmetycznych, eliminując jednocześnie efekty skali związanej z wartościami kryteriów, co pozwoli na ich równe traktowanie. Ewentualne preferencje decydentów względem istotności przyjętych kryteriów mogą być korygowane subiektywnymi wagami. Warunki ograniczające w tak sformułowanym modelu optymalizacji weryfikują dopuszczalność potencjalnego rozwiązania pod względem wymaganej spójności strukturalnej metasieci.

Do analizy opracowanego modelu optymalizacji zwiększania odporności przedsięwzięć na wpływ ryzyka można wykorzystać metaheurystykę przeszukiwania tabu (ang. *tabu search*) [15, 16]. Algorytmy oparte na koncepcji przeszukiwania tabu wykazują się prostotą oraz dobrze sprawdzają się w analizie zadań o charakterze kombinatorycznym [17].

Analiza powyższego modelu optymalizacji umożliwia w konsekwencji wygenerowanie co najmniej suboptymalnego zbioru koncepcji zwiększania odporności systemowej rozważanego przedsięwzięcia budowlanego [34].

6.4.3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA

Przedsięwzięcia związane z remontami istniejących obiektów budowlanych, w tym zabytkowych, przez swój specyficzny i niezdeterminowany charakter realizacji są szczególnie narażone na wpływ warunków ryzyka i niepewności [34, 43]. W celu prezentacji opisanego w poprzednich rozdziałach proaktywnego, systemowego podejścia do planowania przedsięwzięć budowlanych w warunkach ryzyka analizowano przykład rewaloryzacji zabytkowego muru oporowego wraz z wymianą nawierzchni kamiennej placu i jego podziemnej infrastruktury [34, 43]. Zakres i specyfika planowanych prac rewaloryzacyjnych rozpoczyna się od robót rozbiórkowych poszczególnych warstw (warstwa ściernalna i konstrukcyjna) istniejących nawierzchni wraz z pogłębieniem koryta robót drogowych. Warstwa ściernalna z płyt kamiennych po rozbiórce przeznaczona jest do odzysku i ponownego wbudowania na obiekcie. Oczekiwany jest maksymalny odzysk płyt kamiennych. Kolejne prace związane są z wykonaniem wykopów na potrzeby wymiany infrastruktury podziemnej (sieci wodno-kanalizacyjnej, energetycznej, teletechnicznej) zabytkowego placu.

Wszystkie prace rozbiórkowe i roboty ziemne będą realizowane pod nadzorem archeologicznym. Po zakończeniu prac rozbiórkowych i tych związanych z wymianą infrastruktury podziemnej planuje się przystąpić do układania poszczególnych warstw konstrukcyjnych (warstwy wzmacniającej podłoże oraz podbudowy) nowej nawierzchni kamiennej, a także osadzenia kamiennych krawężników i obrzeży. Planowana do wykonania warstwa ścieralna nawierzchni z istniejących, odzyskanych płyt kamiennych zostanie uzupełniana nowym kamieniem. Równolegle z wymienionymi wyżej pracami drogowymi przewiduje się rewaloryzację zabytkowego muru oporowego. W ramach prac rewaloryzacyjnych zostaną wykonane (pod nadzorem archeologicznym) prace ziemne odsłaniające dolną część konstrukcyjną muru w celu oceny stanu technicznego jego posadowienia i wykonania ewentualnej stabilizacji i wzmocnienia konstrukcji przez jej poszerzenie. Przewidziane jest też wykonanie izolacji przeciwwodnej fundamentów. Po wykonaniu prac konstrukcyjnych przewidywane są prace konserwatorskie lica i korony zabytkowego muru.

Opis werbalny struktury planowanego przedsięwzięcia przedstawiono w formie metasieci. Na strukturę modelu sieciowego składają się: zadania, organizacje, potrzebna wiedza oraz pozostałe zasoby niezbędne do realizacji planowanego przedsięwzięcia, a także relacje pomiędzy tymi elementami. Część elementów początkowo nie jest połączona ze strukturą metasieci. Dotyczy to np. potencjalnych zadań dodatkowych, których interakcja z modelem może wystąpić tylko z określonym prawdopodobieństwem w wyniku symulowanej materializacji ryzyka. Struktura modelu została uzupełniona o podstawowe parametry o charakterze deterministycznym, takie jak czasy trwania poszczególnych zadań oraz koszty ich realizacji. Oszacowano też wartości ewentualnego zwiększenia tych nakładów jako formę odpowiedzi modelowanego przedsięwzięcia na zakłócenia w wyniku materializacji ryzyka.

Na potrzeby analizy tak przygotowanego modelu sieciowego przedsięwzięcia opracowano (z perspektywy wykonawcy planowanych prac rewaloryzacyjnych) listę podstawowych czynników ryzyka, które mogą wpływać na to przedsięwzięcie. Dla każdego czynnika ryzyka opracowano jego reprezentację strukturalną w metasieci oraz oszacowano prawdopodobieństwo jego materializacji. W tabeli 6.3 przedstawiono fragment tej listy.

Tabela 6.3

Fragment listy czynników ryzyka z ich reprezentacją strukturalną w metasieci oraz oszacowanym prawdopodobieństwem ich materializacji

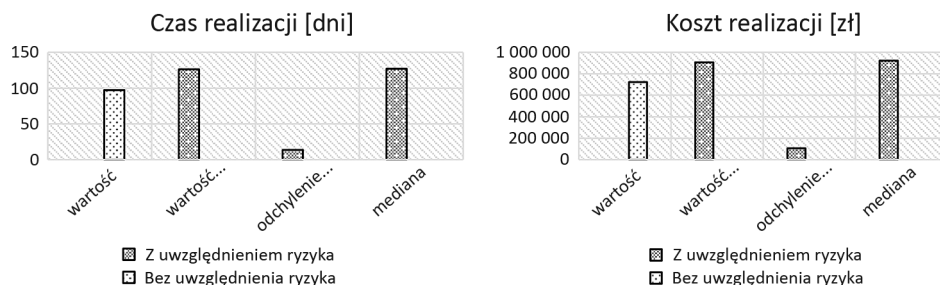
Lp.	Czynnik ryzyka	Prawdopodobieństwo materializacji	Reprezentacja strukturalna ryzyka w metasieci planowanego przedsięwzięcia
1	Odsłonięcie w ramach robót ziemnych (odsłonięcie fundamentów muru) niezinventaryzowanych wcześniej: reliktyw archeologicznych, nawarstwień kulturowych, szczątków ludzkich	0,30	Włączenie do sieci relacji między zadaniami węzła – <i>zadanie</i> : Badania archeologiczne wykopu fundamentowego
2	Zły stan techniczny konstrukcji muru zidentyfikowany po jego odsłonięciu	0,40	Włączenie do sieci relacji między zadaniami węzła – <i>zadanie</i> : Naprawa konstrukcji muru

3	Problemy z odzyskiem zdemontowanych płyt kamiennych (warstwa ścierna istniejącej nawierzchni przeznaczonych do ponownego wbudowania w ramach wykonania nowej nawierzchni)	0,30	Usunięcie połączenia między węzłem – <i>organizacja</i> : Wykonawca branży drogowej a węzłem – <i>materiał</i> : Płyty kamienne z odzysku
4	Utrudnienia organizacyjne spowodowane pełnieniem przez obiekt funkcji muzealnej i reprezentacyjnej (praca na tak zwanym „zakładzie czynnym”)	0,15	Usunięcie połączeń między poszczególnymi węzłami – <i>organizacji</i> a węzłami – <i>zadaniami</i> , których dotyczyć mogą trudnienia organizacyjne
5	Błędy w dokumentacji technicznej	0,15	Usunięcie połączeń między poszczególnymi węzłami – <i>organizacji</i> a węzłami – <i>wiedzy</i> : dokumentacji projektowej danej branży
6	Absencja pracowników	0,20	Usunięcie częściowe połączenia między węzłem – <i>organizacja</i> : Wykonawca danej branży a węzłem – <i>sila robocza</i> : Robotników danej branży
7	Problemy z komunikacją, przepływem informacji pomiędzy uczestnikami budowy	0,60	Usunięcie wzajemnych połączeń między poszczególnymi węzłami – <i>organizacji</i>
8	Awaryjność sprzętu budowlanego	0,10	Usunięcie połączeń między poszczególnymi węzłami – <i>organizacji</i> a poszczególnymi węzłami maszyn budowlanych
9	Niekorzystne warunki atmosferyczne, takie jak: deszcz, wiatr itp.	0,25	Usunięcie połączeń między poszczególnymi węzłami – <i>organizacji</i> a węzłami – <i>zadaniami</i> wrażliwych na niekorzystne działanie warunków atmosferycznych

Źródło: oprac. własne na podstawie [34]

W pierwszej kolejności, na podstawie analizy ścieżki krytycznej dla sieci zależności między zadaniami, określono czas trwania planowanego przedsięwzięcia, a na podstawie sumy planowanych kosztów wykonania poszczególnych zadań – także koszt jego realizacji. Otrzymane wartości czasu i kosztu planowanego przedsięwzięcia nie uwzględniają warunków ryzyka, dlatego stanowią punkt wyjściowy do analizy.

Na potrzeby przeprowadzenia symulacji materializacji czynników ryzyka wykorzystano metodę Monte Carlo, w ramach której wykonano sto eksperymentów symulacyjnych. Na bazie otrzymanych wyników utworzono rozkłady empiryczne dla czasu i kosztu realizacji analizowanego przedsięwzięcia (z uwzględnieniem wpływu czynników ryzyka) oraz ich dystrybuanty. Oprócz rozkładów obliczono wartości podstawowych miar statystycznych, takich jak średnia, odchylenie standar-



Rys. 6.2. Wartości czasu i kosztu realizacji planowanego przedsięwzięcia bez uwzględnienia, jak również z uwzględnieniem wpływu ryzyka. Źródło: oprac. własne na podstawie [34]

dowe oraz mediana. Wartości czasu i kosztu realizacji planowanego przedsięwzięcia, zarówno bez uwzględnienia, jak i z uwzględnieniem wpływu ryzyka, przedstawiają wykresy na rys. 6.2.

W celu zmniejszenia odchyłeń czasowo-kosztowych pomiędzy wartościami planowanymi a tymi otrzymanymi w wyniku uwzględnienia wpływu ryzyka konieczne jest opracowanie koncepcji zwiększenia odporności systemowej przedsięwzięcia. Dla prezentowanego przykładu opracowano kilka sposobów, które należy rozważyć w ramach proaktywnego podejścia:

Koncepcja nr 1 związana jest z wprowadzeniem do systemu rozwiązania alternatywnego wzmocnienia podłoża gruntowego, wykazującego zróżnicowaną nośność. Zaproponowano, aby pierwotnie zaprojektowaną geosiatkę zamienić na efektywniejszą, choć droższą geokratę przestrzenną. Powyższe rozwiązanie zmniejsza podatność przedsięwzięcia na problemy z uzyskaniem dostatecznej nośności podłoża na potrzeby realizacji robót drogowych.

Koncepcja nr 2 wprowadza zmianę sposobu wzmocnienia fundamentów muru oporowego z tradycyjnego, bardziej pracochłonnego i trudnego w realizacji, na nowoczesne, związane z zastosowaniem pali iniekcyjnych. Rozwiązanie to, choć bardziej kosztowne, zdecydowanie przyspieszy czas realizacji robót w tych warunkach.

Koncepcja nr 3 związana jest z decentralizacją procesów budowlanych, polegającą na zleceniu części prac drogowych, pierwotnie realizowanych przez generalnego wykonawcę, na rzecz podwykonawcy, który specjalizuje się w robotach brukarskich. Zaproponowany podział zadań charakteryzuje się większą odpornością na zakłócenia, spowodowane np. ryzykiem utraty potencjału produkcyjnego generalnego wykonawcy, związanym np. z problemem wielozadaniowości w budownictwie.

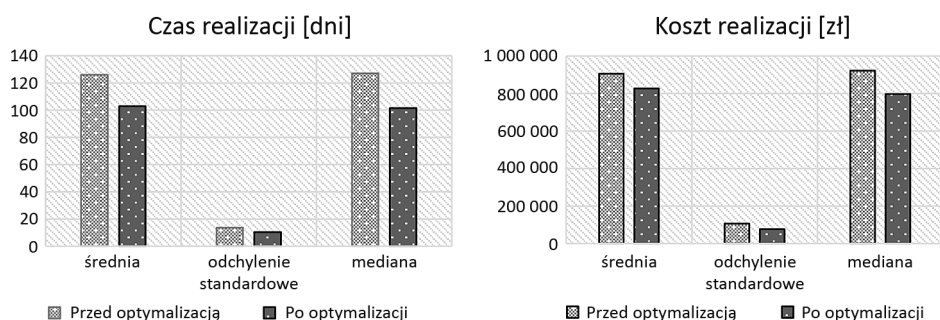
Koncepcja nr 4 zwiększenia odporności przedsięwzięcia na wpływ warunków ryzyka dotyczy wykorzystania materiału na warstwy ścieralne projektowanej nawierzchni. Oczekiwany odzysk płyt kamiennych i ich ponowne wbudowanie jest obciążone ryzykiem uszkodzenia ich podczas rozbiórki oraz niespełnienia wymagań dotyczących ich parametrów technicznych. Wprowadzenie alternatywnego rozwiązania w postaci zastosowania nowych płyt kamiennych, choć wiąże się ze znacznymi kosztami, może być potencjalnie lepszym i zdecydowanie mniej ryzykownym rozwiązaniem.

Koncepcja nr 5 to wprowadzenie warunków do nawiązania współpracy między wykonawcami. Utworzenie tzw. relacji partnerskich pozwoli na efektywne dzielenie się wiedzą, a w sytuacjach kryzysowych umożliwi wzajemne udostępnianie zasobów, takich jak np. maszyny budowlane czy siła robocza.

Koncepcja nr 6 wiąże się z redundancją systemową w zakresie komunikacji między wykonawcami. Wprowadzenie dodatkowych (nadmiarowych) połączeń komunikacyjnych między uczestnikami przedsięwzięcia zmniejsza jego podatność

na zakłócenia związane z przepływem informacji, które generują np. problemy z utrzymaniem ciągłości realizacji prac.

Wyżej wymienione koncepcje zwiększania odporności systemowej rozważanego przedsięwzięcia rewaloryzacji mogą być stosowane niezależnie. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, że dodawanie kolejnych koncepcji zwiększania odporności systemowej przedsięwzięcia budowlanego generuje wykładniczy przyrost rozwiązań dopuszczalnych w modelu optymalizacji. Do analizy modelu optymalizacji został użyty algorytm bazujący na metaheurystyce przeszukiwania tabu [34]. Na potrzeby optymalizacji zwiększania odporności systemowej rozważanego przedsięwzięcia przyjęto założenie o równej istotności kryteriów optymalizacji, tzn. że określone w funkcji metakryteriów dążenia do minimalizacji odchyleń, zarówno w aspekcie czasu, jak i kosztu realizacji analizowanego przedsięwzięcia, mają równe wagi. Otrzymane wyniki porównano z wynikami przed optymalizacją, co przedstawiają poniższe wykresy (rys. 6.3).



Rys. 6.3. Wartości czasu i kosztu realizacji planowanego przedsięwzięcia z uwzględnieniem wpływu ryzyka przed, jak również po optymalizacji. Źródło: oprac. własne na podstawie [34]

Z interpretacji otrzymanego rozwiązania wynika, że pięć z sześciu zaproponowanych koncepcji przyczyniło się do zwiększenia odporności systemowej przedsięwzięcia, co potwierdził także przeprowadzony przegląd zupełny. Została odrzucona jedynie koncepcja zamiany materiału kamiennego z odzysku na kamień nowy na potrzeby wykonania warstwy ścieralnej nawierzchni zabytkowego placu.

6.5. PODSUMOWANIE

Przedsięwzięcie budowlane jest złożonym systemem, składającym się z różnych elementów (takich jak np. zadania, ludzie, wiedza, maszyny i materiały) i relacji między nimi. Struktura takiego systemu i zachodzące w nim dynamiczne interakcje są źródłem jego emergentnych właściwości, np. podatności na zakłócenia, zdolności adaptacyjnej i innych. W myśleniu systemowym ocena wpływu warunków

ryzyka na przedsięwzięcie budowlane powinna być zatem dokonywana przez pryzmat analizy jego emergentnych właściwości jako pewnej formy odpowiedzi systemu na potencjalne zakłócenia. Analiza odporności systemowej przedsięwzięcia na zakłócenia powinna być punktem wyjścia do rozważenia możliwości wprowadzenia zmian w systemie, aby był on lepiej przystosowany na zmienne warunki otoczenia. W myśl zasady „nie stawiaj wszystkiego na jedną kartę” zmiany w systemie powinny dążyć do decentralizacji procesów w nim zachodzących, redundancji, efektywnego przepływu informacji itd. Okazują się, że systemy takie mogą okazać się bardziej stabilne, czyli mniej podatne na zakłócenia oraz szybciej adaptujące się do zmiennych warunków otoczenia niż te o jednolitych i scentralizowanym charakterze [27]. Zaproponowana metoda zwiększania odporności złożonych systemów, wykorzystująca teorię metasieci, wpisuje się w ideę proaktywnego podejścia do planowania przedsięwzięć budowlanych [34]. Skuteczność zaproponowanych koncepcji zwiększania odporności systemowej została oceniona na przykładzie konkretnego przedsięwzięcia, związanego z rewaloryzacją obiektu zabytkowego. Należy zwrócić uwagę na fakt, że zaproponowane podejście ma uniwersalny charakter i można je zastosować do analizy innych złożonych systemów. Zaproponowana metoda posiada jednak pewne ograniczenia i wymaga dalszego rozwijania. Potrzebny jest przede wszystkim efektywny sposób zbierania i przygotowania precyzyjnych danych wejściowych, dotyczących identyfikacji czynników ryzyka, prawdopodobieństwa ich materializacji oraz określenia zakresu zmienności skutków czasowo-kosztowych, będących odpowiedzią systemu na powstałe zakłócenia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Agarwal J., Blockley D.I. (2007), *Structural integrity: hazard, vulnerability and risk*, International Journal of Materials and Structural Integrity, 1(1–3), 117–127.
- [2] Barabási A.L., Albert R. (1999), *Emergence of scaling in random networks*, Science, 286(5439), 509–512.
- [3] Behrman R. (2014), *Structural Measurement of Military Organization Capability*, Doctoral Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- [4] Bernstein P.L. (1997), *Przeciw Bogom. Niezwykłe dzieje ryzyka*, WIG-Press, Warszawa.
- [5] Bizon-Gorecka J., Gorecki J. (2019), *Ryzyko przedsięwzięć budowlanych w perspektywie podmiotowej*, Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 28(2), 244–256.
- [6] Carley K.M. (2003), *Dynamic network analysis*, [in:] P. Pattison, K.M. Carley, R. Breiger (eds.), *Dynamic social network modeling and analysis. Workshop Summary and Papers*, National Academies Press, Washington, D.C., 133–145.

- [7] Carley K.M. (2005), *Dynamic network analysis for counter-terrorism*, Unpublished Manuscript, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- [8] Carley K.M. (2017), *Intraorganizational complexity and computation*, [in:] J.A.C. Baum (ed.), *Companion to Organizations*, Wiley. Online Library, 208–232.
- [9] Chinowsky P., Taylor J.E., Di Marco M. (2011), *Project network interdependency alignment: New approach to assessing project effectiveness*, *Journal of Management in Engineering*, 27(3), 170–178.
- [10] Dziadosz A. (2010), *Przegląd wybranych metod wspomagających analizę ryzyka przedsięwzięć budowlanych*, *Przegląd Budowlany*, 7–8, 76–80.
- [11] Effken J.A., Carley K.M., Gephart S., Verran J.A., Bianchi D., Reminga J., Brewer B.B. (2011), *Using ORA to explore the relationship of nursing unit communication to patient safety and quality outcomes*, *International Journal of Medical Informatics*, 80(7), 507–517.
- [12] Erdős P., Rényi A. (1959), *On Random Graphs I*, *Publicationes Mathematicae Debrecen*, 6, 290–297.
- [13] Euler L. (1736), *Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*, *Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae*, 8, 128–140.
- [14] Frączak A., Frączak P. (2009), *Świat sieci złożonych. Od fizyki do Internetu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [15] Glover F. (1989), *Tabu search – part I*, *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190–206.
- [16] Glover F. (1990), *Tabu search – part II*, *ORSA Journal on Computing*, 2(1), 4–32.
- [17] Glover F., Laguna M. (1998), *Tabu search*, [in:] *Handbook of combinatorial optimization*, Springer, Boston, 2093–2229.
- [18] Gondia A., Ezzeldin M., El-Dakhakhni W. (2022), *Dynamic networks for resilience-driven management of infrastructure projects*, *Automation in Construction*, 136, 104149.
- [19] Ignasiak E. (2001), *Badania operacyjne*, PWE, Warszawa.
- [20] Jaśkowski P. (2015), *Methodology for enhancing reliability of predictive project schedules in construction*, *Eksploatacja i Niezawodność*, 17(3), 470–479.
- [21] Jaśkowski P., Biruk S. (2010), *Analiza czynników ryzyka czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych*, *Czasopismo Techniczne*, 1-B, 157–166.
- [22] Knight F.H. (1993), *Risk, Uncertainty and Profit*, London.
- [23] Krackhardt D., Carley K.M. (1998), *PCANS model of structure in organizations*, Carnegie Mellon University, Institute for Complex Engineered Systems, Pittsburgh, 113–119.
- [24] Krzemiński M. (2016), *Construction scheduling and stability of the resulting schedules*, *Archives of Civil Engineering*, 62(2), 89–100.

- [25] Li Y., Lu Y., Li D., Ma L. (2015), *Metanetwork analysis for project task Assignment*, Journal of Construction Engineering and Management, 141, 12.
- [26] Li Y.K., Qian L.L., He Q.H., Duan Y.F. (2014), *Meta-network Based Fitness Measurement of Projects Organization and Tasks Assignment*, [in:] *Proceedings of the 17th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*, Springer, Berlin – Heidelberg, 643–655.
- [27] Meadows D.H. (2020), *Myślenie systemowe. Wprowadzenie*, Helion, Gliwice.
- [28] Moreno J.L. (1934), *Who Shall Survive?*, Beacon House, New York.
- [29] Rahi K. (2019), *Project resilience: a conceptual framework*, International Journal of Information Systems and Project Management, 7(1), 69–83.
- [30] Reminga J., Carley K.M. (2003), *Measures for ORA (Organizational Risk Analyzer)*, Institute for Software Research School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, March 22.
- [31] Schroeder K., Hatton M. (2012), *Rethinking risk in development projects: from management to resilience*, Development in Practice, 22(3), 409–416.
- [32] Skorupka D. (2007), *Metoda identyfikacji i oceny ryzyka realizacji przedsięwzięć budowlanych*, WAT, Warszawa.
- [33] Sylvester J.J. (1878), *Chemistry and algebra*, Nature, 17(432), 284.
- [34] Śladowski G. (2021a), *Metasieci w proaktywnym podejściu do planowania rewaloryzacji zabytkowych obiektów budowlanych*, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [35] Śladowski G. (2021b), *Myślenie systemowe w proaktywnym podejściu do planowania przedsięwzięć budowlanych w warunkach ryzyka*, Przegląd Budowlany, 92, 7–8, 132–136.
- [36] Śladowski G. (2018), *Use of Meta-Networks to Evaluate Key Agents, Knowledge and Resources in the Planning of Construction Projects*, Archives of Civil Engineering, 64(3), 111–129.
- [37] Śladowski G. (2019), *Using meta-networks to analyse the impact of adverse random events on the time and cost of completing construction work*, Engineering and Environmental Sciences, 28(2), 192–202.
- [38] Trocki M., Wyrozębski P. (2015), *Planowanie przebiegu projektów*, Oficyna Wydawnicza SGH, Warszawa.
- [39] Von Bertalanffy L. (1951), *General system theory, a new approach to unity of science. Towards a physical theory of organic teleology, feedback and dynamics*, Human Biology, 4, 346–361.
- [40] Wang J. (2018), *Total Constraint Management for Improving Construction Work Flow in Liquefied Natural Gas Industry*, Doctoral Dissertation, Curtin University, Perth.
- [41] Wasserman S.F., Faust K.K. (1994), *Social Network Analysis: Methods and Applications*, Cambridge University Press, New York.

- [42] Zhang H. (2007), *A redefinition of the project risk process: Using vulnerability to open up the event-consequence link*, International Journal of Project Management, 25(7), 694–701.
- [43] Zhu J. (2016), *A System-of-Systems Framework for Assessment of Resilience in Complex Construction Projects*, Doctoral Dissertation, Florida International University, Miami.
- [44] Zhu J., Mostafavi A., Ahmad I. (2014), *System-of-systems modeling of performance in complex construction projects: A multi-method simulation paradigm*, Computing in Civil and Building Engineering, 17 czerwca 2014, 1877–1884.
- [45] Zhu J., Mostafavi A. (2015), *An Integrated Framework for the Assessment of the Impacts of Uncertainty in Construction Projects Using Dynamic Network Simulation*, Computing in Civil Engineering, 16 czerwca 2015, 355–362.
- [46] Zhu J., Mostafavi A. (2017), *Discovering complexity and emergent properties in project systems: A new approach to understanding project performance*, International Journal of Project Management, 35(1), 1–12.
- [47] Zhu J., Mostafavi A. (2016), *Dynamic Meta-Network Modeling for an Integrated Project Performance Assessment under Uncertainty*, Construction Research Congress, 2340–2350.
- [48] Zhu J., Mostafavi A. (2018), *Enhancing Resilience in Disaster Response: A Meta-Network Analysis Approach*, Construction Research Congress, 29 marca 2018.
- [49] Żukowski P. (2012), *Podstawy budowy modelu dynamiki systemu zarządzania oraz jego symulacja w organizacji gospodarczej (na podstawie metodologii dynamiki systemów JW Forrester)*, Przedsiębiorczość – Edukacja, 8, 331–347.

7. OCENA I ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI SIECI KOMUNIKACYJNEJ PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO

Roman Trach¹

7.1. WSTĘP

Kierunki wykorzystania wiedzy i badań naukowych w XXI wieku różnią się obecnie znacząco od tych, które były realizowane w wieku XX. W przeszłości główne wysiłki naukowców były skierowane na badanie środków produkcji, a w obecnym stuleciu podstawą badań jest podmiot produkcji z jego wiedzą, umiejętnościami i zdolnościami. Pomimo przynależności dyscyplinarnej do różnych szkół naukowych obecnych naukowców łączy paradygmat – teoria i metodologia nauki kognitywnej. O aktualności problematyki badań kognitywnych wskazują także cechy współczesnego społeczeństwa, które wchodzi w nowy etap swojego rozwoju: społeczeństwo informacyjne jest stopniowo zastępowane społeczeństwem opartym na wiedzy.

W 2002 roku Amerykańska Narodowa Fundacja Nauki opublikowała raport „Zbieżne technologie w celu poprawy wydajności człowieka. Nanotechnologia, biotechnologia, technologie informacyjne i nauki kognitywne na następne 50 lat”. Jego autorzy prezentują nowe spojrzenie środowiska naukowego na perspektywy transdyscyplinarności integracji wiedzy i technologii oraz wprowadzają termin „konwergencja NBIL”, gdzie „N” to nanotechnologia, „B” – biotechnologia, „I” – technologia informacyjna oraz „C” – kognitywistyka. Nauki kognitywne to interdyscyplinarna synteza nauk związanych wspólnym problemem. Słowo *cognitio* jest tłumaczone z łaciny jako ‘wiedzieć’, ‘rozpoznawać’. Termin „kognitywny” opisuje aktywność poznawczą z punktu widzenia procesów wymiany informacji między człowiekiem a środowiskiem. Celem tworzenia systemów kognitywnych jest zdobywanie nowej wiedzy, podejmowanie decyzji w trudnych sytuacjach oraz inteligentne przetwarzanie danych.

Realizacja przedsięwzięcia budowlanego jest to złożony proces, przebiegający w turbulentnym środowisku z nieprzewidywalnymi procesami, unikatowymi warunkami i tymczasowo zorganizowanymi zespołami. Ponadto branża budowlana

¹ Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, e-mail: roman_trach@sggw.edu.pl.

charakteryzuje się ograniczonymi zasobami i wysokim poziomem konkurencji. Właśnie ograniczone zasoby i konkurencyjność określają zarządzanie wiedzą jako szczególnie ważny kierunek rozwoju branży.

W dynamicznie zmieniającym się środowisku, typowym dla zarządzania przedsięwzięciem, wiedza gromadzona przez uczestników nabiera ważnego statusu. Jednocześnie przy realizacji przedsięwzięcia budowlanego pojawia się wiele problemów związanych z zarządzaniem wiedzą. Jednym z głównych jest fakt, że wiedza ta nie jest wykorzystywana tam, gdzie została wygenerowana, i znika wraz z zakończeniem przedsięwzięć oraz zmian w zespole przedsięwzięcia.

Badanie integracji wiedzy uczestników przedsięwzięcia może zapewnić lepsze zrozumienie procesów, zminimalizować negatywny wpływ niedociągnięć wynikających z rozdrobnienia etapów budowy, zmniejszyć prawdopodobieństwo zmian w elementach „żelaznego trójkąta przedsięwzięcia” i następnie poprawić efektywność przedsięwzięć budowlanych [19, 21]. Uzyskanie większego wpływu na wykorzystanie wiedzy uczestników przy realizacji przedsięwzięcia budowlanego jest możliwe dzięki efektywnemu zarządzaniu różnymi formami interakcji pomiędzy przedsiębiorstwami budowlanymi. W sytuacjach, w których współdziałanie przedsiębiorstw w ramach zintegrowanych struktur nie przynosi pożądanych efektów, rośnie potrzeba aktualizacji podejść metodycznych, pozwalających na doskonalenie mechanizmu zarządzania zintegrowanymi strukturami.

Jakość komunikacji pomiędzy uczestnikami przedsięwzięć budowlanych ma ogromne znaczenie i istotny wpływ na podstawowe czynniki efektywnej pracy zespołowej, które z kolei znajdują odzwierciedlenie w wynikach przedsięwzięć budowlanych [12]. W konsekwencji, terminowe przekazywanie odpowiednich informacji przyczynia się do realizacji przedsięwzięcia budowlanego w ustalonym czasie i budżecie [13]. Nieefektywny system komunikacji często prowadzi do większej ilości przeróbek, co pociąga za sobą wydłużenie czasu trwania, wzrost kosztów i spadek jakości. Komunikacja zapewnia skuteczną integrację uczestników przedsięwzięcia i zmniejsza prawdopodobieństwo konfliktów [8]. Uczestnicy przedsięwzięcia zbierają, analizują i przekazują informacje w czasie rzeczywistym, aby zapewnić wczesne ostrzeżenie o odchyleniach od planów i terminowej realizacji odpowiednich działań [9]. Ponadto skuteczna komunikacja tworzy silną relację między uczestnikami przedsięwzięcia budowlanego, poprawia motywację, wydajność i współpracę w zespole [7]. W ten sposób skuteczny system komunikacji w ramach przedsięwzięcia zapewnia szybkie i dokładne przekazywanie informacji technicznych, które służą jako podstawa podejmowania decyzji. Może to usprawnić pracę zespołową, zmniejszyć liczbę konfliktów, zapewnić przestrzeganie terminów i budżetów oraz przyczynić się do sukcesu przedsięwzięcia.

Badanie integracji wiedzy kluczowych interesariuszy przedsięwzięcia może zatem zminimalizować negatywny wpływ, wynikający z rozdzielenia etapów budowy,

zmniejszyć prawdopodobieństwo zmian w zakresie, czasie trwania i kosztach przedsięwzięć, a w efekcie w przyszłości poprawić ich efektywność.

Jednym z warunków efektywnego zarządzania wiedzą w przedsięwzięciu jest stworzenie i wydajne funkcjonowanie systemu komunikacji, który łączy uczestników przedsięwzięcia. Komunikacja jest kluczowym fundamentem tworzenia bazy wiedzy o przedsięwzięciu, która obejmuje interakcję między uczestnikami i zapewnia swobodny przepływ informacji, danych i wiedzy między nimi. Zgromadzone dane mogą stanowić atut przedsiębiorstwa, ponieważ ich wykorzystywanie pozwala na lepsze prognozy i podejmowanie właściwych decyzji zarządczych. Ponadto wiedzę wytworzoną w przedsięwzięciu i sprawdzoną w praktyce należy uznać za bardziej wiarygodną niż dane z eksperymentów lub symulacji.

Etapem poprzedzającym ocenę efektywności sieci komunikacyjnej jest analiza struktury organizacyjnej przedsięwzięcia. Przedsięwzięcia budowlane mogą być realizowane z zastosowaniem różnego rodzaju struktur organizacyjnych.

Sieciowa struktura organizacyjna jest nową formą w porównaniu z liniową, wydziałową, macierzową czy projektową strukturą.

Jej główne zalety i korzyści są następujące:

- pojawienie się efektu synergicznego, który stwarza szansę na uzyskanie efektu większego niż suma arytmetyczna efektów z działań poszczególnych podmiotów,
- redukcja kosztu całkowitego,
- możliwość szybkiego nauczania uczestników organizacji sieciowej, co jest ważnym czynnikiem szerokiego upowszechnienia pozytywnych efektów,
- racjonalne wykorzystanie wspólnych zasobów materialnych i niematerialnych,
- dostępność do realizacji dużych przedsięwzięć budowlanych dla małych i średnich przedsiębiorstw branży budowlanej,
- wysoki poziom organizacji i koordynacji przepływu informacji oraz procesu innowacji, wzmacniający kluczowe kompetencje uczestników,
- zwiększenie szybkości i jakości realizacji przedsięwzięcia oraz lepsze zaspokojenie potrzeb klienta.

7.2. METODA BADANIA

7.2.1. ANALIZA SIECI SPOŁECZNOŚCIOWYCH

Jedną z metod oceny efektywności struktury organizacyjnej sieci jest analiza sieci społecznych (*Social Network Analysis*, SNA). Koncepcja SNA opiera się na fakcie, że grupy lub jednostki wymieniają informację i wiedzę w trakcie dowolnej działalności, a proces ten można przedstawić za pomocą socjogramów. Ponadto sieciowa

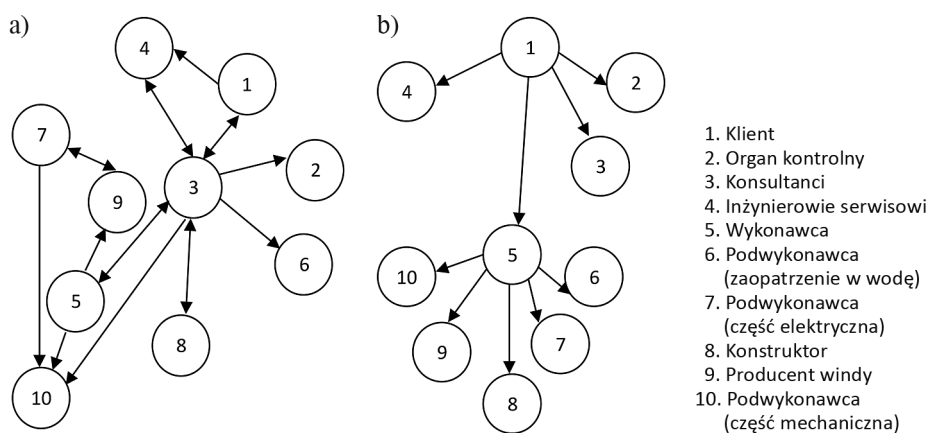
wymiana informacji może być oceniona matematycznie i pozwala na obliczenie potencjalnej efektywności oraz identyfikację słabych stron zespołu.

Baykasoglu i inni [2] przedstawiają ogólny opis analizy sieci społecznych jako sieci uczestników przedsięwzięcia i relacji, gdzie węzły reprezentują „aktorów”, a krawędzie – relacje między uczestnikami. Komunikacja sieciowa może być analizowana matematycznie i umożliwia naukowcom uzyskanie informacji o potencjalnej skuteczności i słabościach grupy. SNA dysponuje szeroką gamą metod wykorzystujących pomoce dyskursywne i wizualne do rozwiązywania problemów struktur społecznych.

Badacze często wykorzystują narzędzia SNA do analizy relacji między uczestnikami przedsięwzięcia budowlanego. Jeden z pierwszych artykułów dotyczył problemów komunikacyjnych pomiędzy głównymi uczestnikami przedsięwzięcia (klient, kierownik projektu, architekt i wykonawca) [10]. Hossain [6] badał miary centralności i relacje między strukturalną pozycją aktora w sieci komunikacyjnej a jego zdolnością do koordynowania przedsięwzięć. Abbsaian-Hosseini i inni [1] zaproponowali podejście analityczne, łącząc SNA i analizę zmienności harmonogramu budowy. Autorzy obliczyli miarę stopnia centralizacji dla każdego pracownika. Wyniki wskazują, że istnieje pozytywna relacja między miarą centralności a stopniem zmienności harmonogramu budowy.

Chinowsky i Songer [4] przeanalizowali sieci uczestników przedsięwzięcia budowlanego i zauważyli, że między uczestnikami przedsięwzięcia istnieją relacje społeczne i informacyjne (rys. 7.1). Autorzy twierdzą, że zespoły odnoszące sukcesy charakteryzują się wysokim poziomem komunikacji między członkami zespołu i wysokim stopniem współpracy.

Pryke i inni [14] przeanalizowali sieci samoorganizacji przy realizacji przedsięwzięcia budowlanego w Londynie. Autorzy przyjęli SNA w celu poznania struktury



Rys. 7.1. Sieć relacji na podstawie umów (a) i sieć wymiany informacji uczestników przedsięwzięcia (b)

i sieci komunikacyjnych uczestników. Dane zebrano od 60 uczestników przedsięwzięcia i zbadano miarę centralności aktorów (tab. 7.1), przyglądając się ich łączności, wpływowi i potencjałowi pośrednictwa.

Wśród ostatnich badań na uwagę zasługują dwa artykuły, w których autorzy analizują sieć samoorganizującą się, składającą się z 28 uczestników przedsięwzięcia budowlanego [15, 17]. Relacje pomiędzy członkami organizacji wizualizowano za pomocą metod SNA. Wykorzystanie SNA do badania tej sieci umożliwiło zrozumienie i identyfikację niektórych problemów realizacji przedsięwzięcia. Jednocześnie autorzy podkreślili korzyści płynące z zarządzania samoorganizującą się siecią w celu osiągnięcia założeń przedsięwzięcia. W wyniku analizy sieci wykryto anomalie w komunikacji między uczestnikami przedsięwzięcia. Metoda optymalizacji wskazała na możliwości poprawy efektywności komunikacji w ramach tej sieci.

Lu i inni [11] wykorzystali SNA do zbadania wpływu modelowania informacyjnego w budownictwie (BIM, Building Information Modeling) na organizację przedsięwzięć budowlanych. Wykorzystanie narzędzi SNA do analizy przedsięwzięć pokazało, że BIM przyczynia się do zmian organizacyjnych, poprawy wydajności komunikacji i organizacji procesów współpracy przez przeniesienie znacznej części komunikacji między uczestnikami przedsięwzięcia na wcześniejsze etapy.

Aby zidentyfikować kluczowe elementy sieci komunikacyjnych, ważne jest poznanie znaczenia wszystkich uczestników sieci i relacji między nimi. W tym celu w niniejszej pracy przeanalizowano podejście do definiowania miar centralności węzłów sieci komunikacyjnej. Pozwala to na lepsze zrozumienie pozycji uczestnika w sieci oraz poziomu jego znaczenia i wpływu. Istnieje szeroki zakres miar opisywanych przez teorię grafów. Od prostych miar, takich jak liczba węzłów i krawędzi, które opisują rozmiar i rzadkość grafu, po stopnie węzłów, które pokazują, w jaki sposób każdy węzeł w sieci jest połączony z innymi.

Wskaźniki, które wykorzystywane są do badania sieci, można sklasyfikować w zależności od kierunku analizy:

- wskaźniki do analizy cech sieci: gęstość, średni stopień sieci, średnia długość ścieżki, współczynnik klasteryzacji,
- wskaźniki centralności, które wskazują na stopień nierównoważności uczestników sieci.

Obliczenie i analiza miar centralności może dać odpowiedź na następujące pytania:

- który węzeł jest najbardziej centralny i/lub wpływowy w danej sieci,
- o ile ważny jest dany węzeł dla przepływu informacji w sieci,
- który węzeł jest najbardziej peryferyjny w sieci.
- wskaźniki do analizy wspólnot w sieci, wskazujące na stopień, w jakim węzły na wykresie mają tendencję do grupowania się we wspólnoty (klastry).

Pomimo dużej liczby opracowań naukowych związanych z analizą sieci komunikacyjnej uczestników przedsięwzięcia, dodatkowej uwagi wymaga problem

określenia miar, które można wykorzystać do oceny komunikacji, czyli problem wyboru najlepszej miary centralności.

Tabela 7.1 przedstawia wybrane miary centralności, przyjęte do obliczeń w tym badaniu.

Tabela 7.1

Miary centralności grafów	
Miara centralności	Formuła
Centralność wężła <i>i</i>	$Cd(i) = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n - 1}$ <i>a_{ij}</i> – element macierzy kwadratowej <i>A</i>. <i>a_{ij}</i> jest równe liczbie krawędzi od wężła <i>i</i> do wężła <i>j</i>; <i>n</i> – liczba wężłów.
Centralność wektora własnego <i>i</i>	$Ce(i) = k_1^{-1} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j$ <i>a_{ij}</i> – element macierzy sąsiedztwa; <i>x_j</i> – jest centralnością wektora własnego wężła <i>j</i>; <i>k_i</i> – to wartości własne macierzy sąsiedztwa <i>A</i>, a <i>k₁</i> jest największą z nich.
PageRank	$Cpr_{(i)} = \alpha \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{x_j}{k_j^{out}} + \beta$ <i>a_{ij}</i> – jest elementem macierzy sąsiedztwa; <i>x_j</i> – jest centralnością wektora własnego wężła <i>j</i>; <i>α</i> i <i>β</i> – są stałymi; <i>k_j^{out}</i> – jest liczbą krawędzi wychodzących z wężła <i>j</i>.
Centralność przepływu przez wężel <i>k</i>	$Cb_{flowk} = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{l=2}^n \sum_{i=1}^{l-1} \sum_{j \in N(k)} i_{jk}^{(il)} $ <i>i</i> – wężel początkowy; <i>l</i> – wężel docelowy; <i>k</i> – wężel pośredni.
Centralność przepływu w pobliżu wężła <i>i</i>	$Cc_{flow_i} = \frac{1}{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n r_{ij}^{eff}}$ <i>r_{ij}^{eff}</i> – efektywny opór między wężłami <i>i</i> oraz <i>j</i>.

7.2.2. OCENA EFEKTYWNOŚCI STRUKTURY ORGANIZACYJNEJ

Metoda wyboru struktury organizacyjnej oparta jest na jednym z podstawowych założeń koncepcji Zintegrowanej Realizacji Przedsięwzięcia (*Integrated Project*

Delivery, IPD), a mianowicie współpracy multidyscyplinarnego zespołu, którego członkowie największą liczbę decyzji podejmują wspólnie i/lub w uzgodnieniu.

Ponieważ wszyscy uczestnicy są zainteresowani efektywną realizacją całego przedsięwzięcia, większość decyzji będzie podejmowana na podstawie tych samych lub podobnych kryteriów.

Optymalność decyzji zależy przede wszystkim od skuteczności procesu negocjacyjnego, który z kolei zależy od struktury organizacyjnej przedsięwzięcia.

Przeprowadzona została bezpośrednia ocena potencjalnej wydajności trzech wybranych rodzajów Sieciowej Struktury Organizacyjnej (SSO), które mogą być stosowane przy realizacji przedsięwzięć budowlanych: fokalna F1 (rys. 7.2), dynamiczna F2 (rys. 7.3) oraz multifokalna F3 (rys. 7.4).

Przy stosowaniu fokalnego typu SSO wszystkie decyzje podejmowane są w porozumieniu z kierownikiem przedsięwzięcia. Skuteczność tego typu SSO będzie w dużej mierze zależać od stopnia, w jakim kierownik będzie w stanie przystąpić do procesu negocjacji ze wszystkimi uczestnikami. Skuteczność takiego schematu może być ustalona na podstawie wzoru:

$$F = k_1 \times F_0 \quad (7.1)$$

gdzie:

- F_0 – potencjalna skuteczność SSO, która zależy tylko od typu struktury organizacyjnej;
- k_1 – wskaźnik przeciążenia uwzględniający zmniejszenie wydajności pracowników, którzy łączą swoje obowiązki produkcyjne z intensywnymi działaniami negocjacyjnymi.

Według oceny ekspertów, jeżeli liczba uczestników przedsięwzięcia wynosi $n \geq 10$, to wskaźnik k_1 można przyjąć jako równy 0,5.

Dynamiczna SSO oznacza, że każdy uczestnik ma uzgodnić swoje zamierzenie z innymi zainteresowanymi członkami sieci. Skuteczność takiego schematu może być ustalona na podstawie wzoru:

$$F = k_2 \times F_0 \quad (7.2)$$

gdzie:

- k_2 – wskaźnik przeciążenia, który uwzględnia zmniejszenie wydajności pracowników zmuszonych do łączenia obowiązków produkcyjnych z intensywnymi działaniami negocjacyjnymi.

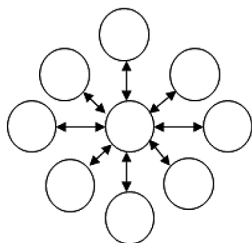
Według oceny ekspertów k_2 można przyjąć jako równy 0,5.

Multifokalny typ SSO zakłada obecność kilku „asystentów” kierownika projektu, których zadaniem jest negocjowanie i uzgadnianie propozycji dotyczących określonego obszaru działalności. Skuteczność takiego schematu może być ustalona na podstawie wzoru:

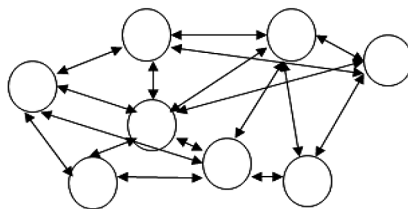
$$F = k_3 \times F_0 \quad (7.3)$$

gdzie:

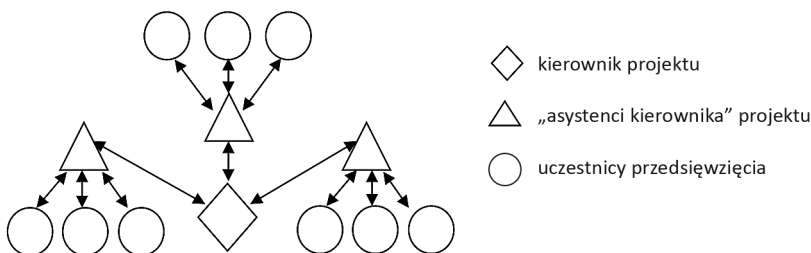
k_3 – współczynnik pokrycia, który w przeciwieństwie do struktury fokalnej można uznać za bliski 1, ponieważ obciążenie jednego zastępcy jest znacznie mniejsze niż obciążenie menadżera sieci.



Rys. 7.2. Schemat fokalnego typu SSO



Rys. 7.3. Schemat dynamicznego typu SSO



Rys. 7.4. Schemat multifokalnego typu SSO

7.2.3. ANALIZA SIECI KOMUNIKACYJNEJ Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMÓW GRUPOWANIA

Kolejnym krokiem była analiza sieci komunikacyjnej przedsięwzięcia za pomocą algorytmów grupowania, które koncentrują się na porządkowaniu danych i tworzeniu hierarchii zagnieżdżonych klastrów. Algorytmy grupowania dzielą zbiór obiektów na klastry, dzięki czemu członkowie jednego klastra są bardzo „podobni” do siebie, podczas gdy obiekty należące do różnych klastrów są stosunkowo różne.

Proponowane metody, stosowane do znalezienia optymalnego grupowania, oparte są na założeniu, że problem grupowania sieci można rozwiązać jako wynik ogólnego procesu optymalizacji. Algorytmy grafowe służą do rozwiązywania problemów z grupowaniem grafów. Algorytmy grupowania grafów to zestaw algorytmów, mających na celu kompilację danych i tworzenie hierarchii zagnieżdżonych wspólnot. Zastosowanie algorytmów grupowania zapewnia podział grafu na nienakładające się klastry. Członkowie jednej wspólnoty są do siebie bardzo „podobni”, podczas gdy obiekty należące do różnych wspólnot są relatywnie różne. Do oceny jakości algorytmu grupowania wykorzystuje się funkcjonalność modularności,

kłóra określana jest na podstawie gęstości powiązań we wspólnocie w porównaniu z powiązaniami między społecznościami. W przypadku grafu ważonego modularność wyraża się jako:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j) \quad (7.4)$$

gdzie:

- A_{ij} – waga krawędzi między węzłami i, j ;
- k_i, k_j – suma wag krawędzi połączonych z węzłami i, j ;
- δ – funkcja $\delta(u, v)$ równa 1, jeśli $u = v$, w przeciwnym razie = 0;
- c_i, c_j – wspólnota węzłów i, j ;
- m – połówkowa suma wag wszystkich krawędzi grafu $\left(m = \frac{1}{2} \sum_{i,j} A_{ij} \right)$.

Powszechną techniką uczenia maszynowego identyfikowania wspólnot w dużych sieciach danych jest algorytm Louvain, który zapewnia pozytywną równowagę między wszechstronnością a wydajnością [3]. Algorytm jest procedurą wieloetapową i obejmuje lokalną optymalizację modularności w odniesieniu do sąsiadów każdego węzła: procedura jest wykonywana iteracyjnie tak długo, dopóki modularność stale rośnie.

Algorytm Louvaina obejmuje cztery etapy:

Etap 1. Podczas tego etapu każdemu węzłowi w sieci przypisywana jest osobna wspólnota. Tak więc w początkowej wersji grafu jest tyle wspólnot, ile jest węzłów. Najpierw dla każdego węzła i identyfikowane są wszystkie sąsiednie wspólnoty $N_c(i)$.

Zbiór wszystkich sąsiednich klastrow węzła i oznaczono jako:

$$N_c(i) = \{ C_k \mid \exists j : (j \in N(i)) \wedge (l(j) = k) \wedge (l(j) \neq l(i)) \} \quad (7.5)$$

Etap 2. Następnie dla każdego węzła i analizowane są opcje zmiany modularności, z możliwym przeniesieniem węzła i z jednej wspólnoty do drugiej. Węzeł i przenosi się do wspólnoty, w której wartość modularności jest maksymalna. Jeśli nie ma pozytywnego wyniku przeniesienia węzła, węzeł pozostaje w swojej początkowej wspólnocie.

Modularność podziału grafu G można obliczyć za pomocą wzoru:

$$Q(C_1, C_2, \dots, C_m) = \sum_{k=1}^m \left[\frac{\sum_{i \in C_k} \sum_{j \in C_k} a_{ij}}{\sum_{i,j=1}^n a_{ij}} - \frac{\left(\sum_{i \in C_k} a_{i \circ} \right) \left(\sum_{j \in C_k} a_{\circ j} \right)}{\left(\sum_{i,j=1}^n a_{ij} \right)^2} \right] \quad (7.6)$$

Jak widać z równania, modularność jest różnicą między wielkością rzeczywistą i oczekiwaną (przy założeniu, że krawędzie pojawiają się niezależnie od struktury

wspólnoty) w stosunku do krawędzi, w każdym klastrze skumulowanym we wszystkich klastrach.

Wprowadzenie $(n \times 1)$ wymiarowego binarnego wektora przynależności u_k dla każdej wspólnoty k (7.6) można przepisać w odwzorowaniu macierzy w następujący sposób:

$$\begin{aligned} Q(\overline{u_1, u_m}) &= \sum_{k=1}^m \left[\frac{u_k^T A_{u_k}}{\text{vol}(G)} - \frac{(u_k^T A_e)(e^T A_{u_k})}{(\text{vol}(G))^2} \right] = \sum_{k=1}^m u_k^T \left(\frac{A}{\text{vol}(G)} - \frac{d_o d_i^T}{(\text{vol}(G))^2} \right) u_k = \\ &= \frac{1}{\text{vol}(G)} \sum_{k=1}^m u_k^T \left(A - \frac{d_o d_i^T}{\text{vol}(G)} \right) u_k \end{aligned} \quad (7.7)$$

gdzie:

- Q – macierz modularności;
- A – macierz sąsiedztwa;
- u_k – binarny wektor przynależności, który jest równy 1 na pozycji i , jeśli węzeł i należy do wspólnoty C_k , lub równy 0 w przeciwnym razie;
- u_k^T – wektor transponowany u_k ;
- $d_o = A_e$ – początkowy wektor kroku grafu G ;
- $d_i = A_e^T$ – wektor wejściowy grafu G ;
- $\text{vol}(G)$ – objętość grafu G .

Elementy standardowej macierzy modularności Q można zdefiniować jako:

$$Q = \left(A - \frac{d_o d_i^T}{\text{vol}(G)} \right) \quad (7.8)$$

Wówczas kryterium modularności można obliczyć na podstawie wzoru:

$$Q(\overline{u_1, u_m}) = \frac{1}{\text{vol}(G)} \sum_{k=1}^m u_k^T Q u_k \quad (7.9)$$

Mając nieskierowany graf, a więc symetryczną macierz modularności, i zakładając, że $k \neq l$, wzrost modularności oblicza się jako:

$$\begin{aligned} \Delta Q(i, C_l) &= Q \text{ (po przeniesieniu wężła } i \text{ do klastra } C_l) \\ &\quad - Q \text{ (przed przeniesieniem wężła } i \text{ do klastra } C_l) \\ &= \frac{1}{\text{vol}(G)} [(u_k - e_i)^T Q (u_k - e_i) + (u_l + e_i)^T Q (u_l + e_i)] - (u_k^T Q u_k + u_l^T Q u_l) = \\ &= \frac{1}{\text{vol}(G)} [(e_i^T Q e_i - 2u_k^T Q e_i) + (e_i^T Q e_i - 2u_l^T Q e_i)] = \frac{2}{\text{vol}(G)} (e_i + u_l - u_k)^T Q e_i \end{aligned} \quad (7.10)$$

Z tego wynika, że obliczenie wzrostu modularności przy przenoszeniu wężła i do sąsiedniego klastra C_l jest określone wzorem:

$$\Delta Q(i, C_l) = \frac{2}{\text{vol}(G)} (e_i + u_l - u_k)^T q_i, \quad \text{gdzie} \quad q_i = \text{col}_i(Q) = Qe_i \quad (7.11)$$

Obliczenie modularności wymaga jedynie wyliczenia $u_l^T q_i$ dla każdej wspólnoty docelowej C_l . Drugi człon równania, $(e_i - u_k)^T q_i$, jest obliczany wstępnie tylko raz.

Jeśli węzeł i znajduje się w tej samej wspólnocie k , wtedy $u_k = e_i$ i $\Delta Q(i, C_l)$ zmniejsza się do: $\frac{2u_l^T q_i}{\text{vol}(G)}$.

Proces obliczania wzrostu modularności jest powtarzany wielokrotnie i sekwencyjnie dla wszystkich węzłów aż do osiągnięcia dalszej poprawy. Pierwszy etap kończy się po osiągnięciu lokalnych maksimów modularności. Oznacza to, że żaden następny krok nie może poprawić modularności.

Etap 3. Trzecim etapem algorytmu Louvaina jest wykorzystanie podziału uzyskanego po przeprowadzeniu optymalizacji lokalnej. Każda wspólnota G' grafu G , utworzonego na etapie optymalizacji lokalnej, staje się węzłem grafu G' . Powiązania między węzłami tej samej wspólnoty prowadzą do tworzenia konturów tej wspólnoty w nowej sieci. Wagi krawędzi nowego grafu G' są ustalane jako suma wag relacji łączących wspólnoty grafu G .

Z tego wynika, że nowa waga między węzłami k i l grafu G' , odpowiadająca skupieniom C_k i C_l grafu G , wynosi:

$$w'_{kl} = w(C_k, C_l) = \sum_{i \in C_k} \sum_{j \in C_l} a_{ij} \quad (7.12)$$

Gdyby graf G nie miał połączeń między C_k i C_l , odpowiadałoby to zerowej wadze w macierzy sąsiedztwa. Dodatkowo każdemu węzłowi G' przypisuje się samokontrolę, a jego waga jest podana jako waga całkowita we wspólnocie G :

$$w'_{kk} = w(C_k, C_k) \quad (7.13)$$

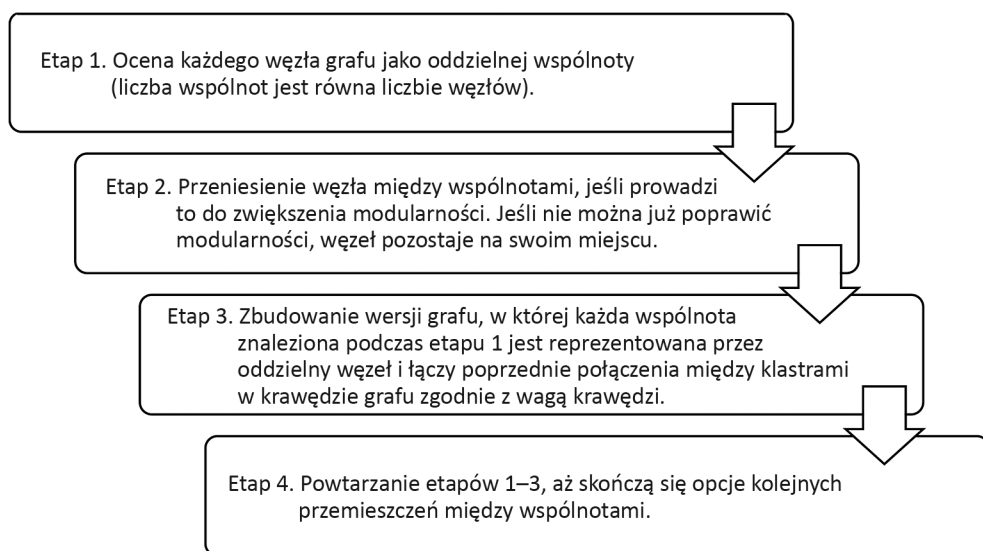
W związku z tym macierz sąsiedztwa G' jest obliczana z nowych wag dla wszystkich wspólnot:

$$a'_{kl} = w'_{kl} \quad (7.14)$$

Etap 4. Następnie algorytm wraca do etapu 1, aby przeprowadzić nową optymalizację lokalną.

Sekwencja etapów 1–3 nazywana jest biegiem. Każde jej uruchomienie skutkuje utworzeniem nowego podziału na wspólnoty, wynikającego z połączenia wspólnot uzyskanych podczas wstępnego procesu. Przebiegi są powtarzane, dopóki nie będzie możliwe zwiększenie modularności, tj. nie wystąpi ruch wężła (optymalizacja lokalna) i nie dojdzie do agregacji węzłów.

Schemat metody przedstawiono na rys. 7.5.



Rys. 7.5. Schemat algorytmu Louvaina

7.3. WYNIKI

7.3.1. OCENA POTENCJALNEJ WYDAJNOŚCI SIECIOWEJ STRUKTURY ORGANIZACYJNEJ

Bezpośrednia ocena potencjalnej wydajności Sieciowej Struktury Organizacyjnej (SSO) jest zdeterminowana jej rodzajem [22]. Jej efektywność oszacowano na podstawie wektorowych modeli procesów komunikacyjnych, których graficzną reprezentację przedstawiono na rys. 7.6 i 7.7.

Dla fokalnego typu SSO potencjalna skuteczność jednego aktu komunikacyjnego f_0 jest równa:

$$f_0 = |\overline{OM}| \times |\overline{OA}| \times \cos \frac{\alpha}{2} = \cos^2 \frac{\alpha}{2} \quad (7.15)$$

Wtedy potencjalna efektywność procesu komunikacji wszystkich uczestników przedsięwzięcia jest równa:

$$F_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \frac{\alpha}{2} d\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \approx 0,8 \quad (7.16)$$

Dla dynamicznego typu SSO potencjalna skuteczność jednego aktu komunikacyjnego f_0 jest równa:

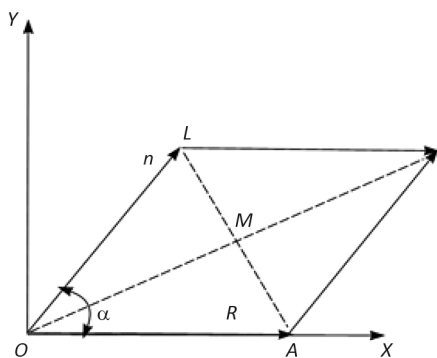
$$f_0 = |\overline{OM}| \times |\overline{OA}| \times \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \cos \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \times \cos \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2} = \frac{1}{2} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (7.17)$$

Wtedy potencjalna efektywność procesu komunikacji wszystkich uczestników przedsięwzięcia jest równa:

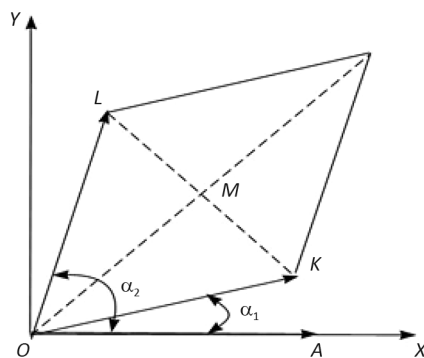
$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha_1 d\alpha_1 + \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha_2 d\alpha_2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi} \approx 0,64 \quad (7.18)$$

Dla multifokalnego typu SSO potencjalna efektywność procesu komunikacji wszystkich uczestników przedsięwzięcia jest równa:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha_1 d\alpha_1 + 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} \cos \alpha_2 d\alpha_2 = \frac{1}{\pi} + \frac{\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,77 \quad (7.19)$$



Rys. 7.6. Model wektorowy procesu komunikacji fokalnego typu SSO

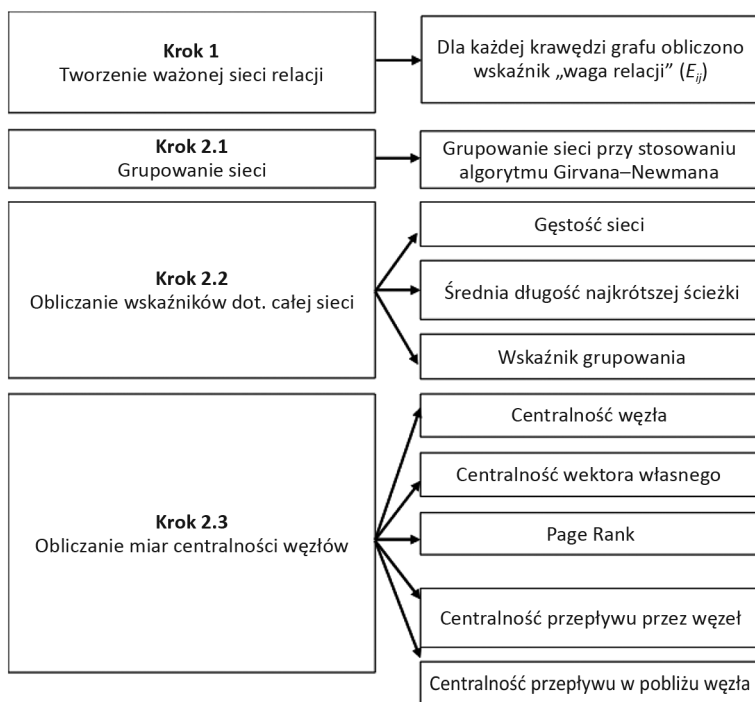


Rys. 7.7. Model wektorowy procesu komunikacji dynamicznego i multifokalnego typu SSO

Jeśli wziąć pod uwagę współczynnik przeciążenia i zaakceptować jego wartość, jak wskazano powyżej, czyli $k_1 = 0,5$; $k_2 = 0,5$; $k_3 = 1$, to otrzymujemy $F_1 = 0,41$; $F_2 = 0,32$; $F_3 = 0,77$. Wynika z tego, że najskuteczniejszy jest multifokalny typ SSO, w którym menadżer sieci ma kilku „asystentów”.

7.3.2. OCENA SIECI KOMUNIKACYJNEJ PRZY ZASTOSOWANIU MIARY CENTRALNOŚCI ORAZ ALGORYTMÓW GRUPOWANIA

W celu oceny sieci komunikacyjnej zostało przeanalizowane przedsięwzięcie budowy kompleksu mieszkalnego (trzy wielomieszkaniowe budynki o łącznej powierzchni 6850 m²), zlokalizowanego w mieście Równe [18, 20]. Budowa rozpoczęła się w lutym 2019 roku i miała zakończyć się we wrześniu 2022 roku. Schemat i kolejność badania sieci komunikacyjnej przedstawiono na rys. 7.8.



Rys. 7.8. Schemat przeprowadzenia badania sieci komunikacyjnej przedsięwzięcia

Na podstawie danych zebranych od uczestników realizacji przedsięwzięcia obliczono wskaźnik „waga relacji”. Miary centralności zostały obliczone, aby zrozumieć relacje konkretnego węzła z jego najbliższymi sąsiadami w sieci oraz określić poziom jego ważności i wpływu.

Wagę łączą między węzłami i oraz j można określić w następujący sposób:

$$E_{ij} = F_{ij} \times Q_{ij} \quad (7.20)$$

gdzie:

F_{ij} – częstotliwość komunikacji obliczona jako $f_{ij}/5$;

Q_{ij} – jakość komunikacji obliczona jako $q_{ij}/9$.

Wartość wagi węzła sieci była policzona jako suma wag wszystkich łączy połączonych z danym węzłem.

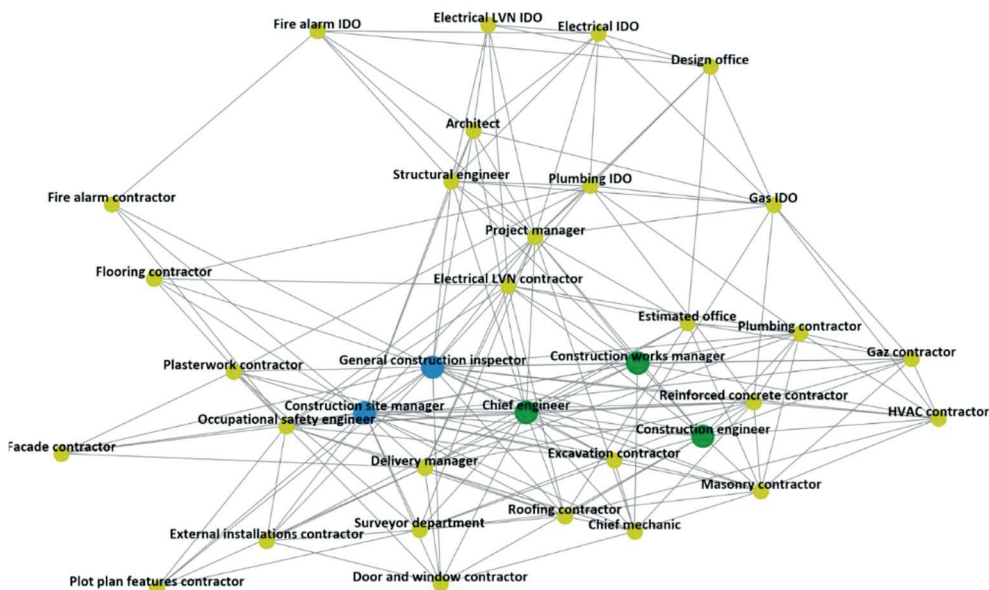
Wyniki obliczeń głównych miar centralności podano w tabeli 7.2.

Tabela 7.2

Wskaźniki centralności węzłów sieci

Uczestnicy przedsięwzięcia	Centralność węzła	Centralność wektora własnego	Centralność przepływu przez węzeł	Centralność przepływu w pobliżu węzła
General construction inspector	20,234	20,283	20,152	22,088
Project manager	30,203	0,225	30,136	31,951
Construction site manager	10,267	10,338	10,165	12,143
Construction works manager	0,163	40,260	0,083	1,819
Construction engineer	50,169	50,237	0,082	51,837
Chief engineer	40,192	30,273	0,093	41,941
Architect	0,122	0,134	0,071	1,531
Structural engineer	0,127	0,151	0,075	1,607
Chief mechanic	0,144	0,211	0,067	1,715
Surveyor department	0,139	0,182	0,080	1,676
Occupational safety engineer	0,118	0,145	0,074	1,610
Delivery manager	0,166	0,223	4 0,094	1,822
Estimated office	0,108	0,130	0,067	1,521
Design office	0,089	0,080	0,053	1,311
Electrical IDO	0,106	0,094	0,055	1,402
Plumbing IDO	0,129	0,127	5 0,093	1,632
Gas IDO	0,129	0,132	0,085	1,617
Electrical LVN IDO	0,077	0,073	0,040	1,208
Fire alarm IDO	0,078	0,065	0,052	1,187
Excavation contractor	0,106	0,167	0,049	1,503
Reinforced concrete contractor	0,144	0,192	0,075	1,732
Masonry contractor	0,130	0,174	0,066	1,643
Roofing contractor	0,131	0,202	0,059	1,664
Door and window contractor	0,105	0,172	0,044	1,484
Plumbing contractor	0,139	0,179	0,066	1,682
HVAC contractor	0,110	0,151	0,049	1,513
Gaz contractor	0,118	0,154	0,054	1,563
Electrical LVN contractor	0,115	0,141	0,072	1,574
Flooring contractor	0,052	0,081	0,026	1,014
Fire alarm contractor	0,051	0,070	0,036	0,971
Facade contractor	0,066	0,103	0,028	1,144
Plot plan features contractor	0,058	0,097	0,022	1,074
Plasterwork contractor	0,081	0,108	0,048	1,301
External installations contractor	0,080	0,118	0,038	1,297

Rysunek 7.9 przedstawia wizualizację sieci na przykładzie miary „Centralność wektora własnego”. Obliczanie miar centralności i ich wizualizację zaimplementowano przy użyciu biblioteki Networkx w języku programowania Python.



Rys. 7.9. Wizualizacja sieci komunikacyjnej za wskaźnikiem „Centralność wektora własnego” (kolorem zielonym oznaczono trzech uczestników przedsięwzięcia z najwyższymi wartościami miary centralności wektora własnego; czwarta i piąta pozycja są zaznaczone na niebiesko; pozostałe kolorem żółtym)

Analiza tabeli 7.2 wskazuje na wysokie znaczenie wszystkich wskaźników centralności kluczowych uczestników sieci (“Construction site manager”, “General construction inspector” and “Project manager”). Może to spowodować duże obciążenie komunikacyjne każdego z nich.

Biorąc pod uwagę wyniki obliczeń miar centralności oraz analizę uzyskanych danych, wnioskowano, że najlepszą miarą centralności w tej sytuacji jest centralność wektora własnego. Chociaż różnice między czterema metodami nie były duże, miara „Centralność wektora własnego” wydaje się bardziej wartościowa, ponieważ uwzględnia poziom ważności sąsiednich węzłów.

Na podstawie uzyskanych wyników postanowiono zoptymalizować sieć i w ten sposób zmniejszyć obciążenie komunikacyjne kluczowych uczestników.

7.3.3. PODNIESIENIE EFEKTYWNOŚCI SIECI KOMUNIKACYJNEJ PRZEDSIĘWZIĘCIA

Kolejnym etapem badania było zmniejszenie obciążenia komunikacyjnego kluczowych uczestników w sieci ("Construction site manager", "General construction inspector" and "Project manager"). Postawione zadanie rozwiązano przez wprowadzenie do sieci nowego węzła-uczestnika „Menedżer BIM”, który jest funkcjonalnie podporządkowany kierownikowi projektu. Jego głównym zadaniem jest codzienna integracja, koordynacja i konsolidacja wszystkich dziedzin projektowych oraz kluczowych uczestników, aby osiągnąć cel przedsięwzięcia. Jako priorytetowy wskaźnik centralności wybrano wskaźnik „Centralność wektora własnego”.

Obliczenie miary centralności przed oraz po dodaniu nowego węzła podano w tabeli 7.3.

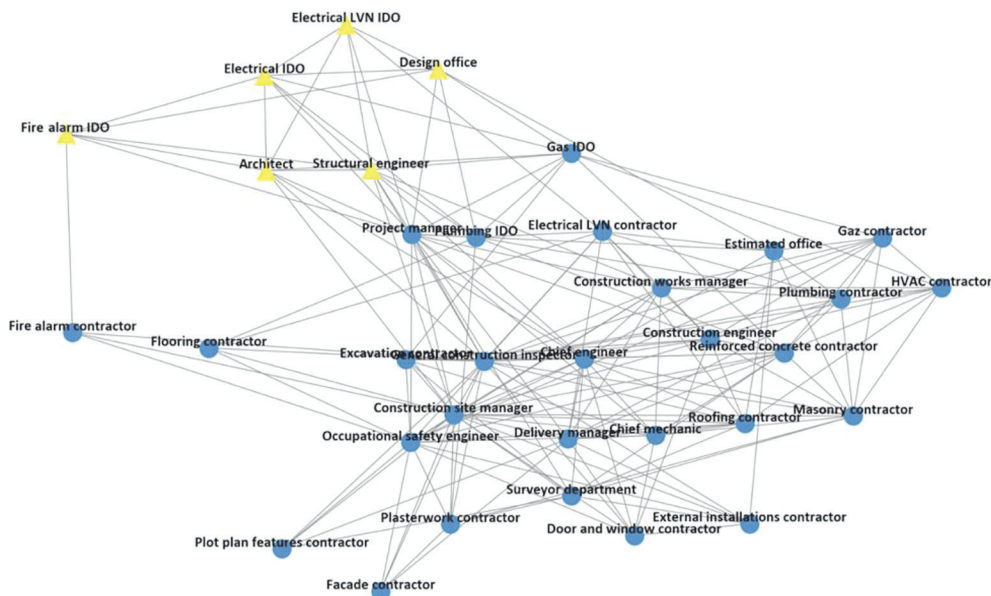
Tabela 7.3

Wyniki obliczenia centralności wektora własnego przed i po dodaniu nowego węzła „Menedżer BIM”

Uczestnicy przedsięwzięcia	Wskaźnik „Centralność wektora własnego”	
	Przed dodaniem uczestnika „Menedżer BIM”	Po dodaniu uczestnika „Menedżer BIM”
Project manager assistant	–	0,314
General construction inspector	0,283	0,261
Project manager	0,225	0,292
Construction site manager	0,338	0,311
Construction works manager	0,260	0,238
Construction engineer	0,237	0,213
Chief engineer	0,273	0,247
Architect	0,134	0,133
Structural engineer	0,151	0,150
Chief mechanic	0,211	0,192
Surveyor department	0,182	0,163
Occupational safety engineer	0,145	0,132
Delivery manager	0,223	0,204
Estimated office	0,130	0,118
Design office	0,080	0,084
Electrical IDO	0,094	0,098
Plumbing IDO	0,127	0,125
Gas IDO	0,132	0,128
Electrical LVN IDO	0,073	0,075
Fire alarm IDO	0,065	0,067
Excavation contractor	0,167	0,149

Reinforced concrete contractor	0,192	0,168
Masonry contractor	0,174	0,152
Roofing contractor	0,202	0,179
Door and window contractor	0,172	0,152
Plumbing contractor	0,179	0,159
HVAC contractor	0,151	0,134
Gaz contractor	0,154	0,137
Electrical LVN contractor	0,141	0,127
Flooring contractor	0,081	0,074
Fire alarm contractor	0,070	0,064
Facade contractor	0,103	0,093
Plot plan features contractor	0,097	0,087
Plasterwork contractor	0,108	0,097
External installations contractor	0,118	0,105

Dodanie do sieci komunikacyjnej nowego węzła „Menedżer BIM”, który ze względu na relacje z najbardziej wpływowymi uczestnikami przedsięwzięcia ma maksymalną wartość wskaźnika „Centralność wektora własnego” (0,314), zmniejszy obciążenie komunikacyjne kluczowych uczestników.



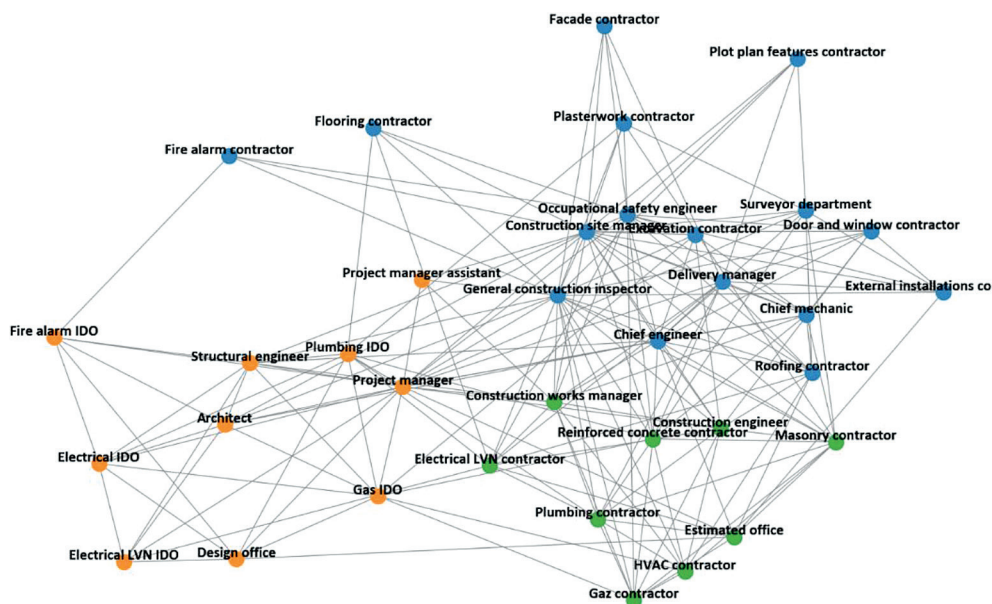
Rys. 7.10. Grupowanie sieci z wykorzystaniem algorytmu Girvana–Newmana („trójkąty” – pierwsza wspólnota; „kółka” – druga wspólnota)

Kolejnym etapem była optymalizacja sieci komunikacyjnej w celu identyfikacji wspólnot. Pierwsza próba została przeprowadzona przy użyciu algorytmu grupowania Girvana–Newmana [5] (rys. 7.10).

Algorytm podzielił węzły na dwie wspólnoty. Wspólnota uczestników klastra „trójkąt” obejmuje niektórych projektantów – „Architect”, „Design office”, „Structural engineer”, „Electrical IDO”, „Fire alarm IDO”, „Electrical LVN IDO”, jednak nie obejmuje pozostałych uczestników przedsięwzięcia: „Plumbing IDO” i „Gas IDO”. Wspólnota „kółko” jednoczy wszystkich pozostałych uczestników, mimo że poziom komunikacji między nimi był niski. Wygląda na to, że ten algorytm tworzy wspólnotę ze względu na stopień komunikacji, a nie powiązania informacyjne.

Druga próba podziału została przeprowadzona przy użyciu algorytmu grupowania Louvain, który jest nienadzorowanym algorytmem uczenia maszynowego (nie ma potrzeby wstępnego określania liczby wspólnot) i działa skutecznie na ważonych grafach nieskierowanych.

Graficzną ilustrację wyników uzyskanych przy zastosowaniu tego algorytmu przedstawiono na rys. 7.11.



Rys. 7.11. Graficzna ilustracja wyników uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu Louvaina

W jednej z trzech wspólnot znajdują się podstawowi uczestnicy tej sieci, tzn.: „General construction inspector”, „Construction site manager”, „Chief engineer”, „Chief mechanic”, „Surveyor department” i podwykonawcy różnych robot budowlanych.

lanych. W tej wspólnocie znajdują się również “Occupational safety engineer” i “Delivery manager”, ponieważ uczestnicy ci często komunikują się z podwykonawcami robót budowlanych.

Druga wspólnota zawiera podstawowego dla sieci uczestnika “Construction works manager”, a także uczestników, którzy mają z nim bliskie powiązania komunikacyjne – wykonawców instalacji różnych sieci inżynierskich. Zaskakująca jest obecność w tym klastrze “Reinforced concrete contractor” i “Masonry contractor”, którzy zgodnie ze strukturą organizacyjną przedsięwzięcia i wykonywanymi pracami powinni należeć do uczestników „niebieskiej” wspólnoty.

Trzecia wspólnota obejmuje „Project manager”, kluczowego uczestnika tej sieci, a także grupę projektantów – “Architect”, “Structural engineer”, “Design office” – oraz wykonawców dokumentacji projektowej. Dodatkowo w tym klastrze znajduje się uczestnik, który został dodany na etapie optymalizacji – „Menedżer BIM”.

Zdaniem autora optymalizację sieci przy zastosowaniu algorytmu algorytm Louvaina można uznać za udaną. Takie grupowanie może być wykorzystywane przez kierownictwo przedsięwzięcia do analizy rzeczywistej sieci komunikacyjnej i podejmowania decyzji zarządczych.

7.4. DYSKUSJA I WNIOSKI

Specyfiką realizacji przedsięwzięcia budowlanego jest to, że zmiany i ulepszenia są prawie zawsze nieuniknione. Warto założyć, że efektywna komunikacja pomiędzy uczestnikami przedsięwzięcia pozwoli na skrócenie czasu przestojów, zminimalizowanie ilości wykonanych przeróbek, poprawę jakości produktu końcowego oraz obniżenie kosztów. Wiedza o pozycji uczestników w sieci pozwala lepiej zrozumieć ich znaczenie, a także analizować wszelkie odchylenia od ustalonych ról.

Zaproponowane podejście, które obejmuje etapy zbierania danych, obliczania miar centralności, grupowania i optymalizacji sieci komunikacyjnej, może być stosowane na każdym etapie realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Zaleca się kilkukrotne przeanalizowanie sieci komunikacyjnej, począwszy od początkowych etapów realizacji przedsięwzięcia. Kierownictwo przedsięwzięcia musi szczegółowo przeanalizować sytuację (niskie wartości centralności węzła, gdy te miary powinny być wysokie; wysokie wartości centralności węzła, gdy te miary powinny być niskie; wysokie/niskie obciążenie komunikacji; obecność w pewnym klastrze węzła, który nie powinien się tam znajdować) przy identyfikowaniu różnego rodzaju dysfunkcji i odchyleń.

Ponadto w trakcie badań przeprowadzonych w analizowanym przykładzie zidentyfikowano uczestników sieci o największym obciążeniu komunikacyjnym. Obciążenie komunikacyjne jest ściśle związane z ilością aktów komunikacyjnych.

Oznacza to, że gdy komunikator otrzymuje więcej treści komunikacyjnych, niż może opracować, doświadcza przeciążenia komunikacyjnego [16].

Przeciążenie komunikacyjne może stanowić prawdziwy problem, ponieważ ma wpływ na osobę i całą organizację, prowadząc do takich niepożądanych konsekwencji jak:

- spadek zdolności intelektualnych, a w efekcie pogorszenie się zdolności do podejmowania decyzji,
- spadek adekwatności percepcji napływających informacji, co osłabia zdolność myślenia i ogranicza kreatywność,
- dezorientacja w przepływie informacji, gdy jedno dane nakładają się na inne, a osoba nie ma pojęcia, gdzie szukać potrzebnych informacji,
- dotkliwy brak czasu.

Wszystkie te konsekwencje mogą prowadzić do utraty sygnałów informacyjnych, pojawienia się błędów i spadku wydajności.

Podsumowując, zaproponowana metoda może być wykorzystana przez kierownictwo przedsięwzięcia do analizy rzeczywistej sieci komunikacyjnej i podejmowania odpowiednich decyzji zarządczych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abbsaian-Hosseini S.A., Liu M., Hsiang S.M. (2019), *Social network analysis for construction crews*, International Journal of Construction Management, 19(2), 113–127.
- [2] Baykasoglu A., Dereli T., Das S. (2007), *Project Team Selection Using Fuzzy Optimization Approach*, Cybernetics and Systems, 38(2), 155–185.
- [3] Blondel V.D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E. (2008), *Fast Unfolding of Communities in Large Networks*, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 10, P10008.
- [4] Chinowsky P., Songer A. (eds) (2011), *Organization management in construction*, Spon Press.
- [5] Girvan M., Newman M.E. (2001), *Community Structure in Social and Biological Networks*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 99, 8271–8276.
- [6] Hossain L. (2009), *Communications and coordination in construction projects*, Construction Management and Economics, 27(1), 25–39.
- [7] Kapogiannis G., Sherratt F. (2018), *Impact of integrated collaborative technologies to form a collaborative culture in construction projects*, Built Environment Project and Asset Management, 8(1), 24–38.

- [8] Kennedy D.M., McComb S.A., Vozdolska R.R. (2011), *An investigation of project complexity's influence on team communication using Monte Carlo simulation*, Journal of Engineering and Technology Management, 28(3), 109–127.
- [9] Lee N., Rojas E.M. (2013), *Visual representations for monitoring project performance: Developing novel prototypes for improved communication*, Journal of Construction Engineering and Management, 139(8), 994–1005.
- [10] Loosemore M. (1998), *Social network analysis: Using a quantitative tool within an interpretative context to explore the management of construction crises*, Engineering, Construction and Architectural Management, 5(4), 315–326.
- [11] Lu W., Xu J., Söderlund J. (2020), *Exploring the Effects of Building Information Modeling on Projects: Longitudinal Social Network Analysis*, Journal of Construction Engineering and Management, 146(5), 04020037.
- [12] Martin H., Lewis T.M., Fifi J. (2014), *Centralized versus decentralized construction project structure – Easing communication difficulties*, International Journal of Construction Management, 14(3), 156–170.
- [13] Men L.R., Stacks D. (2014), *The effects of authentic leadership on strategic internal communication and employee-organization relationships*, Journal of Public Relations Research, 26(4), 301–324.
- [14] Pryke S., Badi S., Almadhoob H., Soundararaj B., Addyman S. (2018), *Self-Organizing Networks in Complex Infrastructure Projects*, Project Management Journal, 49(2), 18–41.
- [15] Radziszewska-Zielina E., Śladowski G., Kania E., Sroka B., Szewczyk B. (2019), *Managing Information Flow in Self-Organising Networks of Communication Between Construction Project Participants*, Archives of Civil Engineering, 65(2), 133–148.
- [16] Scott C.R. (ed.) (2017), *The international encyclopedia of organizational communication*, Wiley-Blackwell.
- [17] Śladowski G., Radziszewska-Zielina E., Kania E. (2019), *Analysis of Self-Organising Networks of Communication Between the Participants of a Housing Complex Construction Project*, Archives of Civil Engineering, 65(1), 181–195.
- [18] Trach R., Lendo-Siwicka M. (2021), *Centrality of a communication network of construction project participants and implications for improved project communication*, Civil Engineering and Environmental Systems, 38(02), 145–160.
- [19] Trach R., Lendo-Siwicka M., Pawluk K., Bilous N. (2019), *Assessment of the effect of integration realisation in construction projects*, Tehnički Glasnik, 13(3), 254–259.
- [20] Trach R., Pawluk K., Lendo-Siwicka M. (2020), *The assessment of the effect of BIM and IPD on construction projects in Ukraine*, International Journal of Construction Management, 22(10), 1844–1851.

- [21] Trach R., Polonski M., Hrytsiuk P. (2019), *Modelling of Efficiency Evaluation of Traditional Project Delivery Methods and Integrated Project Delivery (IPD)*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 471, 112043.
- [22] Trach R., Połonski M., Hrytsiuk P. (2021), *Decision making in choosing a network organizational structure in integrated construction projects*, Archives of Civil Engineering, LXVII(2), 195–208.

8. ELASTYCZNOŚĆ W ZARZĄDZANIU PRZEDSIĘWZIĘCIAMI BUDOWLANymi W DYNAMICZNIE ZMIENNYM OTOCZENIU NA PRZYKŁADZIE INWESTYCJI INFRASTRUKTURALNYCH

Maria Kośmiej¹, Jerzy Paślawski²

8.1. WSTĘP

Stosowanie elastyczności w zarządzaniu w budownictwie wynika przede wszystkim z konieczności działania w turbulentnie zmiennym otoczeniu. Elastyczność daje możliwość przygotowania do koniecznej – ale trudnej do przewidzenia – zmiany dotychczasowego stanu systemu w odpowiedzi na zmieniające się wymagania użytkownika.

Podstawowym mankamentem tradycyjnego podejścia w zarządzaniu przedsięwzięciem inwestycyjno-budowlanym jest działanie na podstawie jednej wielkości (często średniej) oraz jednoetapowy proces podejmowania decyzji inwestycyjnych, co przy długim cyklu życia obiektu budowlanego oraz konieczności działania w turbulentnie zmiennym otoczeniu generuje ryzyko strat, których możliwość ograniczenia (lub wyeliminowania) zapewnia omawiane tutaj podejście elastyczne.

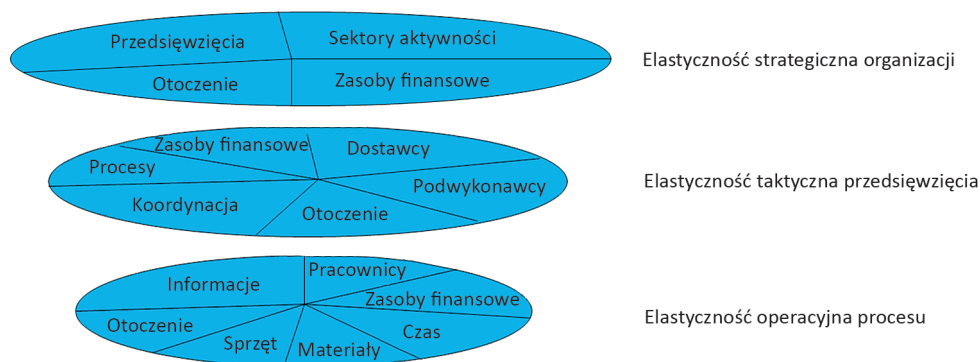
Wprowadzenie elastyczności może być rozważane na różnych poziomach: strategicznym (np. polityki przedsiębiorstwa), taktycznym (dostosowanie do zmiennych wymagań interesariuszy w cyklu życia przedsięwzięcia) i operacyjnym (dostosowanie opcji zarządzania procesem budowlanym do zmieniającego się otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego). W omawianym przypadku chodzi o dostosowanie do zmiennych wymagań interesariuszy przedsięwzięcia budowlanego w cyklu jego życia (rys. 8.1).

W niniejszym rozdziale omawiane będzie zastosowanie elastyczności przy projektowaniu i realizacji przedsięwzięć infrastrukturalnych. Jest to istotne w sytuacji, gdy otoczenie charakteryzuje się wysoką zmiennością, dużą dynamiką i niepewnością. Często rozpatrywany problem ilustruje się jako zjawisko białego słonia

¹ Politechnika Poznańska, e-mail: maria.kosmiej¹@put.poznan.pl.

² Politechnika Poznańska, e-mail: jerzy.paslowski²@put.poznan.pl.

(ang. *white elephant*). Biały słoń jest to określenie czegoś, co jest bardzo drogie już w momencie zakupu lub którego utrzymanie w dobrym stanie jest bardzo kosztowne, jednak nie ma ono żadnego użytecznego celu i nie jest już potrzebne [6]. Typowymi przykładami występowania problemu białego słonia są obiekty sportowe związane z organizacją igrzysk olimpijskich, np. w Rio de Janeiro, Soczi itp. [9]. Okazało się, że stadion Maracana w Rio de Janeiro, zbudowany na Mistrzostwa Świata w Piłce Nożnej w latach 1948–1950, wymaga ze względu na koszty utrzymania co najmniej 30 000 osób płacących za bilety, tymczasem średnia frekwencja wynosi 3600 widzów [4]. Zbyt duże koszty utrzymania obiektu piłkarskiego przerosły możliwości finansowe właściciela.



Rys. 8.1. Elastyczność na trzech podstawowych poziomach zarządzania

Nowatorskie spojrzenie na kompleksową ocenę tego typu inwestycji (na podstawie przykładów stadionów piłkarskich związanych z organizowanymi w Polsce w 2012 roku Mistrzostwami Europy w Piłce Nożnej) zaprezentował Zawadzki [41], który uwzględnił także odbiór społeczny takich inwestycji, gdzie rozważana była budowa/rozbudowa stadionów (Gdańsk, Poznań, Warszawa, Wrocław), badając skłonność mieszkańców do dobrowolnego poddania się jednorazowemu opodatkowaniu na rzecz budowy stadionu.

Należy zaznaczyć, że problem przeinwestowania obiektów sportowych jest już powszechnie dyskutowany, a wielu wydarzeniom sportowym towarzyszy refleksja o zmianie sposobu planowania. Istotne znaczenie ma właściwe zaplanowanie inwestycji w cyklu życia, które umożliwi dostosowanie do zmiennych wymagań użytkowników. W przypadku infrastruktury transportowej najbardziej oczywiste jest założenie o wzroście zdolności systemu – opcja rozszerzenia (*expand*), np. poszerzenie autostrady o kolejny pas ruchu przy wzroście natężenia ruchu. W przypadku obiektów sportowych natomiast możliwe jest zastosowanie opcji redukcji (*reduce*) lub przełączenia (*switch*). Przykładem takiego postępowania są np. zmiany wielkości lub funkcji obiektów sportowych po zrealizowanych igrzyskach olimpijskich [12]. Przykładowo, w przypadku stadionu olimpijskiego w Londynie założono możliwość

zmniejszenia liczby widzów z 80 000 do 25 000 dzięki odpowiednio zaprojektowanej konstrukcji, umożliwiającej łatwy demontaż trybun. Ponadto należy podkreślić, że również obiekty sportowe przyszłych igrzysk olimpijskich w Paryżu w 2024 roku projektowane są z uwzględnieniem elastyczności. Wioska olimpijska powstanie w dzielnicy Saint-Denis, a powstałe obiekty będą później wykorzystane do jej rewitalizacji [24].

Początek XXI wieku uznać można za moment przełomowy ze względu na przejście ze stabilnego otoczenia lat 70. XX wieku do zmian związanych z przemianami zapoczątkowanymi w 1989 roku, przez ataki wirusa milenijnego w 2000 roku, a następnie rok 2001 (atak w USA z dnia 11 września) oraz późniejsze załamanie rynku nieruchomości (2008). Do tego momentu określenie Black Swan oznaczało zaskakujące zjawisko, które było trudne do przewidzenia, ale jednocześnie występowało wyjątkowo rzadko [36]. Jednak pojawiające się ostatnio zjawiska, jak pandemia COVID-19, konflikt militarny w Ukrainie i postępujące zauważalnie szybko zmiany klimatyczne, wskazują wyraźnie na konieczność zmiany dotychczasowego podejścia do zarządzania. Tradycyjnie przyjmowane możliwości planowania na podstawie umiejętnego przewidywania i działania opartego na trafnej prognozie muszą być uzupełnione o uwzględnienie zmian (które należy monitorować) i bazujące na elastyczności przygotowanie na nie [21]. Należy zauważyć, że idea elastyczności w zarządzaniu jest znana od wielu lat, jednak dopiero na przełomie XX i XXI wieku znalazła uzasadnienie dla częstego zastosowania w warunkach, kiedy trudno jest określić jeden pewny scenariusz rozwoju sytuacji – trzeba być przygotowanym na różne scenariusze i dlatego należy uwzględnić elastyczność. Z pojęciem elastyczności wiąże się angielski termin *agile*, często tłumaczony właśnie jako ‘elastyczność’ lub ‘zwinność’ (w polskim wydaniu książki Cobba [7] z 2012 roku [8] terminy te traktuje się jako synonimy). Agile Management wskazane zostało w 2011 roku przez Levitta jako element nowego podejścia w zarządzaniu Construction Management 2.0, jednak oba podejścia: tradycyjne (oparte na planowaniu i kontroli) i elastyczne (oparte na monitorowaniu zmian i dostosowaniu – dzięki odporności lub adaptacyjności – jako dwóch składowych elastyczności), tworzą podstawy do osiągnięcia synergii na bazie odpowiednio dopasowanych parytetów ich wprowadzenia. W omawianym przypadku budowy obiektów infrastrukturalnych należy wziąć pod uwagę master plan, opracowany przede wszystkim w sposób tradycyjny (np. planujemy budowę odcinka autostrady POZNAN-BY-PASS A2, zakładając stopniowy przyrost natężenia ruchu). Zgodnie z podejściem elastycznym należy opracować projekt inwestycji uwzględniający różne możliwe scenariusze, zakładając uruchomienie odpowiednich opcji elastyczności, np. rozbudowę o kolejne pasy ruchu (*expand*), uwzględnione w projekcie już w początkowym stadium realizacji (gdzie wiadukty i mosty uwzględniają taką możliwość).

Elastyczność w projektach obiektów infrastrukturalnych oznacza zatem możliwość (ale nie konieczność) rozbudowy, jednak moment jej wprowadzenia jest rela-

tywnie odległy w czasie i nie jest możliwe jego dokładne przewidzenie na początkowym etapie. Znamionnym przykładem takiego podejścia jest most na rzece Tag w Lizbonie, który został wybudowany w latach 60. XX wieku z możliwością dalszej rozbudowy (w latach 90. XX wieku wprowadzono drugi poziom z opcją kolei regionalnej) (rys. 8.2).



Rys. 8.2. Most 28 kwietnia na rzece Tag na przedmieściach Lizbony

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie korzyści wynikających z zastosowania podejścia elastycznego w projektowaniu obiektów infrastrukturalnych, które z założenia w długim cyklu życia będzie wymagało adaptacji do zmieniających się wymagań użytkowników. Po niniejszym wstępie zaprezentowano historię rozwoju podejścia elastycznego w zarządzaniu, wskazując różnice pomiędzy podejściem tradycyjnym i elastycznym. Następnie przedstawiono metodę FLEXICON (FLEXibility In CONstruction), która powstała na bazie synergii pomiędzy symulacją NPV i opcjami realnymi. Na zaprezentowanych przykładach zrealizowanych inwestycji (parking typu Park&Ride, odcinek drogi S5 oraz obwodnica autostradowa Poznania – POZNAN-BY PASS A2) zilustrowano korzyści z zastosowania podejścia elastycznego w przypadku obiektów infrastruktury drogowej. W podsumowaniu zawarto wnioski ogólne i szczegółowe oraz perspektywy dalszych badań.

8.2. ANALIZA LITERATURY

Omawiając źródła podejścia elastycznego w zarządzaniu, należy przede wszystkim wskazać na pierwsze ujęcie pojęcia elastyczności, które datuje się zwykle na lata 1930/1940, kiedy ekonomiści poświęcili swoje prace zagadnieniu sprawdzenia wpływu zmienności cykli gospodarczych na rozwój przedsiębiorstwa [17, 35]. Kolejnym kluczowym krokiem na drodze rozwoju elastyczności w zarządzaniu w budownictwie jest niewątpliwie prawo niezbędnej różnorodności, opracowane przez Ashby'ego [3]. W myśl tego prawa organizacja musi charakteryzować się co najmniej taką różnorodnością jak otoczenie, w którym działa. Oznacza to, że w praktyce należy wprowadzić wiele opcji zwiększających elastyczność, aby być przygotowanym na mogące nastąpić zmiany. Duże znaczenie z punktu widzenia zastosowania elastyczności miały prace Blacka i Scholtlesa [5] oraz Mertona [22], które stworzyły teoretyczne podstawy teorii opcji.

Następnym istotnym osiągnięciem było opracowanie koncepcji elastyczności organizacyjnej [1] – chodziło o możliwość działania w nieprzewidywalnym otoczeniu przez dywersyfikację w dziedzinie przyjętych opcji produkt – rynek, a w przypadku ofensywnego działania – w kierunku obszarów gwarantujących większą efektywność. Jeżeli chodzi o elastyczność wewnętrzną, to Ackoff traktuje ją jako stały element działalności biznesowej [1]. Jej rolą jest amortyzacja niekorzystnych zjawisk, zwłaszcza przez zwiększenie płynności finansowej. Jak słusznie zauważył Eppink [11], podejście Ackoffa opiera się przede wszystkim na elastyczności pasywnej. Eppink uwzględnił w swojej koncepcji obie możliwości: pasywną i aktywną. Ta pierwsza związana jest głównie ze zmianami nieprzewidywalnymi, podczas gdy druga, oparta na adaptacji, umożliwia przede wszystkim dostosowanie do zmian możliwych do przewidzenia. Ważne jest uwzględnienie możliwości istnienia pewnych obszarów wspólnych dla obu koncepcji.

Kolejną grupą naukowców pracujących nad wdrożeniem idei elastyczności byli teoretycy decyzji, którzy opracowali podstawy działania elastycznego opartego na kilku etapach podejmowania decyzji [20]. Dalsze badania w tym zakresie dotyczyły elastycznych systemów produkcyjnych [42]. Kluczowe opracowanie dotyczące elastyczności organizacji opublikował Volberda [38]. W 2009 roku Paślawski opracował metodę FLEMANCO, służącą do wprowadzenia elastyczności w zarządzaniu procesami budowlanymi. W 2011 roku powstała monografia de Neufville'a i Scholtlesa na temat elastyczności w projektowaniu inżynierskim.

Z praktycznego punktu widzenia podejście elastyczne jest dość ugruntowane jako typowe w różnych dziedzinach, np. w dziedzinie technologii budowy satelitów – czas życia takiego obiektu oraz koszty umieszczenia na orbicie uzasadniają przewidywanie możliwości jego rozbudowy, np. z uwzględnieniem opcji dotyczących transmisji danych [13]. Innym przykładem zastosowania podejścia elastycz-

nego jest energetyka, ponieważ współpraca systemów OZE wymaga odpowiedniej elastyczności [34, 37].

Aktualne tendencje w dziedzinie wprowadzania elastyczności w zarządzaniu w budownictwie obejmują:

- prace nad wprowadzeniem elastyczności w fazie projektowania (np. etapowanie inwestycji),
- prace zmierzające do elastyczności w zakresie procesów budowlanych, które realizowane są przede wszystkim przy zastosowaniu Agile Management (często w powiązaniu z Lean Management).

Wydaje się, że włączenie elastyczności do zarządzania w budownictwie wynika przede wszystkim z konieczności zmiany tradycyjnego podejścia w przypadku realizacji procesów/przedsięwzięcia w turbulentnie zmiennym otoczeniu na Agile Management (zarządzanie zwinne), które bazuje na elastyczności oraz częstej aktualizacji sytuacji decyzyjnej. Umiejętne połączenie podejścia tradycyjnego (np. do budowy master planu) i podejścia elastycznego (w ramach agile management) w powiązaniu z Lean Construction wydaje się rozwiązaniem, które jest w stanie zapewnić efektywne zarządzanie przedsięwzięciem budowlanym, realizowanym w warunkach dynamicznie zmiennego otoczenia.

Istotnym elementem podejścia elastycznego jest zastosowanie budownictwa modułowego [27], gdzie zunifikowane elementy modułowe ułatwiają wprowadzenie podejścia elastycznego, np. w przypadku budowy dworców kolejowych.

W tabeli 8.1 przedstawiono porównanie tradycyjnego podejścia w planowaniu obiektów infrastruktury z podejściem elastycznym.

Tabela 8.1

Porównanie tradycyjnego podejścia z podejściem opartym na elastyczności

Elementy	Tradycyjne podejście	Elastyczne podejście
Etapowanie	Jednoetapowe	Więcej niż jeden etap
Prognozowanie wymagań	Wartość średnia	Scenariusze
Przepływ informacji	Hierarchiczny przepływ informacji	Wolny przepływ informacji – powszechny dostęp
Elastyczność i podejmowanie decyzji	Planowanie i przewidywanie	Elastyczność i aktualizacja sytuacji decyzyjnej
Komunikacja	Formalne metody – pisemne	Priorytet do bezpośrednich kontaktów
Wymagania	Zgodnie z planem	Satysfakcja klienta
Styl zarządzania	Wydawanie poleceń	Współpraca i przywództwo

Jak widać, podejście elastyczne wymaga nie tylko zasadniczych zmian w zakresie nowego podejścia do zarządzania, ale także zmian w kulturze organizacji. Ponadto w zakresie tej przemiany niezbędnym elementem jest wykorzystanie

metod ICT (*Information and Communication Technologies*), które umożliwiają częstą aktualizację sytuacji decyzyjnej. Pomimo olbrzymiego potencjału rozwojowego technologii IT [14], wciąż pozostaje ona wykorzystana w niewielkim stopniu, np. ze względu na niedoinwestowanie właściwe dla sektora budownictwa, który bazuje na małych i średnich przedsiębiorstwach. Prezentowaną w kolejnym podrozdziale metodę FLEXICON, która bazuje na modelowaniu z wykorzystaniem IT, zaliczyć można do innowacyjnych kierunków w dziedzinie zarządzania w budownictwie [33].

Każdy proces inwestycyjny realizowany jest w warunkach ryzyka i niepewności. Możemy jednak minimalizować ryzyko porażki inwestycji przez jej etapowanie. Odpowiedzią na zagrożenie zjawiskiem białego słonia jest podejście elastyczne. Opiera się ono przede wszystkim na akceptacji ryzyka/niepewności oraz opracowaniu strategii jego ograniczenia, bazującej na opcji elastyczności (zgodnie z prawem Ashby'ego). Analiza sytuacji decyzyjnej przy zastosowaniu podejścia elastycznego opiera się nie na jednej wartości czy ich przedziale, ale na wygenerowanych symulacyjnie wynikach (np. rozkładach NPV), przy uwzględnieniu analizy w długim okresie życia obiektu, i jest przeprowadzana dla różnych warunków zewnętrznych (scenariuszy). Naturalnie trudno jest wyeliminować całkowicie ryzyko – przyjęte scenariusze i dane przyjęte w modelu przepływów finansowych opierają się na informacjach obarczonych ryzykiem, jednak przyjęte opcje elastyczności umożliwiają podjęcie odpowiednich działań w odpowiedzi na zmiany w cyklu życia.

8.3. METODA FLEXICON

Metoda FLEXICON, której ostateczną wersję przedstawiono w 2022 roku [15], dedykowana jest projektowaniu i eksploatacji obiektów budowlanych oraz urządzeń infrastruktury, umożliwiających przemieszczanie się osób, transport towarów, informacji czy energii. Dodatkowo obiekty te powinny zapobiegać powstaniu i rozprzestrzenieniu się negatywnych skutków działalności człowieka na środowisko.

Sama istota infrastruktury określa jej szczególną rolę w rozwoju społecznym kraju i jego regionów jako podstawę tego rozwoju [29]. Bardzo istotna jest problematyka przepustowości i obciążenia ruchem, ponieważ prawidłowo działający system infrastrukturalny, przynoszący korzyści nie tylko materialne, stanowi gwarantujące rozwój dobro publiczne. Rola infrastruktury jako czynnika rozwoju jest zgodna z teorią wielkiego pchnięcia (*big push*), która oznacza, że odpowiednia alokacja zasobów sprzyja zapoczątkowaniu rozwoju, a następnie stymuluje jego samopobudzenie [31].

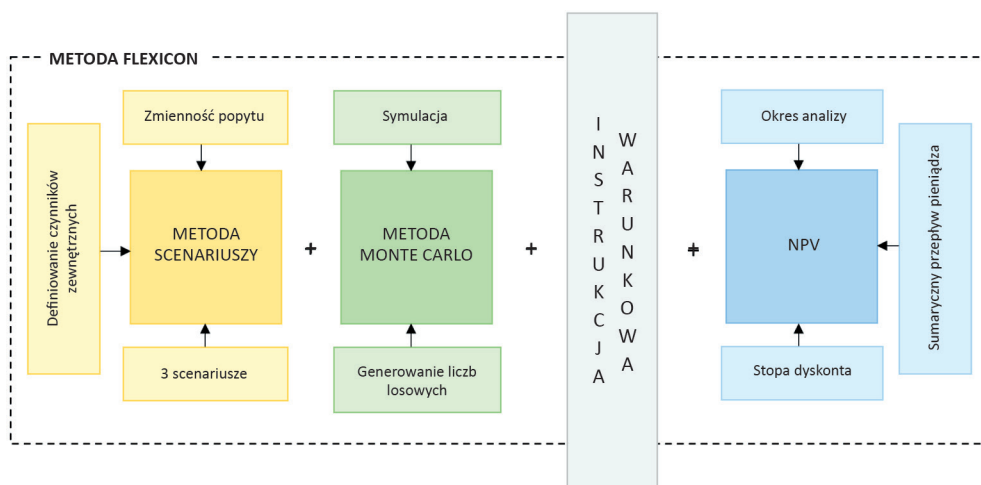
Obecnie jednakże coraz częściej dostrzega się problemy spowodowane niedostosowaniem przestarzałej infrastruktury do aktualnych potrzeb. Obiekty infrastrukturalne charakteryzują się długim okresem cyklu życia, niejednokrotnie

przekraczającym 100 lat [40]. Tak długi czas eksploatacji obiektów infrastruktury wymusza konieczność przewidywania jej rozwoju oraz możliwości jak najszybszego zaspokojenia przyszłych potrzeb, ponieważ błędy na etapach jej planowania i projektowania będą odczuwalne i mogą być bardzo kosztowne w przyszłości. Infrastruktura powinna zatem stopniowo dostosowywać się do wzrastającego zapotrzebowania (przy założeniu powszechnie dominującej opcji elastyczności – opcji *expand*). Metoda FLEXICON opiera się na analizach obejmujących pełen cykl życia i – ze względu na bardzo długie okresy analiz – uwzględnia jednocześnie zmienną wartość pieniądza w czasie.

W praktyce inżynierskiej przy realizacji przedsięwzięć infrastrukturalnych stosuje się często zwiększenie budżetu inwestycji o tzw. rezerwę, np. w wysokości od 30 do 50% [28] oszacowanych pierwotnie nakładów, która ma zabezpieczyć inwestycję przed ryzykiem ich niedoszacowania. Tymczasem, zgodnie z wytycznymi Banku Światowego i innych organizacji (np. UNIDO), szacowanie strumieni nakładów, kosztów i przychodów powinno być wykonane z większą dokładnością [16]. Poza sformalizowanymi metodami oceny ryzyka, które są źródłem wielu istotnych informacji wspomagających proces decyzji inwestycyjnych [21], warto uwzględnić w planowaniu inwestycji podejście elastyczne.

Metoda FLEXICON wykorzystuje algorytm postępowania przedstawiony na rys. 8.4. Żeby ukazać różnice w obu podejściach (tradycyjnym i elastycznym), wszystkie badania zostały opracowane na podstawie dwóch modeli:

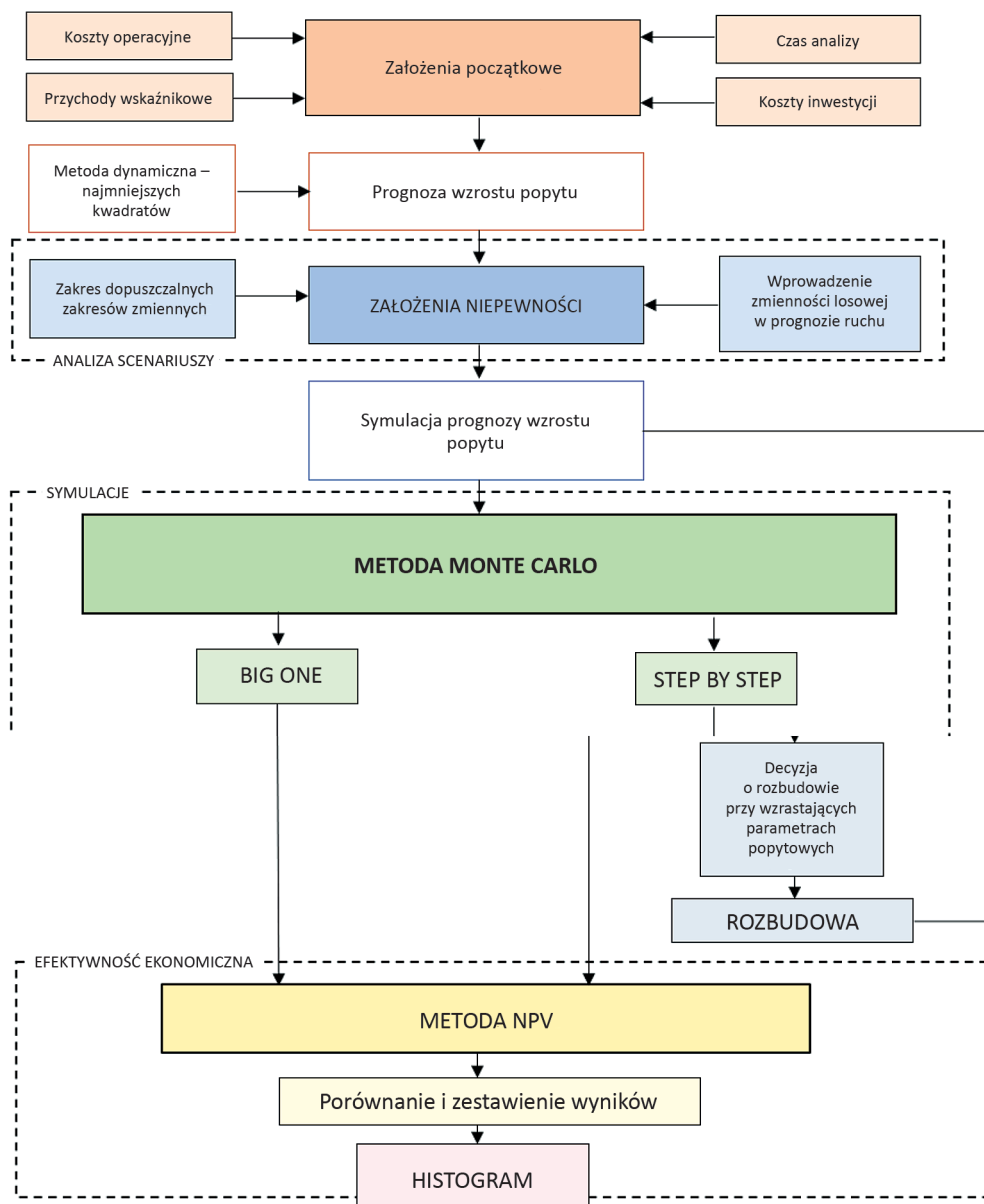
- a) **tradycyjnego** – realizacja całego obiektu od razu, bez możliwości rozbudowy; od samego początku są ponoszone również koszty utrzymania dla całego obiektu,



Rys. 8.3. Metoda FLEXICON bazująca na metodach: scenariuszy, symulacji i NPV.

Źródło: oprac. własne

- b) **elastycznego** – budowa etapowa, dostosowana do potrzeb otoczenia, z możliwością rozbudowy/przebudowy po określonym czasie w trakcie użytkowania; koszty utrzymania rozłożone są w czasie i wzrastają wraz z rozbudową.



Rys. 8.4. Algorytm metody FLEXICON. Źródło: oprac. własne

Idea metody FLEXICON opiera się na synergii trzech metod (rys. 8.3):

1. *metody wartości bieżącej netto* (NPV), która umożliwia ocenę efektywności ekonomicznej przedsięwzięcia z uwzględnieniem zdyskontowanych przepływów finansowych,
2. *metody scenariuszy*, która umożliwia analizę z uwzględnieniem zmienności rozkładu parametru wyjściowego (np. obciążenie ruchem), a co za tym idzie umożliwia uwzględnienie zmienności efektywności inwestycji w zależności od zmian warunków zewnętrznych,
3. *metody symulacji Monte Carlo*, umożliwiającej szacowanie wartości NPV z uwzględnieniem np. opcji expand (instrukcja warunkowa).

Zaletą metody FLEXICON jest zastosowanie instrukcji warunkowej typu IF/THEN, która podczas symulacji wzrastającego popytu uwzględnia moment, w którym wystąpi konieczność rozbudowy przedsięwzięcia w przypadku zastosowania opcji *step by step*.

Kolejność działań, jaką przyjmuje się podczas analiz w metodzie FLEXICON, jest następująca:

1. Ustalenie kosztów budowy obiektów – na podstawie umów bądź oszacowania – dla obu wariantów (tradycyjnego i elastycznego) w analizowanych przykładach.
2. Ustalenie kosztów utrzymania obiektów w założonym czasie eksploatacji na podstawie własnych doświadczeń lub opracowań.
3. Wybór głównego czynnika niepewności w systemie.
4. Wygenerowanie dla tego wybranego czynnika scenariuszy zmian w cyklu życia wraz z ustaleniem prawdopodobieństwa zmian jego wartości (scenariusze: optymistyczny, najbardziej prawdopodobny i pesymistyczny).
5. Określenie w sposób symulacyjny wartości NPV dla poszczególnych wariantów (tradycyjnego i elastycznego) dla określonego scenariusza.
6. Zestawienie wyników dla obu wariantów (tradycyjnego i elastycznego) dla wszystkich trzech scenariuszy (optymistycznego, najbardziej prawdopodobnego, pesymistycznego) – histogramy itp.

Szczegółowy algorytm działania metody FLEXICON przedstawiono na rys. 8.4.

8.4. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA ELASTYCZNOŚCI W PRZEDSIĘWZIĘCIACH INFRASTRUKTURALNYCH

8.4.1. PARKING TYPU Park&Ride

Parkingi typu Park&Ride zlokalizowane są w dużych miastach w pobliżu peryferyjnych przystanków transportu publicznego, w dzielnicach podmiejskich aglomeracji albo na zewnętrznych obrzeżach centrum miasta. Mają one na celu zmniejszenie

liczby samochodów w centrum miast przez umożliwienie pozostawienia pojazdu w wyznaczonym miejscu i przesiadkę jego kierowcy na komunikację zbiorową (lub inny środek transportu, np. rower) i kontynuowanie w ten sposób dalszej podróży [26].

Prezentowany przypadek projektowania infrastruktury dotyczy parkingu buforowego w Poznaniu, przy węźle przesiadkowym obejmującym terminal szybkiego tramwaju wraz z dworcem autobusowym. Bliskość linii kolejowej oraz sąsiedztwo trzech centrów handlowych uzasadnia oczekiwany systematyczny wzrost liczby osób korzystających z przedmiotowego parkingu Park&Ride.

W celu wykazania korzyści z zastosowania elastyczności przygotowano dwa warianty inwestycji: A i B. Poniżej przedstawiono podstawowe dane do obliczeń.

- a) WARIANT A (BIG ONE) – budowa parkingu na 900 miejsc postojowych jednorazowo, niezależnie od kształtowania się popytu.
- b) WARIANT B (STEP BY STEP) – budowa parkingu na 300 miejsc postojowych w pierwszym etapie, z opcją rozbudowy w następnych latach o kolejne moduły o pojemności 300 miejsc parkingowych w zależności od popytu (do 1200 miejsc docelowo).
- c) Cenę miesięcznego abonamentu parkingowego dla obu opcji przyjęto na poziomie 150 zł, a koszty utrzymania jednego miejsca to 15 zł miesięcznie.
- d) Całkowity koszt budowy został przyjęty w przeliczeniu na jedno miejsce postojowe w wysokości 3625,00 zł.
- e) Stopa dyskonta – 10% dla obu opcji.
- f) Każdy scenariusz został poddany analizie na podstawie 2000 przebiegów symulacyjnych.

Podstawowe założenia dotyczące zmian popytu dla trzech scenariuszy przedstawiono w tabeli 8.2.

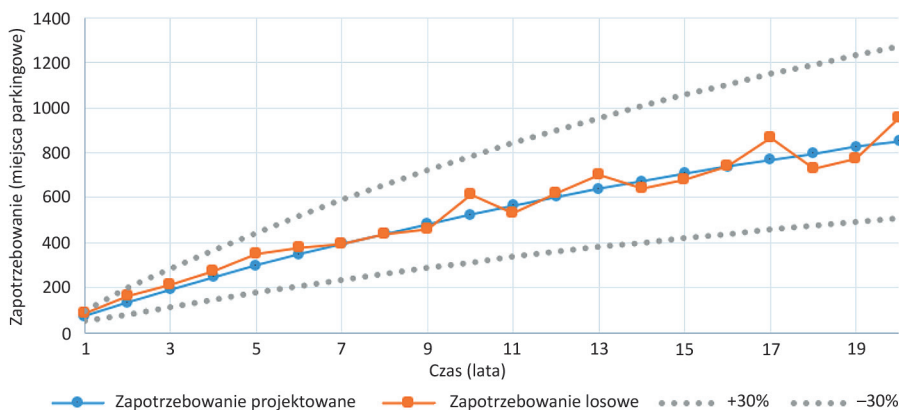
Tabela 8.2

Podstawowe założenia scenariuszy popytu na miejsca parkingowe

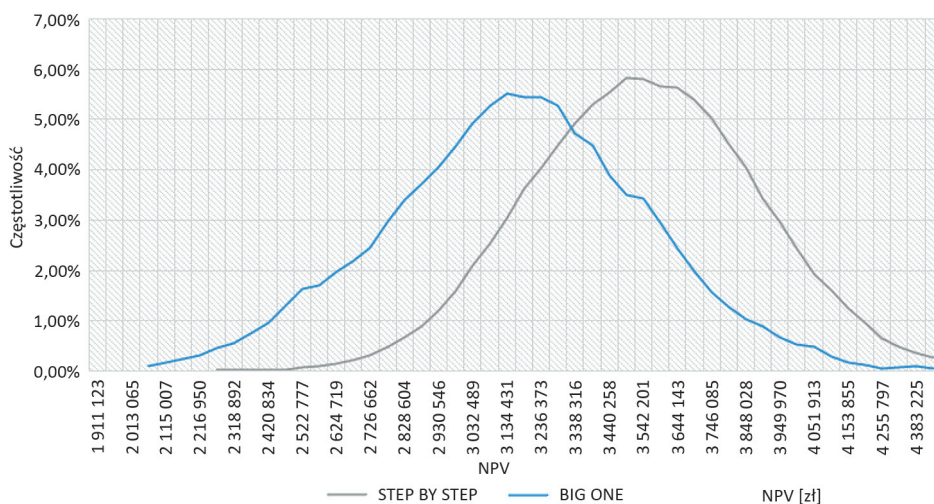
Scenariusz	Projekcja zapotrzebowania [miejsc parkingowych/rok eksploatacji]								
	1	3	5	7	10	13	15	17	20
Optymistyczny	150	191	298	395	600	639	707	768	1200
Pesymistyczny	30	104	207	239	300	412	463	510	600
Najbardziej prawdopodobny	75	191	298	395	450	639	707	768	900

Źródło: oprac. własne

Rysunek 8.5 przedstawia przykładowy wynik symulacji zapotrzebowania na miejsca postojowe dla scenariusza najbardziej prawdopodobnego, natomiast rys. 8.6 ukazuje rozkład prawdopodobieństwa przyjmowanych wartości NPV dla obu wariantów (*big one* i *step by step*).



Rys. 8.5. Zapotrzebowanie popytowe dla scenariusza najbardziej prawdopodobnego.
Źródło: oprac. własne



Rys. 8.6. Rozkład częstości występowania wartości NPV dla scenariusza najbardziej prawdopodobnego. Źródło: oprac. własne

8.4.2. DROGA EKSPRESOWA S5 – ODCINEK – OBWODNICA M. SZUBIN

Analiza dotyczyła budowy obwodnicy Szubina (miasto w województwie kujawsko-pomorskim) w ciągu drogi krajowej nr 5 Bydgoszcz – Poznań od km 64 + 100 do km 69 + 835. Łączne koszty tej budowy wyniosły w przybliżeniu 52,5 miliona złotych (2019).

Prace obejmowały m.in.:

- wykonanie obiektów inżynierskich (takich jak węzły i wiadukty) w poszerzonym świetle (przygotowanie na dobudowę dodatkowego drugiego pasa ruchu w każdym kierunku),

- b) przygotowanie podbudowy w miejscu dodatkowych, późniejszych pasów ruchu.

Obwodnica miasta Szubina była ważnym elementem modernizacji drogi krajowej nr 5, którą aktualnie przekształcono w drogę ekspresową S5. Droga ta łączy ze sobą duże polskie aglomeracje miejskie: gdańską, bydgosko-toruńską, poznańską i wrocławską. Prace przy budowie drogi ekspresowej na tym odcinku zakończyły się pod koniec 2019 roku.

Projekt inwestycyjny obwodnicy obejmował budowę: 5,7 km odcinka obwodnicy, 10,7 km dróg dojazdowych i serwisowych oraz siedmiu obiektów inżynierskich, przebudowę uzbrojenia podziemnego i nadziemnego oraz uregulowania urządzeń melioracyjnych.

Z racji przewidywanego dynamicznego rozwoju aglomeracji bydgoskiej na tym odcinku drogi należy spodziewać się wzrastającej liczby użytkowników. W celu zilustrowania korzyści z zastosowania elastyczności przygotowano dwa warianty inwestycji: A i B. Poniżej przedstawiono podstawowe dane do obliczeń.

- a) WARIANT A (BIG ONE) – budowa drogi z dwoma pasami ruchu, niezależnie od kształtowania się popytu czy etapu realizacji drogi ekspresowej S5 Bydgoszcz – Poznań.
- b) WARIANT B (STEP BY STEP) – budowa drogi z jednym pasem ruchu w pierwszym etapie realizacji oraz opcją rozbudowy w następnych latach o pas ruchu – projekt zrealizowany. Czas rozbudowy założono w momencie, gdy ŚDR (średni dobowy ruch) przekroczy 14 tys. samochodów na dobę.
- c) Całkowity koszt budowy został oszacowany na podstawie bazy cenowej Sekocenbud [32] oraz wymiarów pasa ruchu drogi ekspresowej, który wynosił odpowiednio 7,25 m dla drogi z jednym pasem ruchu w każdym kierunku i 13,25 m z dwoma pasami ruchu w obu kierunkach.
- d) Koszty eksploatacji, utrzymania oraz remontu dróg zostały oszacowane na podstawie raportu [25] na temat wykonywania przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad zadań związanych z utrzymaniem i remontami dróg. Wyniosły one 110 tys. zł za km/rok dla drogi ekspresowej z dwoma pasami ruchu w każdym kierunku, natomiast dla drogi krajowej z jednym pasem ruchu – 60 tys. zł za km/rok.
- e) Przychodów dla tej inwestycji nie założono, ponieważ droga ta jest finansowana ze środków publicznych.
- f) Stopa dyskonta – 10% dla obu opcji.
- g) Każdy scenariusz został poddany analizie na podstawie 2000 przebiegów symulacyjnych.

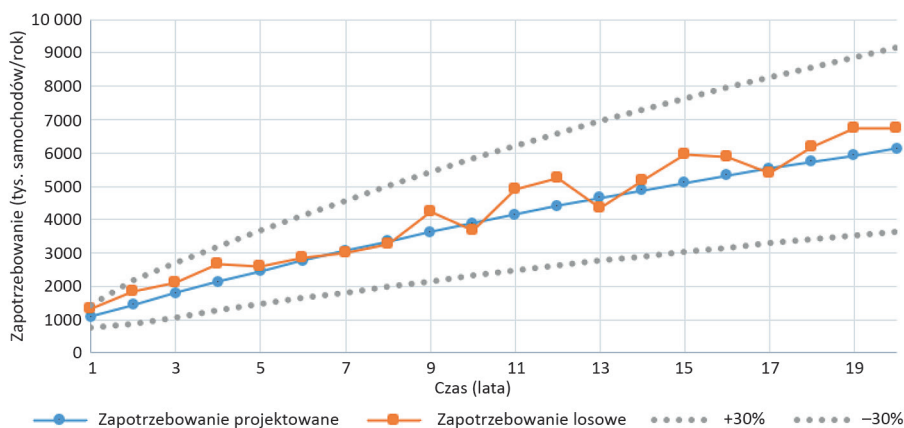
Opracowano trzy scenariusze dotyczące możliwości zmian średniego dobowego natężenia ruchu. Ich podstawowe założenia zestawiono w tabeli 8.3.

Tabela 8.3

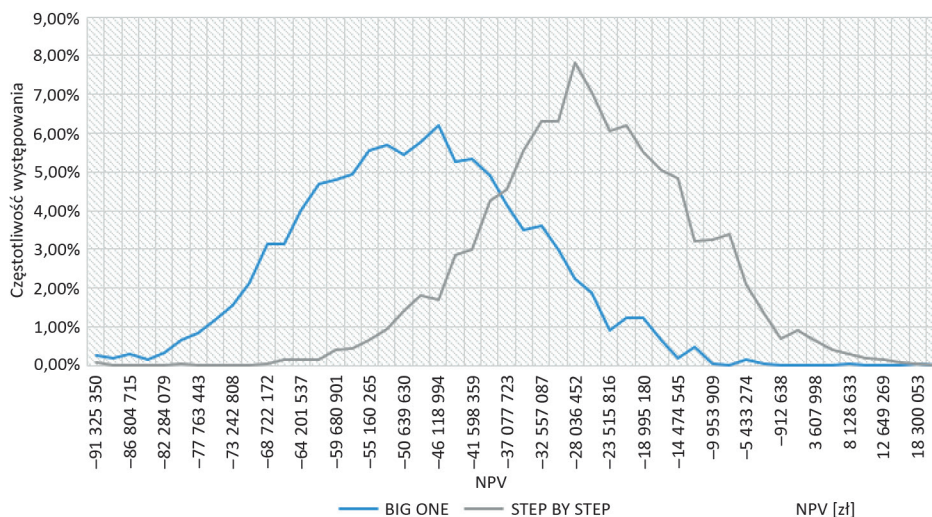
Podstawowe założenia scenariuszy obciążenia ruchem – obwodnica m. Szubina

Scenariusz	Projekcja obciążenia ruchem [tys. samochodów/dobę dla danego roku eksploatacji]								
	1	3	5	7	10	13	15	17	20
Optymistyczny	10	12,8	15,3	17,8	20	24,4	26,9	28,2	30
Pesymistyczny	3	4,6	6,3	7,8	11	11,8	12,9	14	17
Najbardziej prawdopodobny	6	7,9	9,7	11,4	15	16	17,3	18,6	20

Źródło: oprac. własne



Rys. 8.7. Zapotrzebowanie popytowe dla scenariusza pesymistycznego. Źródło: oprac. własne



Rys. 8.8. Histogram rozkładu częstotliwości występowania wartości NPV dla scenariusza pesymistycznego. Źródło: oprac. własne

Powyższe scenariusze oparto na podstawie wyników generalnego pomiaru ruchu, opracowanych przez Heller Consult na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (3–10 tys. samochodów na dobę w zależności od lokalizacji miejsca pomiaru ruchu).

Rysunki 8.7 i 8.8 przedstawiają wyniki uzyskane z wykorzystaniem metody FLEXICON dla scenariusza pesymistycznego. Wykresy zostały wybrane losowo, aby przedstawić wyniki w sposób graficzny.

8.4.3. POZNAŃ BY-PASS A2 AUTOSTRADOWA OBWODNICA M. POZNANIA

Kolejny analizowany przypadek dotyczył metody projektowania i etapowej rozbudowy 13-kilometrowego odcinka południowej obwodnicy autostradowej Poznania POZNAŃ BY-PASS A2.

Na etapie planowania – ponad 20 lat temu (oddanie do eksploatacji w 2002 roku) – projekt docelowy dotyczył obwodnicy trzypasowej, jednakże ze względu na niskie natężenie ruchu (ok. 6000 pojazdów na dobę) zdecydowano, że powstanie jezdnia dwupasowa z możliwością rozbudowy. Tymczasem w wyniku zaprzestania budowy trzeciej ramy komunikacyjnej w Poznaniu oraz przyłączeniu do A2 dróg ekspresowych S5 i S11 ruch na obwodnicy autostradowej wzrósł bardzo dynamicznie. Rozbudowę rozpoczęto 1 marca 2019 roku, a prace nawierzchniowe zakończono w grudniu 2019 roku. Polegały one na dobudowie kolejnego pasa w każdym kierunku, a dodatkowo na modernizacji nawierzchni, aby była ona przystosowana do zwiększonego natężenia ruchu. Ponadto wymieniono bariery ochronne i oświetlenie oraz rozbudowano sieć ekranów akustycznych wzdłuż całej trasy. Aktualnie obwodnicą przejeżdża dziennie ok. 65 tys. pojazdów.

W analizowanym przykładzie również przygotowano dwa warianty inwestycji: A i B. Poniżej przedstawiono podstawowe dane do obliczeń.

- a) WARIANT A (BIG ONE) – budowa drogi z trzema pasami ruchu jednorazowo, niezależnie od kształtowania się natężenia ruchu.
- b) WARIANT B (STEP BY STEP) – budowa drogi z dwoma pasami ruchu w pierwszym etapie i opcją rozbudowy w następnych latach o kolejny pas ruchu w zależności od natężenia ruchu – projekt zrealizowany. Czas rozbudowy założono, gdy ŚDR (średni dobowy ruch) przekroczy 45 tys. samochodów/dobę.
- c) Całkowity koszt budowy został oszacowany na bazie cen Sekocenbud (I kwartał 2021) oraz wymiarów pasów ruchu na obwodnicy autostradowej, które wynosiły odpowiednio 16,25 m dla autostrady z dwoma pasami ruchu oraz 20 m dla autostrady z trzema pasami ruchu.
- d) Koszty eksploatacji oraz utrzymania dróg zostały założone na podstawie raportu NIK (2015) na temat wykonywania przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad zadań związanych z utrzymaniem i remontami dróg.

Wyniosły one przykładowo 210 tys. zł na km/rok na autostradzie z dwoma pasami ruchu w każdym kierunku.

- e) Przychody na tym odcinku założono na podstawie średniego kosztu opłaty autostradowej w Polsce (0,23 gr/km dla samochodu osobowego) i odpowiednio uśredniono dla całego ruchu autostradowego (77% ŚDR samochody osobowe, 13% ŚDR samochody dostawcze, 4% ŚDR samochody ciężarowe bez przyczepy, 5% ŚDR samochody ciężarowe z przyczepą oraz autobusy 1% ŚDR – przyjęto 0,31 gr na 1 km autostrady).
- f) Stopa dyskonta – 10% dla obu opcji.
- g) Każdy scenariusz został poddany analizie na podstawie 2000 przebiegów symulacji.

Podobnie jak w poprzednich dwóch przypadkach zostały przeanalizowane trzy scenariusze dotyczące możliwości zmian średniego dobowego natężenia ruchem, a ich podstawowe założenia przedstawiono w tabeli 8.4.

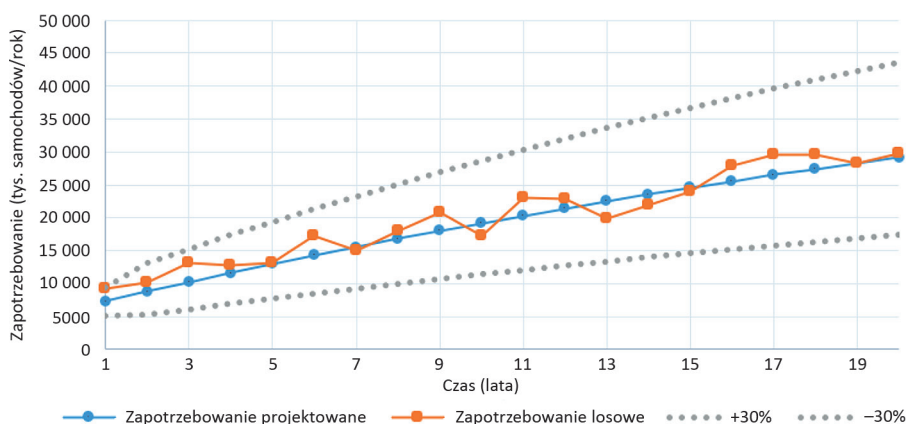
Tabela 8.4

Podstawowe założenia scenariuszy dla inwestycji POZNAŃ BY-PASS A2

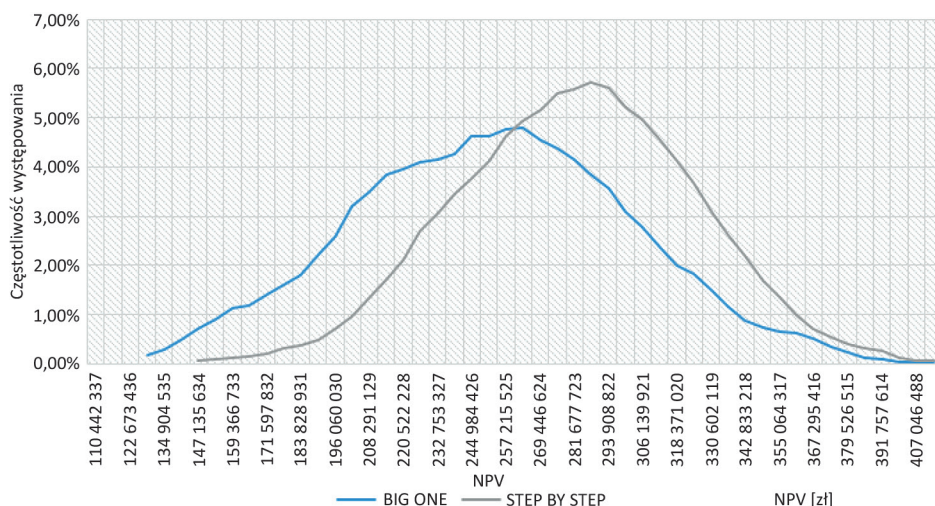
Scenariusz	Projekcja obciążenia ruchem [tys. samochodów na dobę/rok eksploatacji]								
	1	3	5	7	10	13	15	17	20
Optymistyczny	20	28	35,6	42,7	60	61,7	67,3	72,8	80
Pesymistyczny	8	10,2	12,3	14,3	15	19,6	21,4	23,8	30
Najbardziej prawdopodobny	15	18,3	21,5	24,4	25	32,7	35,3	37,7	50

Źródło: oprac. własne

Na rysunkach 8.9 i 8.10 przedstawiono wyniki analizy za pomocą metody FLEXICON dla scenariusza optymistycznego.



Rys. 8.9. Zapotrzebowanie popytowe dla scenariusza optymistycznego. Źródło: oprac. własne



Rys. 8.10. Histogram rozkładu częstotliwości występowania wartości NPV dla scenariusza optymistycznego. Źródło: oprac. własne

8.5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszym rozdziale podstawy teoretyczne, opis metody oraz przykłady pozwalają na wyciągnięcie poniższych wniosków.

Wnioski ogólne

1. Zastosowanie podejścia elastycznego jest uzasadnione w przypadku planowania i realizacji przedsięwzięć w dynamicznie zmiennym otoczeniu, np. przedsięwzięcia w dziedzinie infrastruktury transportowej czy sportowej.
2. Istotą podejścia elastycznego jest akceptacja ryzyka i przygotowanie na zmiany przez umożliwienie etapowania inwestycji. Omawiano dwie zasadnicze opcje: rozbudowy (*expand*) – typowa dla obiektów infrastruktury transportowej, i redukcji (*reduce*) – w przypadku obiektów infrastruktury sportowej, projektowanych na imprezy o znaczeniu kontynentalnym lub światowym (np. igrzyska olimpijskie).
3. Podejście elastyczne z powodzeniem stosowane jest w przypadku, gdy nie jest pewne powodzenie przedsięwzięcia realizowanego w całości w jednym etapie. Wynika ono z niepewności zachowania potencjalnych użytkowników, jak w przykładzie parkingu PARK&RIDE, lub z ponoszenia dużych kosztów inwestycyjnych oraz utrzymania obiektu w pełnej skali od początku (gdy natężenie ruchu jest relatywnie małe), a prognozowany wzrost zapotrzebowania uzasadnia rozbudowę za kilkadziesiąt lat, jak w przykładzie POZNAN BY-PASS A2.

Wnioski szczegółowe

1. Dla każdego zaprezentowanego przykładu wartości NPV wykazują przewagę opcji *step by step* (z uwzględnieniem elastyczności). Na wykresach (rys. 8.6, 8.8 i 8.10) wyraźnie można zauważyć przesunięcie w kierunku wyższych wartości NPV dla wariantu z uwzględnieniem elastyczności – *step by step* w stosunku do wariantu bez elastyczności – *big one*. Potwierdza to celowość zastosowania elastyczności, dzięki której następuje ograniczenie możliwości poniesienia strat i zwiększenie możliwości wykorzystania szans.
2. Do zalet proponowanej metody opartej na elastyczności zaliczyć należy także zwiększenie wartości maksymalnej NPV oraz ograniczenie zmienności NPV, widoczne zwłaszcza na rysunkach 8.8 i 8.10.
3. Przypadek POZNAN BY-PASS A2 wykazał w praktyce o wiele szybszy przyrost natężenia ruchu w stosunku do prognoz i pojawienie się konieczności niezbędnej rozbudowy. Pomimo prognoz ruchu tworzonych przez specjalistów, przewidujących osiągnięcie progu wskazującego na konieczność rozbudowy w 2048 roku, dynamiczne zmiany warunków (brak rozbudowy trzeciej ramy komunikacyjnej w Poznaniu oraz przyłączenie do przedmiotowego by-passa dróg ekspresowych S5 i S11) spowodowały, że rozbudowa nastąpiła w 2019 roku.

Perspektywy dalszych badań w dziedzinie elastyczności uwzględniać mogą przede wszystkim inne kryteria (np. środowiskowe, społeczne) podczas oceny przyjętych rozwiązań. Ponadto istotne wydaje się uwzględnienie możliwości zastosowania budownictwa modułowego w rozważaniach dotyczących stopniowej rozbudowy. Budownictwo modułowe jest istotnym elementem koncepcji elastycznego podejścia – umożliwia w fabrycznych warunkach wyprodukowanie modułów charakteryzujących się wysoką jakością oraz krótkim czasem instalacji na budowie. Koncepcja taka umożliwia dostosowanie się do zmiennych wymagań użytkowników – poza opcjami rozbudowy lub demontażu założyć można także modernizację umożliwiającą zmianę modułów (np. zmianę funkcji).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ackoff R.L. (1977), *Towards flexible organizations: A multidimensional design*, Omega, 5(6), 649–662.
- [2] Alm J., Solberg H.A., Storm R.K., Jakobsen T.G. (2016), *Hosting Major Sports Events: the Challenge of Taming White Elephants*, Leisure Studies, 35(5), 564–582.
- [3] Ashby W.R. (1956), *An Introduction to Cybernetics*, Chapman Hall, London, <http://dspace.utalca.cl/bitstream/1950/6344/2/IntroCyb.pdf>.

- [4] BBC (2015), *World Cup leaves Brazil with bus depots and empty stadiums*, <https://www.bbc.com/sport/football/32073525>.
- [5] Black F., Scholes M. (1973), *The pricing of options and corporate liabilities*, *Journal of Political Economy*, 81(3), 637–654.
- [6] *Cambridge Dictionary* (2023), *White elephant*, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/white-elephant>.
- [7] Cobb Ch.G. (2011), *Making Sense of Agile Project Management: Balancing Control and Agility*, John Wiley and Sons.
- [8] Cobb Ch.G. (2012), *Zrozumieć Agile Project Management. Równowaga kontroli i elastyczności*, APN Promise, Warszawa.
- [9] Davis J. (2020), *Avoiding white elephants? The planning and design of London's 2012 Olympic and Paralympic venues, 2002–2018*, *Planning Perspectives*, 35(5), 827–848.
- [10] Dvir D., Lechler T. (2004), *Plans are nothing, changing plans is everything: the impact of changes on project success*, *Research Policy*, 33(1), 1–15.
- [11] Eppink D.J. (1978), *Planning for strategic flexibility*, *Long Range Planning*, 11(4), 9–15.
- [12] IOC (2012), *Flexible and sustainable: London's Olympic Stadium sets new standards*, <https://olympics.com/ioc/news/flexible-and-sustainable-london-s-olympic-stadium-sets-new-standards>.
- [13] Kaneko K., Nishiyama H., Kato N., Miura A., Toyoshima M. (2018), *Construction of a flexibility analysis model for flexible high-throughput satellite communication systems with a digital channelizer*, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(3), 2097–2107.
- [14] Kapliński O. (2009), *Information technology in the development of the Polish construction industry*, *Technological and Economic Development of Economy*, 15(3), 437–452.
- [15] Kośmiejka M. (2022), *Elastyczne planowanie obiektów infrastruktury eksploatowanych w zmiennym otoczeniu*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań.
- [16] Kozubek P.R. (2012), *Efektywność inwestycji infrastrukturalnych w transporcie kolejowym. Analiza i ocena*, Monografie, Studia, Rozprawy, M34, Politechnika Świętokrzyska, Kielce.
- [17] Lange O. (1944), *Price flexibility and employment*, Monograph, 8, Principia Press, The University of Chicago, Chicago.
- [18] Levitt R.E. (2011), *Towards project management 2.0*, *Engineering Project Organization Journal*, 1(3), 197–210.
- [19] Majewski J. (2021), *Rola infrastruktury transportu jako jednego z czynników rozwoju regionalnego*, *Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG*, 24(3), 7–18.
- [20] Mandelbaum M. (1978), *Flexibility and decision making: an exploration and elaboration*, University of Toronto, Toronto.

- [21] Marcinek K. (2000), *Ryzyko projektów inwestycyjnych*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Ekonomicznej w Katowicach, Katowice.
- [22] Merton R. (1973), *Theory of Rational Option Pricing*, Bell Journal of Economics and Management Science, 4(1), 141–183.
- [23] Mintzberg H. (1994), *The rise and fall of strategic planning*, Pearson Education Limited, Warlow.
- [24] National Post (2017), *No more white elephants: Paris aims to avoid Olympic waste and excess for 2024 Games*, <https://nationalpost.com/sports/olympics/paris-aiming-to-make-olympic-games-desirable-again-by-2024>.
- [25] NIK (2015), *Wykonywanie przez Generalną Dyрекcyję Dróg Krajowych i Autostrad zadań związanych z utrzymaniem i remontami dróg – Informacja o wynikach kontroli*, Najwyższa Izba Kontroli, Łódź.
- [26] Paślowski J., Rudnicki T. (2021), *Agile/Flexible and Lean Management in Ready-Mix Concrete Delivery*, Archives of Civil Engineering, 67, 689–709.
- [27] Paślowski J., Włoch-Surówka K. (2023), *Budownictwo modułowe w dostosowaniu do zmiennych wymagań na przykładzie dworców kolejowych*, Materiały Budowlane, 1, 4–9.
- [28] Połowski M. (2014), *Budżetowanie przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem czasu i kosztów*, Budownictwo i Architektura, 13(4), 389–397.
- [29] Ratajczak M. (1999), *Infrastruktura w gospodarce rynkowej*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań.
- [30] Rius-Ulldemolins J. (2021), *Opera houses as cultural white elephants? The effect of the creative city model, bureaucratic mismanagement and lack of accountability in Valencia's opera house*, Cultural Trends, 30(3), 199–221.
- [31] Rosenstein-Rodan P.N. (1976), *The theory of the „Big Push”*, [in:] *Leading Issues in Economic Development*, G.M. Meier (ed.), Oxford University Press, New York.
- [32] Sekocenbud (2021), *Biuletyn Cen Obiektów Budowlanych (BCO), cz. II: Obiekty inżynieryjne*, Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych Budownictwa „Promocja” Sp. z o.o., Warszawa.
- [33] Sobotka A. (2017), *Innovative solutions in engineering of construction projects*, Procedia Engineering, 208, 160–165.
- [34] Sobotka A., Rowicki M., Badyda K., Sobotka P. (2021), *Regulatory aspects and electricity production analysis of an offshore wind farm in the Baltic Sea*, Renewable Energy, 170, 315–326.
- [35] Stigler G. (1939), *Production and distribution in the short run*, The Journal of Political Economy, 47(3), 305–327.
- [36] Taleb N.N. (2007), *The Black Swan: The Impact of the highly improbable*, 2nd ed., Penguin, London.
- [37] Ulbig A., Andersson G. (2015), *Analyzing operational flexibility of electric power systems*, Electrical Power and Energy Systems, 72, 155–164.

- [38] Volberda H.W. (1998), *Building a flexible firm. How to remain competitive*, Oxford University Press, Oxford.
- [39] Wade S., de Almeida F. (2017), *Scathing report: Rio Olympics left Brazil with 'white elephant' venues*, The Seattle Times, 23 maja.
- [40] Wojewódzka-Król K. (red.) (1999), *Rozwój infrastruktury transportu*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- [41] Zawadzki K.M. (2022), *Social perception of technological innovations at sports facilities: justification for financing 'white elephants' from public sources? The case of Euro 2012 Stadiums in Poland*, Innovation – The European Journal of Social Science Research, 35, 346–366.
- [42] Zelenovic D.M. (1982), *Flexibility: a condition for effective production systems*, International Journal of Production Research, 20, 319–337.

9. OCENA WPŁYWU WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA ZDARZENIA NIEBEZPIECZNE W BUDOWNICTWIE

Marcin Kowalik¹, Wojciech Drozd²

9.1. WSTĘP

Duża liczba wypadków w budownictwie sprawia, że problem bezpieczeństwa pracy w przedsiębiorstwach budowlanych ma wyjątkowo duże znaczenie, jest bardzo aktualny i wymaga nieustannej troski. Stan ten wskazuje, że mimo wielu publikacji podejmujących tematykę bezpieczeństwa pracy [2–4, 6, 9], nadal należy prowadzić badania i podejmować działania na rzecz skutecznego zapobiegania wypadkom. Rzeczywistość na terenach budów pod względem skali zaniedbań, czynników i zjawisk nieporządných, prowadzących do wypadków przy pracy, wskazuje na niski poziom wdrożenia systemów zarządzania BHP lub braki w jego stosowaniu. Objawia się to zaniedbaniami w dostępności stosownej, przewidzianej przepisami dokumentacji i instrukcji, a także szkoleń pracowników. Mając powyższe na uwadze, podjęto próbę zbadania faktycznego poziomu wdrożenia systemów zarządzania BHP w przedsiębiorstwach budowlanych działających na terenie Małopolski. W badaniach posłużono się protokołami powypadkowymi oraz protokołami z kontroli doraźnych, sporządzonymi przez Okręgowy Inspektorat Pracy w Krakowie w latach 2018–2020. Sformułowano problem badawczy, polegający na ocenie istotności czynników wpływających na liczbę wypadków.

Analizie poddano takie czynniki jak: poziom wdrożenia systemu zarządzania i dostępnej dokumentacji BHP wymaganej przepisami prawnymi, motywacja pracowników do przestrzegania przepisów BHP, rodzaj oddziaływania na pracownika w przedsiębiorstwie budowlanym w zakresie występujących zdarzeń niebezpiecznych oraz metody szkoleń pracowników. Podczas badań starano się przede wszystkim zwrócić uwagę na do tej pory pomijane lub marginalizowane czynniki występujące w protokołach, zarówno w formie lingwistycznej, jak i proceduralnej. Przeanalizowano często występujące w formie opisowej informacje dotyczące zaawansowania,

¹ Katedra Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, e-mail: marcin.kowalik@pk.edu.pl.

² Katedra Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, e-mail: wojciech.drozd@pk.edu.pl.

regularności i jakości szkoleń. Przy analizie dostępnej dokumentacji BHP i czynników motywujących pracowników zwrócono uwagę na przestrzeganie norm czasu pracy i dostępność dla pracowników środków ochrony indywidualnej.

W zakresie metodologicznym posłużono się klasyfikatorem statystycznym w postaci regresji logistycznej. Zaproponowana w artykule metoda i przedmiot badań są propozycją powiększenia zbioru wiedzy w zakresie rozwoju naukowych metod oceny bezpieczeństwa pracy na budowach oraz możliwości wykorzystania ich w praktyce.

9.2. DOKUMENTACJA Z ZAKRESU BHP W PRZEDSIĘBIORSTWIE BUDOWLANYM

Kompletna, uporządkowana dokumentacja BHP, wpisująca się w istniejący lub wdrażany system zarządzania bezpieczeństwem w przedsiębiorstwie budowlanym, stanowi podstawę, na której można budować strategię funkcjonalną³ firmy, a tym samym uzyskać przewagę na rynku przedsiębiorstw budowlanych. Ponadto prawidłowo skompletowaną i prowadzoną dokumentację BHP [16] na terenie budowy, jak i w całym przedsiębiorstwie budowlanym, należy posiadać nie tylko z uwagi na kontrole OIP, ale także dla dobra pracowników i własnego bezpieczeństwa. Do zadań inspekcji pracy należy przeprowadzanie kontroli po zaistnieniu wypadku. Odpowiednio sporządzone dokumenty, wymagane przepisami, stanowią jedno ze źródeł dowodowych w postępowaniu powypadkowym. Dla przedsiębiorstwa budowlanego należyćie prowadzona dokumentacja daje argumenty do obrony w przypadku zarzutów nieprzestrzegania wymagań i przepisów BHP.

Przyjęto podział dokumentacji BHP [5] w przedsiębiorstwie budowlanym i na terenie budowy na dokumentację związaną z:

- procesem (pracami) budowlanym [14],
- zatrudnieniem pracowników,
- eksploatacją maszyn i urządzeń technicznych [12].

Wymagania prawne ujęte w kodeksie pracy, rozporządzeniach i wytycznych definiują podstawowe dokumenty, jakie należy posiadać przy prowadzeniu działalności w przedsiębiorstwie budowlanym [11–13, 15, 17]. Są to m.in.:

- zawiadomienie do OIP,
- plan BIOZ (bezpieczeństwa i ochrony zdrowia):
 - organizacja ruchu na budowie,
 - instrukcja bezpiecznego wykonywania robót,

³ H. Mintzberg – Teoria struktur organizacyjnych (strategie funkcjonalne – czynności na poziomie jednostki operacyjnej).

- instrukcja BHP przy magazynowaniu i składowaniu materiałów oraz surowców,
- powołanie koordynatora BHP,
- wykaz prac szczególnie niebezpiecznych,
- wymagania BHP dla prac szczególnie niebezpiecznych,
- instrukcje BHP,
- ocena ryzyka zawodowego,
- dokumenty „geologiczne”.

Zważywszy na specyfikę i rodzaj prac prowadzonych na terenie budowy, różnorodność wznoszonych obiektów budowlanych, jak i miejsca ich lokalizacji, nie wszystkie z opisywanych dokumentów muszą znajdować się w miejscu realizacji konkretnej budowy.

9.3. STRUKTURA I PORZĄDKOWANIE DANYCH

Dane znajdujące się w protokołach powypadkowych oraz protokołach kontroli różnych, przeprowadzonych przez inspektoraty pracy, uporządkowano w sposób przedstawiony w tabelach 9.1–9.5.

Poszczególne tabele zawierają wykaz następujących danych i informacji:

Tabela 9.1 – dane związane bezpośrednio z prowadzoną działalnością budowlaną, dla danej inwestycji, w kontekście BHP.

Tabela 9.2 – dane występujące w formie opisowej, dotyczące zaawansowania, regularności i jakości szkoleń.

Tabela 9.3 – dane dotyczące nadzoru nad pracownikiem, zarówno w formie bezpośredniej (np. nadzór nad pracami niebezpiecznymi), jak i pośredniej (np. ewidencja czasu pracy).

Tabela 9.4 – informacje o formie zatrudnienia pracownika, jego identyfikacji z przedsiębiorstwem budowlanym, a także uzyskanymi uprawnieniami i kwalifikacjami. Dane przedstawiają również dbałość o takie aspekty pracy jak wyposażenie pracownika w czystą, sprawną i ergonomiczną odzież ochronną oraz dostęp do środków ochrony indywidualnej i sanitariatów.

Tabela 9.5 – dane obejmujące zagrożenia związane z poziomem wdrożenia systemu BHP oraz prawidłowości prowadzonej dokumentacji.

Zgromadzone dane zostały zaimportowane do programu Statistica [18], a następnie oczyszczone i przygotowane do analizy [10]. W skład działań, jakie wykonano, wchodzi:

- przekształcenie sześciu zmiennych binarnych, oznaczonych jako X11, w jedną zmienną jakościową,
- usunięcie przypadków, w których wystąpiły braki danych.

Tabela 9.1

Dane opisujące specyfikę budowy

Oznaczenie	Opis danych
X1	Liczba zatrudnionych
X2	Staż pracy poszkodowanych [lata]
X3	Rodzaj robót (1 – na wysokości, w wykopie; 0 – pozostałe)
X4	Stan mechanizacji robót (1 – roboty zmechanizowane; 0 – pozostałe)
X5	Źródło uwarunkowań stwierdzenia zaniedbań (technicznych/ludzkich)
X6	Środki ochrony indywidualnej (1 – dostępne, 0 – brak)
X7	Środki ochrony zbiorowej (1 – dostępne, 0 – brak)
X8	Balustrady ochronne na rusztowaniu (1 – dostępne, 0 – brak)
X9	Oslony i zabezpieczenia elementów niebezpiecznych maszyn i urządzeń (1 – dostępne, 0 – brak)
X10	Tolerowanie przez nadzór odstępstw od zasad BHP (1 – tolerowane, 0 – brak tolerancji)

Źródło: oprac. własne

Tabela 9.2

Metoda szkolenia pracowników

Oznaczenie	Opis danych
X11	Metoda szkolenia pracowników: • komplet dokumentów (brak zastrzeżeń), • dokładne instruowanie zapoznanie pracownika z istniejącą dokumentacją BHP (5 etapów szkolenia) oraz ocena wiadomości, • dokładne instruowanie zapoznanie pracownika z istniejącą dokumentacją BHP (5 etapów) oraz ocena wiadomości oraz sprawdzenie nabytej wiedzy, • dokładne instruowanie zapoznanie pracownika z istniejącą dokumentacją BHP (5 etapów) oraz ocena wiadomości oraz sprawdzenie nabytej wiedzy oraz zapoznanie pracownika z wymaganymi istniejącymi instrukcjami BHP, • tylko kurs podstawowy przewidziany przepisami (instruktaż stanowiskowy), • brak szkoleń pracowników.

Źródło: oprac. własne

Tabela 9.3

Rodzaj oddziaływania na pracownika

Oznaczenie	Opis danych
X12	Nadzór nad pracami niebezpiecznymi (1 – sprawowany, 0 – brak)
X13	Dziennik szkoleń BHP (1 – dostępny, 0 – brak)
X14	Ewidencja czasu pracy (np. operatora żurawia) (1 – dostępna, 0 – brak)
X15	Ryzyko zawodowe – oświadczenie pracownika o zapoznaniu się z wynikami oceny ryzyka zawodowego (1 – dostępne, 0 – brak)

Źródło: oprac. własne

Tabela 9.4

Motywacja pracowników

Oznaczenie	Opis danych
X16	Forma zatrudnienia pracownika – działalność gospodarcza
X17	Forma zatrudnienia pracownika – umowa o pracę na czas nieokreślony
X18	Forma zatrudnienia pracownika – umowa o pracę na czas określony
X19	Forma zatrudnienia pracownika – umowa zlecenie
X20	Uprawnienia i kwalifikacyjne do obsługi maszyn budowlanych i urządzeń poddozorowych (1 – posiadane, 0 – brak)
X21	Pomieszczenia higieniczno-sanitarne (1 – dostępne, 0 – brak)
X22	Orzeczenia lekarskie (1 – aktualne, 0 – brak)
X23	Wykaz i dokumentacji odzieży, obowią roboczego i środków ochrony indywidualnej w firmie (1 – dostępne, 0 – brak)
X24	Karty ewidencji dla pracownika dla odzieży, obowią roboczego i środków ochrony indywidualnej w firmie (1 – dostępne, 0 – brak)
X25	Zaświadczenia i certyfikaty szkoleń przy przyjęciu do pracy (1 – dostępne, 0 – brak)

Źródło: oprac. własne

Tabela 9.5

Poziom wdrożenia systemu BHP – dokumentacja

Oznaczenie	Opis danych
X26	Zawiadomienie do PIP (1 – dokonane, 0 – brak)
X27	Plan bezpieczeństwa i ochrony zdrowia (1 – dostępny, 0 – brak)
X28	Koordinator BHP (1 – powołany, 0 – brak)
X29	Wykaz prac szczególnie niebezpiecznych (1 – dostępny, 0 – brak)
X30	Instrukcje BHP (1 – dostępne, 0 – brak)
X31	Ocena ryzyka zawodowego (1 – dostępna, 0 – brak)
X32	Dokumentacja BHP związana z eksploatacją maszyn i urządzeń technicznych (1 – dostępna, 0 – brak)
X33	Dokumentacja techniczno-ruchowa (DTR) (1 – dostępna, 0 – brak)
X34	Dokumentacja z UDT (1 – dostępna, 0 – brak)

Źródło: oprac. własne

W rezultacie otrzymano zbiór danych, zawierający wartości 36 zmiennych oraz 425 przypadków:

- dwustanową zmienną zależną Y; NIE – brak wypadku, TAK – wystąpienie wypadku,
- trzystanową porządkową zmienną zależną Y3; S – wypadek śmiertelny, C – wypadek ciężki, L – wypadek lekki,

- ilościową zmienną zależną Y_1 ,
- dwie ilościowe zmienne niezależne (X_1 , X_2),
- trzydzieści jeden zmiennych jakościowych niezależnych (X_3 – X_{34}).

9.4. CHARAKTERYSTYKA PRÓBY

Zmienne ilościowe

Dla zmiennych ciągłych policzono standardowe statystyki opisowe [8]. Zostały one zebrane w tabeli 9.6.

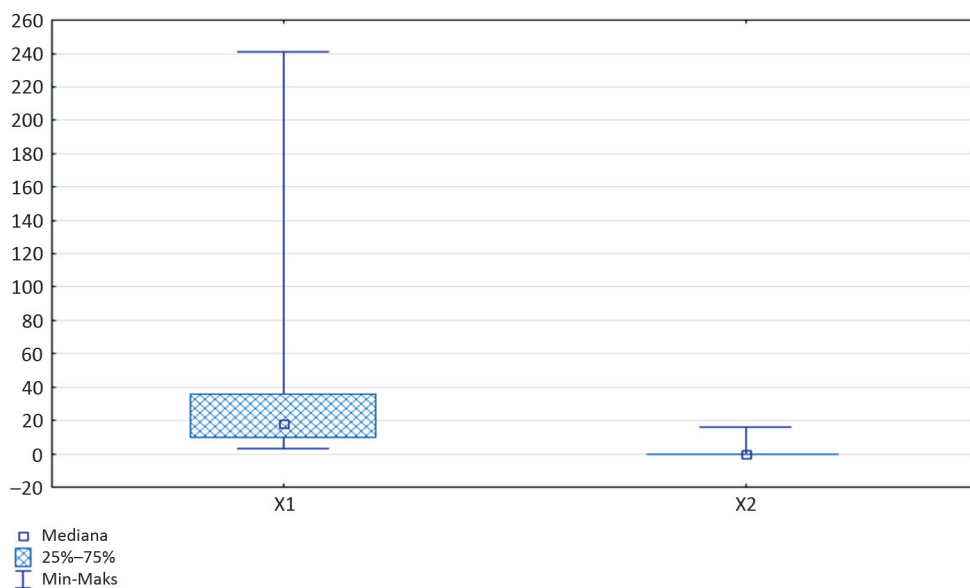
Tabela 9.6

Statystyki opisowe zmiennej X_1 i X_2

	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe
X_1	431	35,39	3,00	241,00	43,85
X_2	431	1,15	0,00	16,00	3,33

Źródło: oprac. własne

Dodatkowo rozkład wartości dla tych zmiennych przedstawiono na rys. 9.1.



Rys. 9.1. Wykres ramkowy zmiennych ilościowych: X_1 – liczba zatrudnionych i X_2 – staż pracy poszkodowanego. Źródło: oprac. własne

Zmienne jakościowe

Dla zmiennych jakościowych utworzono tabele licznosci. Możemy z nich odczytać, jak często wybrana zmienna przyjmowała daną wartość. Poniżej (tab. 9.7) zamieszczono przykładowe wyniki dla zmiennej X3, która przyjmuje wartość 1 dla robót na wysokości lub w wykopie i wartość 0 dla pozostałych robót.

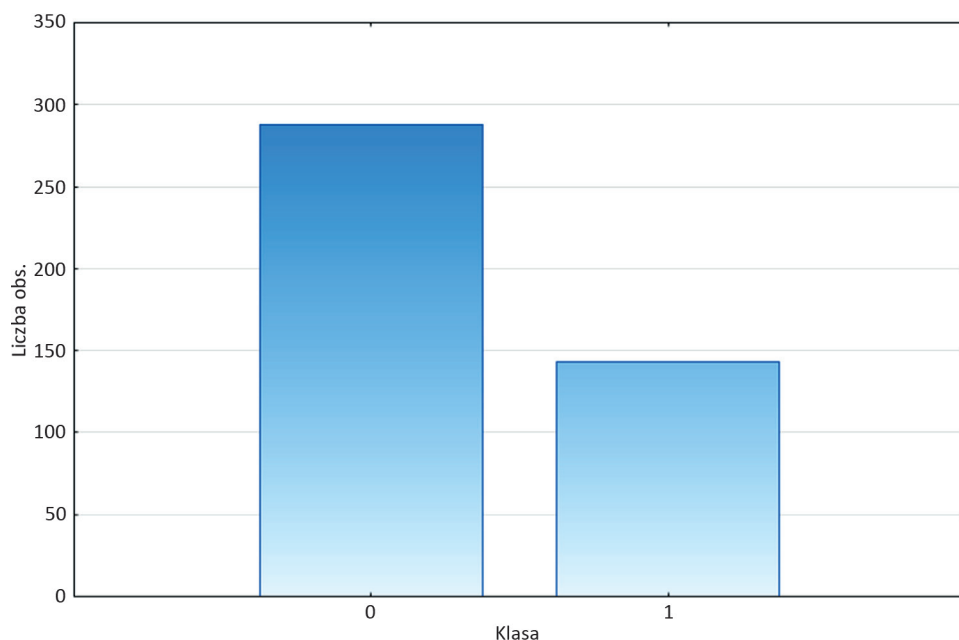
Tabela 9.7

Statystyki opisowe zmiennej X3 (rodzaj robót)

Wartość zmiennej	Liczba	Procent
0	288	66,82
1	143	33,18
Braki	0	0,00

Źródło: oprac. własne

Zbiór danych obejmował informacje o 143 robotach prowadzonych na wysokościach, co stanowiło 33,18% rozważanych przypadków. W 288 przypadkach prace prowadzone były w wykopie. Dla tej zmiennej nie wystąpiły braki danych. Opisane wyniki przedstawiono również za pomocą histogramu (rys. 9.3), dzięki któremu można szybko ocenić, która grupa była najliczniejsza [19].



Rys. 9.2. Histogram zmiennej X3 – rodzaj robót. Źródło: oprac. własne

9.5. MODEL REGRESJI LOGISTYCZNEJ

Do rozwiązania problemu badawczego została wykorzystana regresja logistyczna. W budowie wieloczynnikowego modelu regresji logistycznej [1] uwzględniono te zmienne niezależne, dla których stwierdzono istnienie statystycznie istotnego związku z wystąpieniem wypadku na wcześniejszym etapie prac. Jako wartość graniczną dla p-wartości przyjęto 0,1 dla statystyki punktowej i 0,33 dla statystyki Walda. W rezultacie rozważano następujące zmienne: X3, X5, X7, X8, X11–X14, X20–X25, X27–X28, X29, X33. Zbiór danych został podzielony na dwie części – tzw. zbiór uczący i zbiór testowy. Wykorzystanie podziału na zbiór uczący i zbiór testowy jest najczęściej używaną techniką budowy oraz weryfikacji modelu. Dzięki temu można uniknąć efektu przeuczenia (nadmiernego dopasowania do danych historycznych), a także sprawdzić zdolność modelu do generalizacji, a tym samym przydatność modelu w praktyce.

Aby zbudować model zawierający tylko i wyłącznie zmienne statystycznie istotne, posłużono się algorytmem krokowym [7]. Jest to metoda pozwalająca zawęzić zbiór zmiennych w modelu tylko do takich, dla których wykazano statystycznie istotny związek ze zmienną zależną. Wyniki przedstawiono w tabeli 9.8.

Tabela 9.8

Wyniki obliczeń uzyskane z zastosowaniem algorytmu krokowego

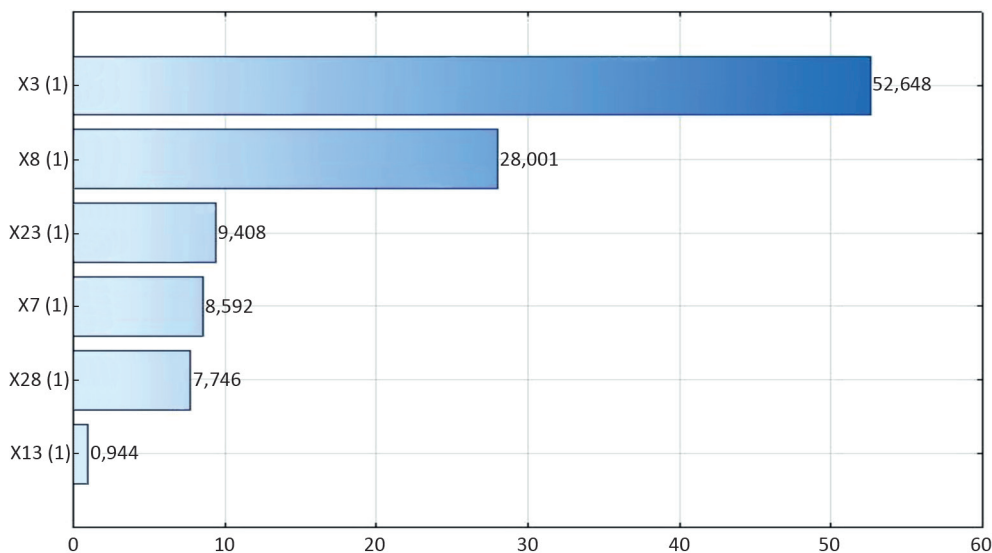
	Poziom	Ocena	GU dolna	GU górna	<i>p</i>
Wyraz wolny		–0,62	–1,71	0,48	0,27
X8	1	–2,88	–3,94	–1,81	< 0,001
X3	1	3,68	2,69	4,68	< 0,001
X23	1	–1,21	–1,98	–0,44	< 0,01
X28	1	1,35	0,40	2,31	0,01
X13	1	–0,41	–1,25	0,42	0,33
X7	1	1,10	0,36	1,83	0,00

Źródło: oprac. własne

Z powyższej tabeli odczytano postać funkcji logistycznej, określającej prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku:

$$\begin{aligned}
 \text{logit}(Y = \text{TAK}) &= -0,62 - 2,88 \times X8(1) + 3,68 \times X3(1) - 1,21 \times X23(1) \\
 &+ 1,35 \times X28(1) - 0,41 \times X13(1) + 1,10 \times X7(1)
 \end{aligned}
 \tag{9.1}$$

Zapis X8 (1) oznacza sytuację, kiedy zmienna X8 przyjmuje wartość 1 – w tym przypadku jest to obecność balustrad ochronnych; X3 (1) – praca na wysokości, X23 (1) – wykaz i dokumentacja odzieży, obuwia roboczego i środków ochrony indywidualnej w firmie, X7 (1) – zastosowanie środków ochrony zbiorowej, X28 (1) – koordynator BHP, X13 (1) – dziennik szkoleń BHP. Ważność tych zmiennych przedstawiono na rys. 9.3.



Rys 9.3. Wykres ważności predyktorów. Zmienna zależna: Wypadek. Źródło: oprac. własne

Podobnie jak wcześniej w celu łatwiejszej interpretacji współczynniki przeliczono na ilorazy szans (odwołania do poszczególnych wierszy/komórek zostały oznaczone kolorami) (tab. 9.9).

Tabela 9.9

Algorytm krokowy zawężający zbiór zmiennych

	Poziom	Iloraz szans (OR)	GU dolna	GU górna	<i>p</i>
X8	1	0,06	0,02	0,16	< 0,001
X3	1	39,81	14,72	107,68	< 0,001
X23	1	0,30	0,14	0,65	< 0,01
X28	1	3,87	1,49	10,05	0,01
X13	1	0,66	0,29	1,52	0,33
X7	1	3,00	1,44	6,25	0,00

Źródło: oprac. własne

Przykładowa interpretacja jest następująca: jeśli zmienna X23 przyjmuje wartość 1, to część liniowa modelu zmniejsza się o 1,21, a w konsekwencji iloraz szans wystąpienia wypadku maleje o czynnik 0,3 (odczytujemy to z kolumny „Iloraz szans” w tabeli 9.9). Oznacza to, że szansa na wystąpienie wypadku maleje o 70%.

Ocena dopasowania

W celu oceny przydatności modelu sprawdzono, jak dobrze oddziela on przypadki „dobre” od „złych”. Model jest tym lepszy, im bardziej wyniki obliczane dla sytuacji wypadkowych różnią się od tych, kiedy wypadek nie wystąpił. Jakość modelu można zbadać m.in. za pomocą opisanych miar i krzywych ROC (*Receiver Operating Characteristic*).

Miary jakości modeli dla dwustanowej zmiennej zależnej są wyznaczone na podstawie macierzy błędów (tab. 9.10). Jest ona zbudowana z dwóch wierszy i dwóch kolumn. Wiersze przedstawiają klasy przewidywane, a kolumny klasy rzeczywiste. W komórkach znajdują się wartości, które mówią o liczbie układów danego typu, przy porównaniu wartości rzeczywistych z tymi przewidywanymi przez model.

Tabela 9.10

Macierz błędów

		Klasa rzeczywista	
		Pozytywna	Negatywna
Klasa przewidywana	Pozytywna	TP	FP
	Negatywna	FN	TN

Źródło: oprac. własne

Symbole zamieszczone w tabeli 9.10 należy interpretować następująco:

TP (*True positive*) oznacza, ile razy model poprawnie przewidział wystąpienie zdarzenia (klasę pozytywną),

TN (*True negative*) oznacza, ile razy model poprawnie przewidział brak wystąpienia zdarzenia (klasę negatywną),

FP (*False positive*) oznacza, ile razy model niepoprawnie przewidział wystąpienie zdarzenia (klasę pozytywną),

FN (*False negative*) oznacza, ile razy model niepoprawnie przewidział brak wystąpienia zdarzenia (klasę negatywną).

Ocenę dopasowania modelu przedstawiono w tabeli 9.11, a wskazane tam wartości należy interpretować następująco:

Czułość (TPR)

Czułość informuje nas, jaki odsetek obiektów należących rzeczywiście do stanu wyróżnionego został poprawnie zaklasyfikowany przez model:

$$\text{Czułość} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9.2)$$

Specyficzność (TNR)

Specyficzność wskazuje, jaki odsetek obiektów należących rzeczywiście do stanu niewyróżnionego został poprawnie zaklasyfikowany przez model.

$$\text{Specyficzność} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (9.3)$$

Precyzja (PPV)

Precyzja określa, jaki odsetek obiektów zaklasyfikowanych przez model do stanu wyróżnionego rzeczywiście do niego należy.

$$\text{Precyzja} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (9.4)$$

Wartość predykcyjna ujemna (NPV)

Wartość predykcyjna ujemna wskazuje, jaki odsetek obiektów niezaklasyfikowanych przez model do stanu wyróżnionego rzeczywiście do niego nie należy.

$$\text{Wartość predykcyjna ujemna} = \frac{TN}{TN + FN} \quad (9.5)$$

Dokładność (ACC)

Dokładność mówi, jaka frakcja obiektów została zaklasyfikowana pozytywnie.

$$\text{Dokładność} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (9.6)$$

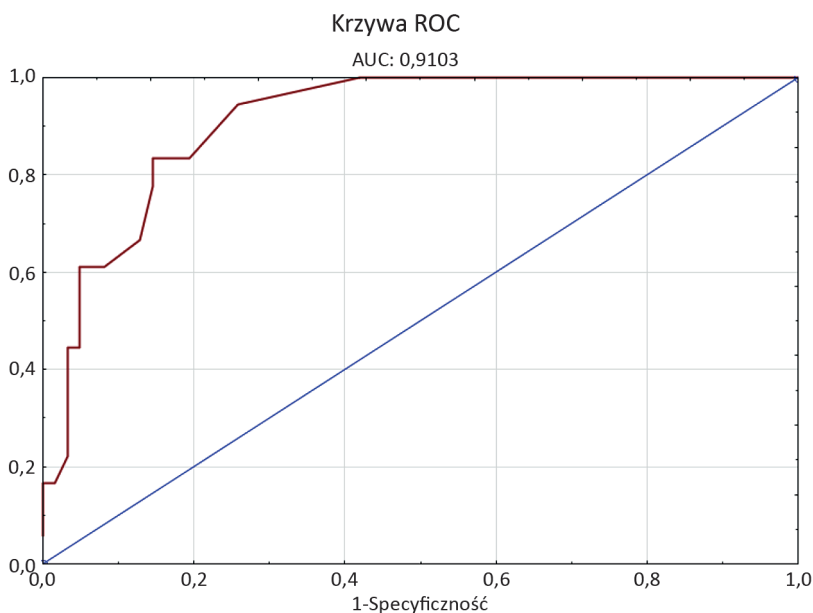
Tabela 9.11

Ocena dopasowania modelu

Miara	Zbiór uczący	Zbiór testowy
Czułość	0,52	0,61
Specyficzność	0,94	0,94
PPV	0,72	0,73
NPV	0,88	0,89
Dokładność	0,86	0,86

Źródło: oprac. własne

Z tabeli 9.11 wynika, że model w zbiorze testowym dokonał poprawnej klasyfikacji w 86% przypadków, w tym w 61% poprawnie przewidział wystąpienie wypadku, a jego brak w 94%. Wartości miar na zbiorze uczącym i testowym są do siebie zbliżone, co oznacza, że model nie jest przeuczony – nie doszło do nadmiernego dopasowania się do danych i przewidywania są wiarygodne. Wykres czułości i specyficzności dla dopasowanego modelu przedstawiono na rys. 9.4.



Rys. 9.4. Krzywa ROC dla wybranego modelu. Źródło: oprac. własne

Pole pod wykresem dla tej krzywej wynosi $AUC = 0,91$. Można powiedzieć, że prawdopodobieństwo, iż dla losowo wybranej sytuacji model poprawnie wskaże wyższe ryzyko wystąpienia wypadku, wynosi 91%.

Wynikiem przeprowadzonych analiz jest wskazanie istotnych czynników, mających bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo pracy. Ponadto należy zwrócić uwagę na wykazanie w niniejszym rozdziale czynników mogących posłużyć poprawie funkcjonalności systemu BHP w przedsiębiorstwie budowlanym, niezwiązanych bezpośrednio z miejscem wykonywania inwestycji budowlanej.

9.6. PODSUMOWANIE

Przedstawione w rozdziale badania umożliwiają ocenę związków między zdarzeniami niepożądanymi na terenie budowy (wypadek), a czynnikami związanymi bezpośrednio z zarządzaniem bezpieczeństwem pracy w przedsiębiorstwie budowlanym, takimi jak:

- motywacja pracownika – kryterium rozumiane jako czynniki, które charakteryzują formę zatrudnienia pracownika,
- koordynator BHP – kryterium rozumiane jako systemowe, zgodne z prawem rozwiązanie, podnoszące bezpieczeństwo pracy na terenie budowy,
- poziom wdrożenia systemu zarządzania BHP – kryterium rozumiane jako czynniki związane z prowadzeniem dokumentacji BHP, wykazem prac szczególnie niebezpiecznych czy dokumentacji techniczno-ruchowej (DTR),
- rodzaj oddziaływania na pracownika – kryterium rozumiane jako nadzór nad pracami niebezpiecznymi oraz istniejącym ryzykiem zawodowym.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, głównym czynnikiem, mającym wpływ na zaistnienie zdarzenia niebezpiecznego, jest rodzaj prowadzonych robót, a zwłaszcza czynności związanych z pracami w głębokim wykopie i na wysokości. Są to prace z mocy prawa objęte dodatkowymi szkoleniami dla pracowników, a osoby je wykonujące powinny posiadać odpowiednie uprawnienia i kwalifikacje. Kolejnym czynnikiem wypadkogennym jest stosowanie nieodpowiednich zabezpieczeń, np. w postaci balustrad ochronnych na rusztowaniach. Ważnym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo na terenie budowy jest stosowanie środków ochrony zbiorowej. Wymienione czynniki występują bezpośrednio na terenie budowy, są specyficzne dla konkretnej budowy oraz wynikają z występujących warunków techniczno-organizacyjnych danej inwestycji. Kształtowanie ich wartości na różnych placach budów został opisany m.in. w [2–4]. Przeprowadzona analiza danych z protokołów powypadkowych i kontroli doraźnych, przeprowadzonych w latach 2018–2020 przez Okręgowy Inspektorat Pracy w Krakowie, wykazała także wpływ czynników niezwiązanych bezpośrednio z terenem budowy, a występujących w systemach zarządzania bezpieczeństwem pracy w przedsiębiorstwie budowlanym. Czynniki te to:

- wykaz i dokumentacja odzieży, obuwia roboczego i środków ochrony indywidualnej w przedsiębiorstwie,
- zatrudnienie osoby na stanowisku koordynatora BHP,
- rzetelne prowadzenie dziennika szkoleń BHP.

Jednym z wyników modelu uzyskanym przy zastosowaniu regresji logistycznej jest prawdopodobieństwo przynależności poszczególnych obserwacji do modelowanej klasy: był lub nie było wypadku. Wartości tego prawdopodobieństwa można wykorzystać jako wsparcie procesu decyzyjnego w zarządzaniu bezpieczeństwem

pracy w przedsiębiorstwach budowlanych. Ponadto występowanie w analizie czynników niezwiązanych bezpośrednio z terenem budowy i wykazana ich istotność w zaproponowanym modelu regresji stanowią praktyczną wskazówkę przy organizacji i wdrażaniu systemu bezpieczeństwa, a szerzej – przy tworzeniu strategii funkcjonalnej. Zapewniając ciągły nadzór nad pracownikami, dostarczając pracownikom czystą, nieuszkodzoną, podlegającą cyklicznej wymianie odzież oraz środki ochrony indywidualnej oraz przeprowadzając regularne szkolenia, można uzyskać przewagę konkurencyjną przedsiębiorstwa budowlanego.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że potrzebne są jednak dalsze prace związane z kalibracją modelu. Przewiduje się zastosowanie metody scoringu, bazując na danych uzyskanych z Okręgowego Inspektoratu Pracy w Krakowie, dokonującego bezpośredniej kontroli. Pozwoli to na opracowanie modelu strategii funkcjonalnej o większej wiarygodności, uwzględniającego dane zawarte w protokołach powypadkowych oraz protokołach z kontroli doraźnych, wyrażone w postaci lingwistycznej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Breiman L., Friedman J., Stone C.J., Olshen R.A. (1984), *Classification and Regression Trees*, Wadsworth Statistics/Probability.
- [2] Drozd W., Kowalik M. (2018), *A study on the state of knowledge of managers of construction sites in the field of occupational safety – MATEC 2018*.
- [3] Drozd W., Kowalik M. (2020), *Regresja logistyczna jako narzędzie wspomagające badanie wypadkowości w polskim budownictwie*, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [4] Drozd W., Kowalik M. (2016), *Safety by design in the context of an active approach to construction*, Engineering of Construction Projects, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, Wrocław.
- [5] Dział X Bezpieczeństwo i higiena pracy ustawy z 26 czerwca 1974 r. – Kodeks pracy (tj. Dz.U. 2016, poz. 1666 ze zm.).
- [6] Hoła B. (2016), *Bezpieczeństwo pracy w procesach budowlanych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [7] Hosmer D.W., Lemeshow S. (2003), *Applied Logistic Regression*, 2nd ed., John Wiley & Sons.
- [8] Koronacki J., Mielniczuk J. (2001), *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [9] Obolewicz J. (2019), *Uregulowania prawne i praktyczne aspekty bezpieczeństwa i higieny pracy na budowie*, Acta Scientiarum Polonorum Architectura, 18(2), 61–68.

- [10] R Core Team (2016), *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing.
- [11] Rozporządzenie ministra gospodarki z 18 lipca 2001 r. w sprawie trybu sprawdzania kwalifikacji wymaganych przy obsłudze i konserwacji urządzeń technicznych (Dz.U. 2001, nr 79, poz. 849 ze zm.).
- [12] Rozporządzenie ministra gospodarki z 20 września 2001 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas eksploatacji maszyn i innych urządzeń technicznych do robót ziemnych, budowlanych i drogowych (Dz.U. 2001, nr 118, poz. 1263).
- [13] Rozporządzenie ministra gospodarki z 21 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla środków ochrony indywidualnej (Dz.U. 2005, nr 259, poz. 2173).
- [14] Rozporządzenie ministra infrastruktury z 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych (Dz.U. 2003, nr 47, poz. 401).
- [15] Rozporządzenie ministra pracy i polityki społecznej z 14 marca 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy ręcznych pracach transportowych (Dz.U. 2000, nr 26, poz. 313 ze zm.).
- [16] Rozporządzenie ministra pracy i polityki socjalnej z 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. 2003, nr 169, poz. 1650 ze zm.).
- [17] Rozporządzenie Rady Ministrów z 16 lipca 2002 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu (Dz.U. 2014, poz. 111 ze zm.).
- [18] StatSoft (2011), *Elektroniczny Podręcznik Statystyki*, <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>.
- [19] Witten I.H., Frank E. (2000), *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*, Morgan Kaufmann Publishers, Burlington.

10. MODELOWANIE ROZWOJU SYTUACJI WYPADKOWEJ W BUDOWNICTWIE

Mariusz Szóstak¹

10.1. WSTĘP

Z każdym rodzajem działalności ludzkiej związane jest ryzyko pojawienia się niebezpiecznych zdarzeń zagrażających życiu i zdrowiu człowieka. Niebezpieczne zdarzenia w skrajnych sytuacjach prowadzą do wypadków przy pracy, których skutkiem mogą być straty materialne, urazy o różnym stopniu ciężkości, a nawet śmierć pracownika.

Według Ustawy z dnia 30 października 2002 r. o ubezpieczeniu społecznym z tytułu wypadków przy pracy i chorób zawodowych [20] za wypadek przy pracy uważa się „nagle zdarzenie wywołane przyczyną zewnętrzną, powodujące uraz lub śmierć, które nastąpiło w związku z pracą, tj.: podczas lub w związku z wykonywaniem przez pracownika zwykłych czynności lub poleceń przełożonych; podczas lub w związku z wykonywaniem przez pracownika czynności na rzecz pracodawcy nawet bez polecenia; w czasie pozostawiania pracownika w dyspozycji pracodawcy w drodze między siedzibą pracodawcy a miejscem wykonywania obowiązku wynikającego ze stosunku pracy”.

Zgodnie z definicją opracowaną przez Główny Urząd Statystyczny Unii Europejskiej (EUROSTAT) [5], wypadek w trakcie pracy oznacza „nagle zdarzenie w czasie pracy, które spowodowało uraz fizyczny lub psychiczny”. Sformułowanie „w trakcie pracy” oznacza, że wypadek wystąpił „przy wykonywaniu działalności zawodowej lub podczas czasu spędzonego w pracy”.

Na podstawie dostępnych danych statystycznych można stwierdzić, że budownictwo charakteryzuje się bardzo wysoką wypadkowością we wszystkich krajach Unii Europejskiej. Dane statystyczne dotyczące 2020 roku, opublikowane przez EUROSTAT, wskazują, że w 27 krajach członkowskich Unii Europejskiej doszło do 2 735 566 wypadków przy pracy innych niż wypadki śmiertelne oraz

¹ Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, e-mail: mariusz.szostak@pwr.edu.pl.

3355 wypadków śmiertelnych we wszystkich sektorach gospodarki, co oznacza, że na każdy wypadek śmiertelny przypada ok. 820 wypadków „nieśmiertelnych”.

W porównaniu do innych działalności człowieka budownictwo charakteryzuje bardzo duża zmienność warunków pracy. Powoduje to, że pracownicy budowlani narażeni są na działanie wielu czynników niebezpiecznych powodujących wypadki [9]. Szczegółowa analiza danych publikowanych przez EUROSTAT wskazuje, że budownictwo w 2020 roku klasyfikuje się na:

- 1. miejscu pod względem liczby wypadków przy pracy o skutkach śmiertelnych. Tylko w budownictwie doszło do aż 690 wypadków przy pracy o skutkach śmiertelnych. Na kolejnych miejscach znajdują się m.in. przetwórstwo przemysłowe – 489 wypadków śmiertelnych oraz transport – 481 wypadków śmiertelnych.
- 2. miejscu pod względem wskaźnika częstości śmiertelnych wypadków przy pracy, który wynosi 6,07 osób poszkodowanych na 100 000 pracujących. Wyższy wskaźnik ma tylko górnictwo i wydobywanie (10,04 osób poszkodowanych na 100 000 zatrudnionych osób).
- 2. miejscu pod względem liczby wypadków przy pracy o skutkach innych niż śmierć pracownika, tzn. wypadków przy pracy bez ofiar śmiertelnych, w których osoby poszkodowane przeżywają, natomiast skutkiem wypadku jest jeden lub kilka dni nieobecności w pracy. W budownictwie doszło do 339 907 takich wypadków, a więcej odnotowano tylko w przetwórstwie przemysłowym – 497 196 wypadków.
- 1. miejscu pod względem wskaźnika częstości wypadków przy pracy o skutkach innych niż śmierć pracownika. W budownictwie wskaźnik ten wynosi 2986,67 osób poszkodowanych na 100 000 zatrudnionych osób. Za budownictwem klasyfikują się m.in. wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną i gorącą wodę – 2553,97 oraz transport – 2212,37 osób poszkodowanych na 100 000 zatrudnionych osób.

Z kolei, według danych statystycznych opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny Polski, w 2020 roku we wszystkich sekcjach gospodarki zginęło 190 pracowników, a liczba wszystkich wypadków wyniosła ponad 62 740. Liczba wypadków przy pracy w budownictwie objęła 3872 osób poszkodowanych, w tym 39 wypadków śmiertelnych, 58 wypadków ciężkich i 3775 wypadków z innym skutkiem. W rankingu poszczególnych sekcji pod względem liczby wypadków budownictwo w Polsce w 2020 roku zajęło wysokie 5. miejsce, zaraz za: przetwórstwem przemysłowym – 21 624 wypadki, handlem – 8218 wypadków, opieką zdrowotną i pomocą społeczną – 6959 wypadków oraz transportem i gospodarką magazynową – 5146 wypadków [6].

Zjawisko ulegania pracownikom wypadkom podczas pracy określane jest jako wypadkowość. Można ją rozpatrywać i analizować w sensie szczegółowym oraz ogólnym. Badanie w sensie szczegółowym oznacza, że przedmiotem zainteresowa-

nia są poszczególne wypadki. W takim aspekcie powstało wiele różnych modeli, służących do analiz pojedynczych zdarzeń wypadkowych. Wykrycie określonych prawidłowości, którym podlega zjawisko wypadkowości, możliwe jest jednak na podstawie badań prowadzonych w odpowiednio dużej skali zjawiska.

Na podstawie analizy literatury przedmiotu nie stwierdzono modeli skonstruowanych w celu zbadania zjawiska wypadkowości jako procesu, który tworzy ciąg wypadków, zachodzących w dyskretnych momentach na różnych pod względem lokalizacji, konstrukcji i wyposażenia technicznego budowach. Na podstawie analizy przebiegu wybranych wypadków przy pracy w budownictwie stwierdzono natomiast, że przebiegają one według różnych scenariuszy. Opracowanie modelu odzwierciedlającego złożone zjawisko wypadkowości oraz przeprowadzenie na nim badań pozwoli na zdefiniowanie prawdopodobieństwa wystąpienia określonych scenariuszy oraz wskazanie istotnych dla praktyki budowlanej kierunków działań prewencyjnych.

10.2. MODELOWANIE ROZWOJU SYTUACJI WYPADKOWEJ

Zrozumienie mechanizmów powstawania wypadków przy pracy jest pierwszym krokiem w procesie zapobiegania wypadkom i poprawy bezpieczeństwa w miejscu pracy. W tym celu prowadzone są szczegółowe analizy okoliczności, przyczyn i przebiegu wypadków przy pracy, które stanowią podstawę budowy różnych modeli.

W literaturze znaleźć można wiele różnorodnych modeli wypadków, które na przestrzeni lat proponowali kolejni badacze. Ich głównym celem było opracowanie najbardziej zbliżonego do rzeczywistości modelu przebiegu wypadku, który pozwoliłby na zidentyfikowanie źródła wypadku. Od opracowywanego modelu oczekuje się uzyskania odpowiedzi na pytania: „dlaczego” i „jak” dochodzi do wypadku. Uzyskanie odpowiedzi na te pytania ma umożliwić prowadzenie odpowiednich działań prewencyjnych, skutkujących zmniejszeniem się liczby wypadków.

Na podstawie analizy literatury przedmiotu wyróżnić można modele:

- opisujące mechanizmy powstawania wypadków,
- charakteryzujące wypadki,
- klasyfikujące przyczyny wypadków,
- analizujące zachowania człowieka w obliczu zagrożenia.

Poszczególne modele wypadków, mimo różniącego je podejścia do badanego zagadnienia, wykazują cechy wspólne, dzięki czemu możliwa jest ich klasyfikacja [11, 12].

Za twórcę pierwszego modelu wypadku, zakwalifikowanego do grupy modeli sekwencyjnych, uznaje się amerykańskiego pioniera w dziedzinie bezpieczeństwa pracy Herberta Williama Heinricha. Heinrich [8] przedstawił model wypadku jako skutek kilku przyczyn, które są konsekwencją pojawiających się kolejnych zdarzeń.

Autor po przeanalizowaniu ok. 75 000 wypadków zaproponował tzw. model domina, w którym skoncentrował się na brakach w ludzkich zachowaniach. Model domina zakłada występowanie różnych nieprawidłowości w ludzkich postępowaniach, które – poprzedzone występującymi w otoczeniu czynnikami społecznymi i środowiskowymi – wpływają na człowieka i mogą doprowadzić do niebezpiecznych sytuacji, zdarzeń oraz wypadków. Według Heinricha proces wypadkowy jest sekwencją pięciu czynników: środowiska pracy, człowieka, zagrożenia, wypadku oraz urazu. Przewracające się na siebie kolejne kostki domina tworzą łańcuch zdarzeń prowadzących do wypadku, powodując obrażenia u pracownika. Do wypadku dochodzi wtedy, gdy w środowisku pracy występują zagrożenia, powstające w wyniku nieprawidłowości w środowisku i niewłaściwych działań człowieka.

W odróżnieniu od modeli sekwencyjnych, które przedstawiają pojedynczy łańcuch zdarzeń, wyróżnia się również wieloliniowe i rozgałęzione łańcuchy zdarzeń wypadkowych, których przykładem jest drzewo zdarzeń. Drzewo zdarzeń przedstawia proces wypadkowy jako ciąg, rozpoczynający się od zdarzenia inicjującego proces wypadkowy, przebiegający przez kolejne rozgałęzienia łańcuchów aż do zestawu zdarzeń końcowych. Jest ono graficznym przedstawieniem możliwych sekwencji zdarzeń, będących skutkiem wystąpienia zdarzenia początkowego. Nazwa tej metody odzwierciedla graficzną prezentację wyników w postaci scenariuszy zdarzeń rozrastających się jak drzewo. W schemacie stosowane są graficzne elementy koniunkcji i alternatywy, które determinują przebieg procesu.

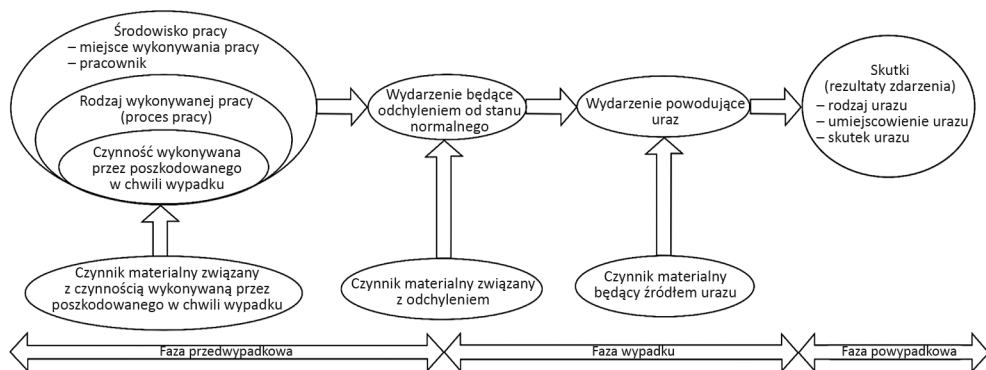
Ważną grupę modeli stanowią modele transferu energii. I tak, np. badanie wypadku z zastosowaniem analizy transferu energii opiera się na założeniu, że aby powstał wypadek przy pracy, człowiek musi zostać poddany działaniu energii występującej na stanowisku pracy w różnej postaci. Może to być energia mechaniczna, np. związana z poruszającymi się elementami maszyn, energia elektryczna lub energia chemiczna. Energia jest tym wszystkim, co może spowodować uraz u człowieka lub uszkodzenie obiektu lub maszyny [14]. Model transferu energii koncentruje się na przekazaniu niekontrolowanej energii ze źródła do ofiary. Model zakłada, że aby doszło do wypadku, musi dojść do bezpośredniego kontaktu z zagrożeniem. Aby tego uniknąć, na stanowiskach pracy stosuje się różnego rodzaju środki profilaktyczne i bariery, np. stosowane są środki ochrony zbiorowej lub indywidualnej. W sytuacji, w której zawiodą stosowane bariery, zgodnie z założeniami modelu, dochodzi do niekontrolowanego uwolnienia energii i w efekcie do wypadku.

Opracowanych zostało również wiele modeli zajmujących się przyczynami ludzkimi wypadku i koncentrujących się na ryzykownych zachowaniach i błędach człowieka. Przykładem modelu, uwzględniającego czynnik ludzki, jest model wypadku zaproponowany przez Reasona [15] – tzw. model sera szwajcarskiego. Zgodnie z nim, aby doszło do wypadku, nie jest wystarczający pojedynczy błąd ludzki, organizacyjny lub techniczny. Do wypadku dochodzi w wyniku nałożenia się na

siebie ukrytych, niebezpiecznych warunków na różnych poziomach podejmowania decyzji i prowadzenia działań.

W wielu modelach przyjmuje się, że powstanie wypadku jest wynikiem kombinacji zdarzeń związanych z technicznymi aspektami stanowiska pracy, warunkami środowiska pracy, błędami ludzkimi oraz działaniami organizacyjnymi. Takie modele przedstawiają uporządkowaną kolejność występowania zdarzeń prowadzących do wypadku i nazwano je „modelami porządkującymi”. Przykładem takiego podejścia jest analiza wypadku za pomocą diagramu STEP, który przedstawia sekwencje wypadku w ujęciu czasowym, z uwzględnieniem „aktorów” biorących udział w zdarzeniu wypadkowym. Model zakłada, że każde zdarzenie wypadkowe jest wynikiem zadziałania „aktora”, którym może być zarówno człowiek, jak i przedmiot lub narzędzie – czynnik materialny. Do zdarzenia wypadkowego dochodzi w wyniku interakcji kolejno następujących po sobie działań „aktorów” [16].

Ostatnią grupę modeli, istotną dla prowadzonych badań, stanowią modele procesowe, które wyjaśniają powiązania pomiędzy przebiegiem wypadku a jego przyczynami. Modelem procesowym jest model zaproponowany przez EUROSTAT, w którym wypadek przedstawiony został jako proces przebiegający przez następujące fazy: fazę przedwypadkową, fazę wypadku oraz fazę powypadkową. Model takiego wypadku przedstawiono na rys. 10.1.



Rys. 10.1. Model wypadku według EUROSTAT [5]. Źródło: oprac. własne

Faza przedwypadkowa obejmuje te elementy procesu pracy, które dotyczą pracownika i są wykonywane w chwili zaistnienia wypadku. Fazę wypadku oddziela od fazy przedwypadkowej wydarzenie będące odchyleniem od stanu normalnego. Jest to wydarzenie niezgodne z właściwym przebiegiem procesu pracy, które wywołało wypadek. Z odchyleniem tym na ogół związany jest czynnik materialny, z którym kontakt stał się przyczyną urazu. W fazie powypadkowej mamy do czynienia ze skutkami wypadku, a więc: liczbą osób poszkodowanych, rodzajami doznanych urazów i ich umiejscowieniem, niezdolnością do pracy, a także stratami

materialnymi oraz stratami czasu pracy. Przedstawiony model został opracowany w celu zbierania danych statystycznych o wypadkach przy pracy w krajach Unii Europejskiej [5].

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu można stwierdzić, że dotychczasowe modele dotyczą analizy pojedynczych wypadków w aspekcie przyczynowo-skutkowych łańcuchów zdarzeń, m.in. w celu identyfikacji charakterystycznych elementów łańcucha oraz opisujących je parametrów, a także lepszego poznania różnych aspektów zjawiska wypadkowości.

Z przeprowadzonego rozpoznania literaturowego wynika, że nie ma modeli skonstruowanych w celu zbadania zjawiska wypadkowości jako procesu, który tworzy ciąg wypadków zachodzących w dyskretnych momentach na różnych pod względem lokalizacji konstrukcji i wyposażenia technicznego budowach.

Zjawisko wypadkowości w budownictwie jest bardziej skomplikowane, niż to przedstawiają modele zbudowane w celu analizy pojedynczych wypadków. Wynika to ze specyfiki budownictwa, charakteryzującego się dużą zmiennością warunków realizacji i różnorodnością realizowanych obiektów budowlanych. Ponadto w realizacji obiektów budowlanych mają zastosowanie różne techniki wykonania i metody organizacji. Dlatego też każdy wypadek przy pracy w budownictwie przebiega według innego szczegółowego scenariusza i ma swoje charakterystyczne atrybuty. Z tego względu w badaniach opisanych w niniejszym rozdziale uwzględniono procesowy charakter zjawiska, różnorodność warunków realizacji obiektów i ich specyfiki konstrukcyjnej. Pozwala to uzyskać wiele informacji o badanym zjawisku, których nie otrzymamy na podstawie analizy pojedynczych wypadków oraz dostępnych danych statystycznych.

10.3. METODYKA BADAŃ

Punktem wyjścia do opracowania metodyki badań była opracowana przez Europejski Urząd Statystyczny uniwersalna metodyka badania wypadków przy pracy [5]. Metodyka ta powstała w celu określenia jednoznacznych i wspólnych dla wszystkich państw Unii Europejskiej wytycznych, dotyczących gromadzenia danych statystycznych o wypadkach przy pracy. Uzyskane przy zastosowaniu opracowanej metodyki informacje dają możliwość porównywania całych regionów, państw i sektorów gospodarki pod kątem wypadkowości w ujęciu statystycznym.

Ze względu na fakt, że wypadki zdarzają się w różnych momentach czasu, na różnych pod względem lokalizacji i wyposażenia technicznego budowach, zjawisko ulegania pracowników budowlanych tym zdarzeniom jest zjawiskiem dynamicznym i zmieniającym się w czasie. Szczegółowa analiza dokumentacji powypadkowych, dotyczących wypadków przy pracy, wykazała, że okoliczności poszczególnych wypadków są różne. Z tego powodu każdy wypadek, analizowany jako ciąg

określonych zdarzeń, może przebiegać według innego scenariusza. Analiza odpowiednio dużego zbioru wypadków i ich scenariuszy może ujawnić stałe cechy charakterystyczne dla tego zjawiska, np. najczęściej występujące scenariusze wypadkowe, a także prawdopodobieństwo ich wystąpienia.

Do badania wypadkowości jako masowego zjawiska dynamicznego zastosowano podejście procesowe. W podejściu tym istotne są nie tylko poszczególne zdarzenia charakteryzujące wypadek, ale przede wszystkim zachodzące między nimi relacje. Zdarzenia i łączące je relacje tworzą proces. Ze względu na różne okoliczności i warunki, w których dochodzi do wypadku, zbiorowi wypadków przy pracy odpowiada zbiór różnych scenariuszy. Aby zidentyfikować charakterystyczne i powtarzające się scenariusze, należy utworzyć mapę wszystkich możliwych scenariuszy i przeanalizować przebieg wypadków na takiej mapie. Do wizualizacji takiej mapy zastosowano graf skierowany. Analiza wielu procesów wypadkowych pozwala określić częstość aktywacji poszczególnych zdarzeń i relacji na mapie zjawiska i w ten sposób zdefiniować scenariusze wypadkowe o największym prawdopodobieństwie zaistnienia.

W ramach prowadzonych badań opracowano autorską metodykę badań, składającą się z następujących etapów:

- Etap I – pozyskanie dokumentacji powypadkowej w postaci protokołów kontroli powypadkowej z okręgowych inspektoratów pracy w Polsce.
- Etap II – zbudowanie informatycznej bazy danych o wypadkach przy pracy, uwzględniającej założenia przyjęte w metodyce opracowanej przez Europejski Urząd Statystyczny, a następnie wprowadzenie do bazy informacji o wypadkach.
- Etap III – opracowanie, na podstawie analizy informacji zawartych w bazie, założeń do graficznego i matematyczno-informatycznego modelu zjawiska wypadkowości, przedstawionego w formie grafu skierowanego.
- Etap IV – opracowanie programu komputerowego i analiza dyskretna procesów wypadkowych, obejmująca wypadki znajdujące się w bazie.
- Etap V – analiza uzyskanych wyników. Identyfikacja najczęściej występujących scenariuszy, określenie prawdopodobieństwa ich wystąpienia oraz sformułowanie wniosków końcowych.

10.3.1. DOKUMENTACJA POWYPADKOWA – PROTOKOŁY KONTROLI

W Polsce dostępnym źródłem danych o wypadkach przy pracy są protokoły kontroli powypadkowej, opracowywane przez inspektorów pracy i gromadzone w archiwach urzędowych. W celu pozyskania dokumentacji nawiązano współpracę z Państwową Inspekcją Pracy w Polsce. W protokołach kontroli inspektorzy pracy zamieszczają informacje dotyczące okoliczności i przyczyn badanego zdarzenia, a zwłaszcza:

- informacje o czasie i miejscu zdarzenia, wykonywanych czynnościach oraz używanych materiałach i wyposażeniu,
- dane o poszkodowanych,
- opis przebiegu zdarzenia z uwzględnieniem jego okoliczności i przyczyn,
- ocenę postępowania powypadkowego z uwzględnieniem proponowanych przez zespół powypadkowy wniosków i środków profilaktycznych.

Stosowana przez inspektorów pracy i zastosowana w protokołach kontroli procedura badania wypadków oparta jest na założeniach opracowanych przez Europejski Urząd Statystyczny [5]. Inspektorzy pracy, bazując na powyższej procedurze, badają okoliczności i przebieg wypadku przy pracy. Badaniami objęto wypadki przy pracy, które wydarzyły się w polskim budownictwie pomiędzy 2008 a 2018 roku w wybranych województwach.

10.3.2. INFORMATYCZNA BAZA DANYCH (IBD)

Na podstawie przeanalizowanych protokołów kontroli opracowana została Informatyczna Baza Danych (IBD) o wypadkach przy pracy. Zgromadzone dane obejmowały:

- dane ogólne o wypadku, takie jak: oznaczenie protokołu, województwo, rok, miejscowość, opis wypadku, warunki atmosferyczne (pogodowe) podczas prowadzenia prac, liczba pracujących, data i godzina wypadku, liczba poszkodowanych,
- dane o osobie poszkodowanej (z pominięciem danych wrażliwych), takie jak: płeć, rok urodzenia, wiek, obywatelstwo, status zatrudnienia, zawód wykonywany, przygotowanie do wykonywania pracy, staż pracy, godziny przepracowane przez poszkodowanego,
- informacje o przebiegu wypadku i jego skutkach, takie jak: miejsce wypadku, proces pracy, czynność wykonywana przez poszkodowanego w chwili wypadku, czynnik materialny związany z czynnością wykonywaną przez poszkodowanego w chwili wypadku, wydarzenie będące odchyleniem od stanu normalnego, czynnik materialny związany z odchyleniem, wydarzenie powodujące uraz, czynnik materialny będący źródłem urazu, rodzaj i umiejscowienie urazu, skutek wypadku,
- przyczyny wypadku z podziałem na przyczyny techniczne, organizacyjne i ludzkie.

Zaproponowana struktura wiedzy stanowiła podstawę do zbudowania bazy danych w formie dwuwymiarowej tabeli. Fragment bazy danych przedstawiono w tabeli 10.1. Każdy wiersz tabeli zawiera informacje o pojedynczym wypadku przy pracy, natomiast poszczególne kolumny zawierają informacje jednego typu o wszystkich wypadkach zawartych w bazie.

Fragment bazy danych

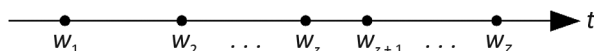
Lp.	Oznaczenie protokołu	Oznaczenie robocze	Dokumentacja fotograficzna	Rok urodzenia poszkodowanego	Data wypadku	Dzień tygodnia	Miesiąc	...
j								
1								
.								
.								
.								
m								

Źródło: oprac. własne

10.3.3. GRAFICZNO-MATEMATYCZNY MODEL ZJAWISKA WYPADKOWOŚCI

Do budowy graficzno-matematycznego modelu zjawiska wypadkowości przyjęto wiele założeń, a mianowicie:

- Analizowane wypadki w_z : $z = 1, \dots, Z$ stanowią zbiór ZW . Są one uporządkowane zgodnie z upływem czasu t , tworząc nieskończony ciąg zdarzeń, który analizować można jako dyskretny proces wypadkowy, przedstawiony na rys. 10.2.



Rys. 10.2. Dyskretny proces wypadkowy. Źródło: oprac. własne

- Jeden wypadek odpowiada jednej poszkodowanej osobie. Oznacza to, że jeżeli w wypadku przy pracy poszkodowane zostały dwie lub więcej osób, wówczas analiza prowadzona jest dla każdej z tych osób osobno. Przyjęcie takiego założenia wynika z badania warunków i okoliczności wypadków zbiorowych, tj. wypadków, w których zostały poszkodowane dwie lub więcej osoby. Analiza wykazała, że warunki i okoliczności wypadku są identyczne dla wszystkich poszkodowanych osób, jednak skutki wypadku mogą być inne dla każdej z nich.
- Każdemu wypadkowi przyporządkowano wektor informacji dotyczących okoliczności i warunków, w jakich doszło do wypadku:

$$W_{z_c} = [A_z, B_z, C_z, D_z, E_z, F_z, G_z, H_z, U_z, R_z], \quad Z = 1, \dots \quad (10.1)$$

gdzie:

- A_z – miejsce powstania wypadku w_z ,
- B_z – proces pracy wykonywany przez poszkodowanego w momencie powstania wypadku w_z ,
- C_z – czynność wykonywana przez poszkodowanego w chwili wypadku w_z ,

- D_z – czynnik materialny związany z czynnością wykonywaną przez poszkodowanego w chwili wypadku w_z ,
 E_z – wydarzenie będące odchyleniem od stanu normalnego w wypadku w_z ,
 F_z – czynnik materialny związany z odchyleniem od stanu normalnego w wypadku w_z ,
 G_z – wydarzenie powodujące uraz w wypadku w_z ,
 H_z – czynnik materialny będący źródłem urazu, związany z wydarzeniem powodującym uraz w wypadku w_z ,
 U_z – rodzaj urazu, jaki powstał w wypadku w_z ,
 R_z – skutek wypadku w_z (w Polsce skutki wypadków klasyfikowane są jako: lekkie, ciężkie i śmiertelne).

Wymienione w formule (10.1) elementy ułożone są w postaci logicznego przyczynowo-skutkowego ciągu zdarzeń. W przebiegu każdego wypadku w_z występują zdarzenia rzeczywiste E_z i G_z , powodujące zmianę stanu systemu, jakim jest teren budowy, oraz elementy opisujące okoliczności, w jakich doszło do wypadku, oraz jego skutki – elementy: $A_z, B_z, C_z, D_z, F_z, H_z, U_z, R_z$.

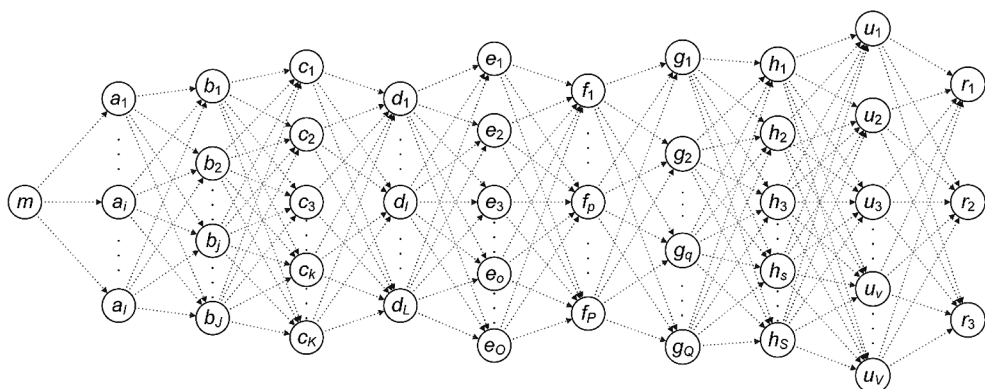
- Uwzględniając zależności przyczynowo-skutkowe występujące między poszczególnymi atrybutami, stwierdzono, że każdy wypadek przy pracy w_z może przebiegać według innego scenariusza, a zjawisko wypadkowości obejmujące duży zbiór wypadków przedstawić można w postaci grafu skierowanego Y :

$$Y = \langle N, T \rangle \quad (10.2)$$

gdzie:

N – jest dowolnym, niepustym zbiorem węzłów,

T – jest zbiorem możliwych uporządkowanych par sąsiadujących węzłów N , zwanych krawędziami skierowanymi lub relacjami.



Każdy węzeł w grafie skierowanym przedstawionym na rys. 10.3, w zależności od okoliczności i przebiegu wypadku, może mieć wiele różnych znaczeń, a kolejne informacje mogą być opisane przez różne atrybuty:

$$\begin{aligned} A_z &= \{a_i; i = 1, \dots, I\}, & B_z &= \{b_j; j = 1, \dots, J\}, & C_z &= \{c_k; k = 1, \dots, K\}, \\ D_z &= \{d_l; l = 1, \dots, L\}, & E_z &= \{e_o; o = 1, \dots, O\}, & F_z &= \{f_p; p = 1, \dots, P\}, \\ G_z &= \{g_q; q = 1, \dots, Q\}, & H_z &= \{h_s; s = 1, \dots, S\}, & U_z &= \{u_v; v = 1, \dots, V\}, \\ & & R_z &= \{r_x; x = 1, \dots, 3\} \end{aligned}$$

Poszczególne szczegółowe przypadki, dotyczące różnych sytuacji i okoliczności, identyfikowane są przez indeks zamieszczony przy małej literze oznaczającej węzeł. W tabeli 10.2 scharakteryzowano główne węzły występujące w modelu.

Tabela 10.2

Węzły modelu dotyczące okoliczności i warunków, w jakich doszło do wypadku

$M = \{m\}$ oznacza hipotetyczne źródło generowania wypadków	
$A = \{a_i; i = 021, 022, \dots, 026, 029\}$ – miejsce wypadku przy pracy	
a_{021}	obiekt w budowie
a_{022}	obiekt rozbierany, burzony, remontowany
a_{023}	kopalnia odkrywkowa, kamieniołom itp.
a_{024}	teren budowy pod ziemią
a_{025}	teren budowy na wodzie, ponad wodą
a_{026}	teren budowy w środowisku wysokiego ciśnienia
a_{029}	inne, niewymienione lub nieznane miejsce w tej grupie
$B = \{b_j; j = 21, 22, \dots, 25, 29\}$ – proces pracy	
b_{21}	wydobycie i prace ziemne
b_{22}	budowanie nowych budynków
b_{23}	budowanie infrastruktury, np. dróg, mostów, tam, portów itp.
b_{24}	przebudowywanie, naprawa, rozbudowywanie, konserwacja obiektów budowlanych i infrastruktury
b_{25}	prace rozbiórkowe i wyburzeniowe
b_{29}	inne, niewymienione lub nieokreślone prace w tej grupie
$C = \{c_k; k = 0, 1, \dots, 9\}$ – czynność wykonywaną przez poszkodowanego w chwili wypadku	
c_0	brak informacji
c_1	obsługiwanie maszyn
c_2	prace narzędziami ręcznymi
c_3	kierowanie/jazda środkami transportu/obsługa ruchomych maszyn i innych urządzeń
c_4	operowanie przedmiotami

c_5	transport ręczny
c_6	poruszanie się
c_7	obecność
c_9	inna czynność
$D = \{d_n : n = 00, 01, \dots, 99\}$ – czynnik materialny związany z czynnością wykonywaną przez poszkodowanego w chwili wypadku	
d_{00}	czynnik materialny nie występuje
d_{01}	budynki, konstrukcje i ich elementy, gdy ich powierzchnie znajdują się na poziomie gruntu
d_{02}	budynki, konstrukcje i ich elementy, gdy ich powierzchnie znajdują się nad poziomem gruntu
d_{03}	budynki, konstrukcje i ich elementy, gdy ich powierzchnie znajdują się poniżej poziomu gruntu
d_{04}	systemy dostaw, dystrybucji i odprowadzania gazów, cieczy i ciał stałych, sieci rur i instalacje
d_{05}	urządzenia do wytwarzania, przetwarzania, magazynowania, przesyłania i rozdzielania energii
d_{06}	narzędzia ręczne bez napędu
d_{07}	narzędzia zmechanizowane trzymane w ręku lub prowadzone ręcznie
d_{09}	maszyny, wyposażenie – przenośne lub ruchome
d_{10}	maszyny, urządzenia i wyposażenie stacjonarne
d_{11}	maszyny, urządzenia i wyposażenie do podnoszenia, przenoszenia i magazynowania
d_{12}	pojazdy drogowe
d_{13}	inne pojazdy transportowe
d_{14}	materiały, przedmioty, wyroby, części maszyn
d_{15}	substancje chemiczne, promieniotwórcze, wybuchowe, biologiczne
d_{16}	urządzenia i wyposażenie związane z bezpieczeństwem
d_{17}	wyposażenie biura, osobiste, sportowe, broń
d_{18}	ludzie i inne organizmy żywe
d_{19}	odpady
d_{20}	zjawiska fizyczne i elementy środowiska naturalnego
d_{99}	inny czynnik materialny
$E = \{e_o : o = 0, 1, \dots, 9\}$ – wydarzenie będące odchyleniem od stanu normalnego, czyli wydarzenie niezgodne z właściwym przebiegiem procesu pracy, które inicjuje powstanie niebezpiecznego wypadku	
e_0	brak informacji
e_1	odchylenie związane z elektrycznością, wybuchem, pożarem
e_2	odchylenie związane z wyrzutem, wyciekami, emisją substancji szkodliwych

e_3	uszkodzenie, rozerwanie, pęknięcie, ześlizgnięcie, upadek, załamanie się czynnika materialnego
e_4	utrata kontroli nad maszyną, środkami transportu, transportowanym ładunkiem, narzędziem, obiektem
e_5	poślizgnięcie, potknięcie się, upadek osoby
e_6	ruchy ciała bez wysiłku fizycznego, prowadzące na ogół do urazów zewnętrznych
e_7	ruchy ciała związane z wysiłkiem fizycznym, prowadzące na ogół do urazów wewnętrznych
e_8	wstrząs, strach, przemoc, atak, zagrożenie, obecność
e_9	inne odchylenie
$F = \{f_p: p = 00, 01, ..., 99\}$ – czynnik materialny związany z odchyleniem od stanu normalnego. Klasyfikacja czynników materialnych pokrywa się z listą czynników wyróżnionych w węźle D	
$G = \{g_q: q = 0, 1, ..., 9\}$ – niebezpieczne zdarzenie, które jest skutkiem powstałego odchylenia powodujące uraz	
g_0	brak informacji
g_1	kontakt z prądem elektrycznym, temperaturą, niebezpiecznymi substancjami i preparatami chemicznymi
g_2	tonięcie, zakopanie, zamknięcie
g_3	zderzenie z, uderzenie w nieruchomy obiekt
g_4	uderzenie przez obiekt w ruchu
g_5	kontakt z przedmiotem ostrym, szorstkim, chropowatym
g_6	uwięzienie, zmiażdżenie
g_7	obciążenie fizyczne lub psychiczne
g_8	przejaw agresji ze strony człowieka lub zwierzęcia
g_9	inne wydarzenie
$H = \{h_s: s = 00, 01, ..., 99\}$ – czynnik materialny będący źródłem urazu związany z wydarzeniem powodującym uraz. Klasyfikacja czynników materialnych pokrywa się z listą czynników wyróżnionych w węźle D	
$U = \{u_v: v = 000, 010, ..., 999\}$ – rodzaj urazu doznanego przez poszkodowanego w wyniku kontaktu z niebezpiecznym czynnikiem materialnym	
u_{000}	rodzaj urazu nieznany lub nieokreślony
u_{010}	rany i powierzchniowe rany
u_{020}	złamania kości
u_{030}	przemieszczenia, zwichnięcia, skręcenia i naderwania
u_{040}	amputacje urazowe
u_{050}	urazy wewnętrzne
u_{060}	oparzenia ogniem lub środkami chemicznymi, oparzenia wodą lub parą, odmrożenia
u_{070}	zatrucia, zakażenia

u_{080}	tonięcie, duszenie z powodu braku tlenu
u_{090}	skutki dźwięków, wibracji i ciśnienia
u_{100}	skutki ekstremalnych temperatur, oświetlenia oraz promieniowania
u_{110}	wstrząsy (ostra reakcja na stres, wstrząs urazowy)
u_{120}	liczne urazy
u_{130}	uraz w wyniku upadku z wysokości
u_{140}	uraz w wyniku zasypiania ziemią
u_{150}	śmierć poszkodowanego
u_{999}	inny uraz
$R = \{r_x: x = 1, 2, 3\}$ – rodzaj wypadku (skutek)	
r_1	śmierć poszkodowanej (wypadek śmiertelny)
r_2	ciężkie uszkodzenie ciała (wypadek ciężki)
r_3	lekkie uszkodzenie ciała (wypadek lekki)

Źródło: oprac. własne

Relacje przyczynowo-skutkowe między poszczególnymi węzłami, tj. następującymi po sobie warunkami i okolicznościami, zostały przedstawione za pomocą krawędzi skierowanych. W modelu przedstawionym na rys. 10.3 krawędzie grafu łączą poszczególne wierzchołki w sąsiadujących podzbiorach wierzchołków na zasadzie „każdy z każdym” i wynikają z możliwego teoretycznego następstwa kolejnych zdarzeń. Symulacja kolejno następujących wypadków pozwoli określić wartości liczbowe charakteryzujące częstość wystąpienia poszczególnych relacji. Ponadto, ze względu na fakt, że wypadki powstają na różnych pod względem lokalizacji budowach, wprowadzono węzeł m , oznaczający umowne źródło inicjacji wypadków.

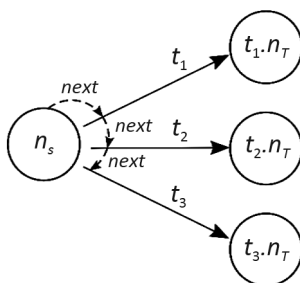
W zaproponowanym modelu każdy wypadek przy pracy w_z przebiega przez poszczególne wierzchołki od węzła m do węzła r_x według indywidualnego scenariusza. Do określenia najczęściej występujących scenariuszy wypadkowych konieczne jest zidentyfikowanie nie tylko najbardziej obciążonych węzłów w grafie, ale również określenie wag dla poszczególnych relacji. Odtwarzając przebieg kolejnych wypadków, możliwe jest określenie liczby aktywacji poszczególnych węzłów oraz liczby aktywacji konkretnych relacji między węzłami. Informacje te pozwolą wyeliminować z modelu grafu te węzły i relacje, które nigdy nie były aktywowane.

Wiedza na temat liczby aktywacji poszczególnych węzłów i relacji pozwoli na wyznaczenie prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych relacji. Uzyskana wartość prawdopodobieństwa dla różnych ścieżek prowadzących od węzła m do węzła r_x pozwoli na zidentyfikowanie najbardziej prawdopodobnych scenariuszy wypadkowych w budownictwie. Ścieżka o najwyższym prawdopodobieństwie tworzy tzw. ścieżkę krytyczną w zbiorze analizowanych wypadków i ilustruje najczęściej aktywowane węzły i relacje w grafie.

10.3.4. INFORMATYCZNY MODEL ZJAWISKA WYPADKOWOŚCI

Model w postaci grafu zawiera zdarzenia i relacje pomiędzy nimi, co jest wystarczające do wizualizacji scenariuszy wypadkowych. Jednakże efektywna analiza scenariuszy wymaga reprezentacji struktury grafu w pamięci komputera. Implementacje standardowo stosowane w informatyce bazują na tabelach lub listach. Nie są one wydajne w analizie obliczeniowej, która wymaga wielokrotnego przeszukiwania grafu czy znajdowania ścieżek. W związku z tym, na potrzeby opisywanych badań, została zaimplementowana topologiczna struktura danych. Pozwala ona na przechowywanie informacji związanej ze zdarzeniami i relacjami, które są reprezentowane przez odpowiednie węzły i krawędzie. Dodatkowo, topologia grafu, tj. połączenia pomiędzy węzłami i krawędziami, jest przechowywana w samej strukturze danych. Taka reprezentacja umożliwia znacznie wydajniejsze obliczenia w pamięci komputera.

Każda relacja w grafie, reprezentowana jako krawędź, ograniczona jest dwoma węzłami, z których pierwszy znajduje się w warstwie węzłów poprzedzających, a drugi w warstwie węzłów następujących (rys. 10.4). Każdy węzeł ma przypisany wskaźnik do pierwszej krawędzi ograniczonej przez ten węzeł. Z kolei każda krawędź rozpoczynająca się od tego samego węzła jest połączona z krawędzią następującą po niej przez wskaźnik *next*. Dodatkowo, krawędzie przechowują wskaźniki do dwóch węzłów ograniczających, zlokalizowanych na sąsiednich warstwach węzłów zdarzeń. Relacje węzeł – krawędź pokazano na rys. 10.3. Dowolny węzeł startowy n_s , zlokalizowany na dowolnej warstwie węzłów, wskazuje na pierwszą krawędź t_1 za pomocą wskaźnika *next*, tzn. $n_s.next = t_1$. Z kolei $t_1.next$ wskazuje na t_2 , a $t_2.next$ na t_3 . Krawędzie przechowują także wskaźniki do węzła startowego n_s i do węzła końcowego n_T . W przedstawionym przykładzie grafu $t_1.n_s$, $t_2.n_s$ i $t_3.n_s$ jest tym samym węzłem, podczas gdy $t_1.n_T$, $t_2.n_T$ i $t_3.n_T$ są odrębnymi węzłami w kolejnej warstwie węzłów.

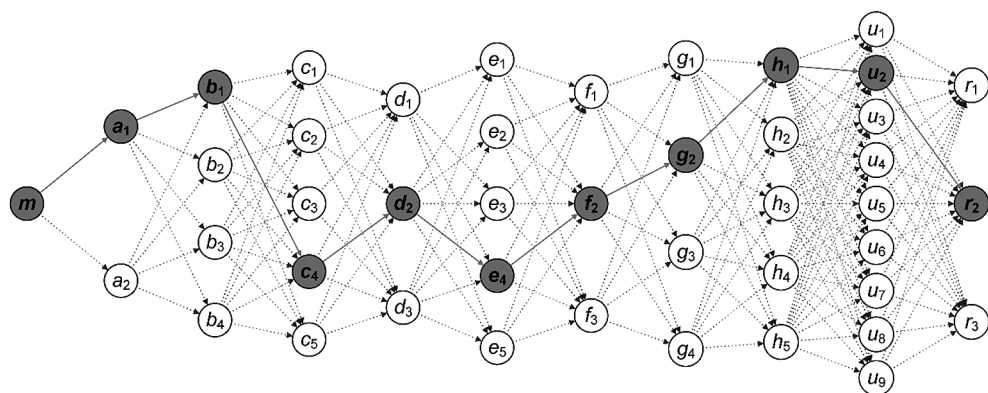


Rys. 10.4. Struktura grafu: połączenia pomiędzy węzłami (n) i krawędziami (t). Krawędzie t_1 – t_3 , współdzielące ten sam węzeł początkowy n_s , formują sekwencję obiektów połączonych przez wskaźnik *next* i są zakończone węzłem końcowym n_T . Źródło: [19]

Ta nieskomplikowana struktura danych jest wystarczająca do reprezentacji grafu. Ponieważ jest to graf skierowany, to każda krawędź rozpoczyna się od węzła w określonej warstwie i wskazuje na węzeł w kolejnej warstwie zdarzeń – przeciwny kierunek jest niedozwolony. W związku z tym możliwy jest ciąg zdarzeń w grafie przedstawiony na rys. 10.3 – od węzła m w kierunku węzłów r_x .

10.3.5. ANALIZA PROCESU WYPADKOWEGO

Jak już wspomniano, każdy wypadek przebiega w grafie przez ciąg wybranych węzłów i relacji, od węzła m do węzła r_x , przez dokładnie jeden wybrany węzeł w każdej grupie. W wyniku aktywacji modelu z IBD pobierane są informacje o kolejnych wypadkach, a ich przebieg jest przedstawiany na mapie procesów jako graf (rys. 10.3). Przez analizę procesu wypadkowego należy rozumieć odtworzenie jego przebiegu na mapie scenariuszy na podstawie danych zawartych w IBD. Przykładowo, na rys. 10.5 przedstawiono scenariusz jednego wypadku zarejestrowanego w IBD. Do wypadku doszło w trakcie budowy (a_1) nowego domu jednorodzinnego (b_1). Poszkodowany w trakcie poruszania się (c_4) po stacjonarnym rusztowaniu (d_2) poślizgnął się (e_4) na śliskim podeście roboczym rusztowania (f_2) i uderzył (g_2) w podłoże gruntowe (h_1), doznając złamania kończyn dolnych (u_2), co kwalifikuje zdarzenie jako wypadek ciężki (r_2).



Rys. 10.5. Odzworowanie przebiegu przykładowego wypadku zarejestrowanego w Informatycznej Bazie Danych. Źródło: oprac. własne

Po zakończeniu analizy wszystkich wypadków zawartych w IBD na wyjściu modelu otrzymujemy charakterystyczne cechy zjawiska wypadkowości, takie jak: liczba aktywacji poszczególnych węzłów w grafie, liczba aktywacji poszczególnych relacji w grafie, przebieg ścieżki krytycznej ilustrującej najczęściej aktywowane węzły i relacje.

Implementacja modelu grafowego pozwala na bezpośrednie użycie algorytmów grafowych, np. przeszukiwania grafu czy znajdowania najkrótszych ścieżek. Jest to także podstawa do wyszukiwania i analizy danych wykonywanych w tym badaniu. O ile liczby aktywacji poszczególnych węzłów i relacji w grafie wynikają bezpośrednio z danych zawartych w IBD i mogą zostać wyznaczone za pomocą prostych zapytań, o tyle przebieg ścieżki krytycznej wymaga obliczeń bazujących na liczbie aktywacji relacji w grafie. Algorytmami umożliwiającymi wyznaczenie ścieżki krytycznej są algorytmy znajdowania najkrótszej ścieżki pomiędzy węzłami w grafie, np. algorytm Dijkstry [4]. Bazują one na wagach – atrybutach liczbowych przyporządkowanych krawędziom. W standardowym przypadku taki atrybut wagowy reprezentuje odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi węzłami połączonymi krawędzią [1, 17, 21]. W przedstawionym badaniu waga jest obliczana na podstawie liczby aktywacji określonej relacji, gdzie relacja jest reprezentowana jako krawędź grafu. Waga jest wartością obliczoną z zastosowaniem metody normalizacji min-max w odwróconej skali:

$$w'_i = \frac{w_{\max} - w_i + 1}{w_{\max} - w_{\min}} \quad (10.3)$$

gdzie:

- w'_i – waga krawędzi i ,
- w_i – liczba aktywacji krawędzi i ,
- $w_{\max}$ – maksymalna wartość aktywacji relacji w grafie,
- $w_{\min}$ – minimalna wartość aktywacji relacji w grafie (w niniejszym badaniu $w_{\min} = 0$).

Sekwencja krawędzi od węzła początkowego m do węzła r_x (rys. 10.4) o największej sumie wag jest najkrótszą ścieżką, a tym samym jest ścieżką krytyczną. Należy zauważyć, że w grafie można wyznaczyć więcej niż jedną ścieżkę krytyczną. Taki przypadek uwzględniono w przeprowadzanych obliczeniach.

10.4. ANALIZA WYNIKÓW

Dane do analizy pozyskano z 664 protokołów kontroli. Dokumentacja dotyczyła 621 wypadków indywidualnych oraz 43 wypadków zbiorowych. Wśród wypadków zbiorowych zidentyfikowano:

- 34 wypadki, w których poszkodowanych zostało dwóch pracowników,
- 7 wypadków, w których poszkodowanych zostało trzech pracowników,
- 1 wypadek, w którym poszkodowanych zostało czterech pracowników,
- 1 wypadek, w którym poszkodowanych zostało dziewięciu pracowników.

Łączna liczba osób poszkodowanych w przeanalizowanych wypadkach przy pracy wyniosła 723. W przypadku 16 osób biorących udział w wypadkach zbioro-

Na podstawie przeprowadzonej symulacji przeprowadzono identyfikację aktywnych węzłów w grafie oraz aktywnych relacji między węzłami. Następnie zaktualizowano zaproponowany model w taki sposób, aby przedstawiał rzeczywistą sytuację w budownictwie.

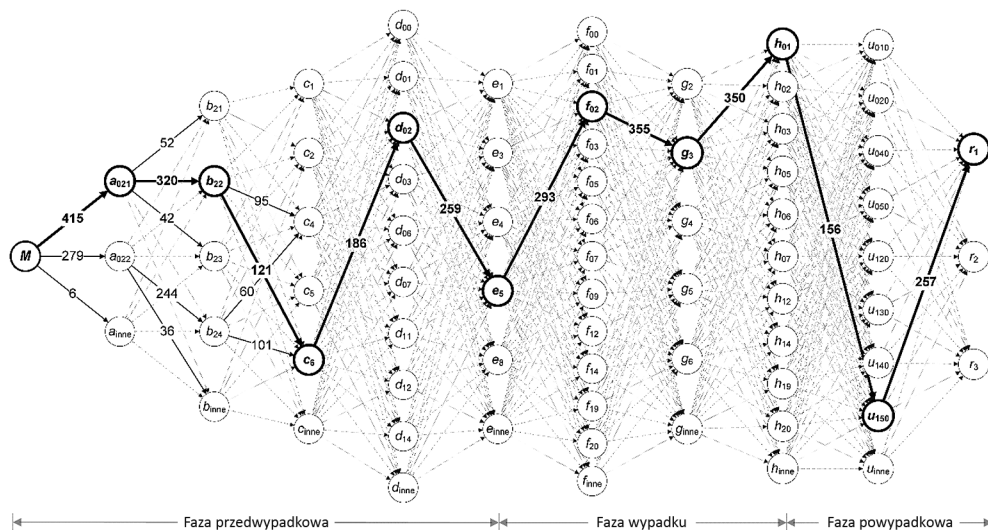
[illegible]

Na podstawie przeprowadzonej analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że ok. 35% relacji nie zostało aktywowanych w żadnym wypadku, ok. 44% relacji aktywowanych było w mniej niż 5% analizowanych wypadków, natomiast 21% relacji aktywowanych było wielokrotnie. Wskazuje to na pewne powtarzające się mechanizmy przebiegu procesu wypadkowego.

Na podstawie obliczeń wyznaczono ścieżkę krytyczną w modelu rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie dla zbioru analizowanych wypadków oraz najbardziej prawdopodobny scenariusz przebiegu wypadku w zbiorze analizowanych wypadków. Prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych scenariuszy, częściowych i końcowego, wyliczono, korzystając ze wzoru na prawdopodobieństwo zdarzeń warunkowych zdarzeń zależnych [7, 10]. Przebieg ścieżki krytycznej zaznaczono na rys. 10.5. W poszczególnych węzłach grafu zamieszczono symbol oraz kod liczbowy węzła, natomiast liczby zamieszczone nad łukami określają liczbę oraz prawdopodobieństwo aktywacji relacji łączących sąsiednie węzły w analizowanym zbiorze wypadków. W wyniku przeprowadzonych obliczeń dla 700 wypadków przy pracy otrzymano następujący przebieg ścieżki krytycznej: $m - a_{021} - b_{22} - c_6 - d_{02} - e_5 - f_{02} - g_3 - h_{01} - u_{150} - r_1$. Analiza wykazała, że:

- W zbiorze analizowanych 700 wypadków największą wartość prawdopodobieństwa uzyskała relacja $m - a_{021}$, łącząca źródło wypadku z miejscem powstania wypadku, jakim był teren budowy nowych obiektów. Prawdopodobieństwo wystąpienia takiej relacji wyniosło 59%.
- Drugą z kolei relacją typu $m - a_i$ pod względem prawdopodobieństwa wystąpienia była relacja $m - a_{022}$, łącząca źródło wypadku z miejscem powstania wypadku, jakim były obiekty remontowane, rozbierane i wyburzane, której prawdopodobieństwo wystąpienia wyniosło 40%.
- W analizowanych 700 wypadkach:
 - prawdopodobieństwo, że poszkodowany w chwili wypadku pracował przy wznoszeniu konstrukcji nowego obiektu wynosi 46% i dotyczy relacji $a_{021} - b_{22}$,
 - prawdopodobieństwo, że w chwili wypadku pracownik przemieszczał się po terenie budowy nowych obiektów wyniosło 18% i dotyczy relacji $b_{22} - c_6$,
 - prawdopodobieństwo, że poszkodowany w chwili wypadku przemieszczał się po powierzchniach lub konstrukcjach budowlanych, których powierzchnie znajdowały się nad poziomem gruntu, wyniosło 27% i dotyczy relacji $c_6 - d_{02}$,
 - prawdopodobieństwo, że w czasie przemieszczania się po powierzchniach znajdujących się powyżej poziomu gruntu doszło do poślizgnięcia, potknięcia się lub upadku pracownika wyniosło 37% i dotyczy relacji $d_{02} - e_5$,

- prawdopodobieństwo, że czynnikiem materialnym związanym z poślizgnięciem, potknięciem lub upadkiem osoby poszkodowanej będą powierzchnie obiektów i konstrukcji znajdujących się na nad poziomem gruntu wyniosło 42% i dotyczy relacji $e_5 - f_{02}$,
- prawdopodobieństwo, że w wyniku poślizgnięcia, potknięcia się lub upadku poszkodowanego, który znajdował się na powierzchniach lub konstrukcjach budowlanych nad poziomem gruntu, nastąpi zderzenie lub uderzenie w nieruchomy obiekt wyniosło 51% i dotyczy relacji $f_{02} - g_3$,
- prawdopodobieństwo, że obiektem, z którym nastąpi zderzenie lub w który poszkodowany uderzy, są konstrukcje i ich elementy, których powierzchnie znajdują się na poziomie gruntu, wyniosło 50% i dotyczy relacji $g_3 - h_{01}$,
- prawdopodobieństwo, że w wyniku zderzenia lub uderzenia w konstrukcje i ich elementy, których powierzchnie znajdują się na poziomie gruntu, nastąpi śmierć osoby poszkodowanej wyniosło 22% i dotyczy relacji $h_{01} - u_{150}$,
- prawdopodobieństwo, że w wyniku takiej relacji nastąpi śmierć osoby poszkodowanej wyniosło 37% i dotyczy relacji $u_{150} - r_1$.



Rys. 10.6. Ścieżka krytyczna w modelu rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie, określona dla zbioru wszystkich analizowanych wypadków. Źródło: oprac. własne

10.5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

- Dane statystyczne publikowane przez Główny Urząd Statystyczny nie stanowią właściwego źródła wiedzy, na podstawie którego można analizować i oceniać różne aspekty wypadkowości w budownictwie. Publikowane dane statystyczne są scalone i na ich podstawie nie można uzyskać informacji dotyczących specyficznych cech produkcji budowlanej.
- Opracowany model rozwoju sytuacji wypadkowej, ze względu na jego konstrukcję oraz wsparcie w postaci Informatycznej Bazy Danych, jest narzędziem, które może być zastosowane do analizy różnych aspektów wypadkowości w budownictwie, zarówno w skali makro, jak i mikro.
- Zaproponowany w pracy model rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie może mieć duże znaczenie dla praktyki budowlanej. Dodatkowo, opracowany model może stanowić podstawę prowadzenia podobnych badań w innych obszarach aktywności budowlanej, np. dla celów porównawczych. Wyniki takich badań porównawczych mogą stanowić podstawę określenia najbardziej niebezpiecznych obszarów budownictwa. Znajomość okoliczności i warunków wypadków pozwoli odpowiednio formułować lub modyfikować przepisy prawa pracy, a także właściwie ukierunkować działania prewencyjne oraz szkolenia w zakresie bezpieczeństwa pracy, co z pewnością wpłynie na zmniejszenie liczby wypadków przy pracy.
- Liczba aktywacji poszczególnych relacji między sąsiadującymi węzłami w analizowanym zbiorze wypadków pozwala określić przebieg ścieżki krytycznej, przechodzącej przez relacje o największej liczbie aktywacji i jednocześnie największym prawdopodobieństwie wystąpienia.
- Analiza ilościowa węzłów w grafie wykazała, że:
 - do największej liczby wypadków przy pracy dochodzi na terenie budowy nowych obiektów,
 - podstawową czynnością wykonywaną przez poszkodowanego w chwili wypadku jest poruszanie się pracownika po terenie budowy, a zwłaszcza po elementach i powierzchniach znajdujących się nad poziomem gruntu,
 - najczęściej występującym wydarzeniem, będącym odchyleniem od stanu normalnego, jest poślizgnięcie, potknięcie się, upadek osoby na tym samym poziomie lub upadek osoby z wysokości na niższy poziom, najczęściej z elementów lub powierzchni znajdujących się nad poziomem gruntu,
 - najczęściej występującym wydarzeniem powodującym uraz u poszkodowanego jest zderzenie z lub uderzenie pionowo w nieruchomy obiekt, zwłaszcza w elementy i powierzchnie znajdujące się na poziomie gruntu, czyli upadek z wysokości.

- Analiza ścieżek krytycznych, przeprowadzona dla powyższych zbiorów, pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:
 - bezwzględnie częściej dochodzi do wypadków przy pracy w budownictwie na terenie budowy nowych obiektów niż w czasie realizacji robót remontowych, rozbiórkowych i wyburzeniowych,
 - co druga osoba poszkodowana w wypadku przy pracy w budownictwie doznała ciężkich urazów w wyniku upadku z wysokości, a kolejnym bardzo często występującym skutkiem wypadku jest śmierć osoby poszkodowanej.
- Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że najbardziej prawdopodobny jest następujący scenariusz: do wypadku dochodzi podczas przemieszczania się pracownika po powierzchniach znajdujących się nad poziomem terenu. Dochodzi wówczas do poślizgnięcia, potknięcia się lub upadku osoby na elementy budynku i konstrukcji znajdujące się na poziomie terenu. W wyniku upadku poszkodowanego następuje zderzenie lub uderzenie o nieruchomy obiekt znajdujący się na poziomie terenu, które prowadzi do śmierci poszkodowanego.

10.6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania dotyczyły identyfikacji najczęściej powtarzających się scenariuszy wypadkowych. Aby takie scenariusze zidentyfikować, konieczna jest znajomość zdarzeń i okoliczności, w jakich dochodzi do każdego indywidualnego wypadku. Informacje takie znajdują się w protokołach powypadkowych sporządzonych przez inspektorów pracy. Zjawisko wypadkowości analizować można jako dyskretny proces dynamiczny, przebiegający według różnych scenariuszy. W tym celu opracowano oryginalny graficzno-matematyczny i informatyczny model procesowy, umożliwiający określenie przestrzeni możliwych scenariuszy wypadkowych. Do zamodelowania zjawiska wypadkowości zastosowano innowacyjną metodę opartą na analizie grafowej. Każdy wypadek znajdujący się w Informatycznej Bazie Danych ma swoją indywidualną ścieżkę w grafie, określoną na podstawie informacji zawartych w protokole powypadkowym. Poszczególne węzły grafu oznaczają konkretne okoliczności i konkretne zdarzenia związane z wypadkiem. Do pełnego opisu zjawiska konieczna jest znajomość relacji zachodzących między sąsiadującymi węzłami w grafie i relacji wskazujących, które węzły są ze sobą połączone. Informacji tej nie znajdziemy jednak w dostępnych bazach danych. Nie jest zatem możliwe określenie prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych scenariuszy tylko na podstawie informacji zawartych w bazie danych. Symulacja przebiegu wszystkich wypadków znajdujących się w Informatycznej Bazie Danych pozwala na obliczenie prawdopodobieństwa wystąpienia różnych scenariuszy wypadkowych. W tym celu

zastosowano nowe narzędzie do szybkiej analizy uzyskanych wyników – analizę grafową, która umożliwia automatyczną prezentację wyselekcjonowanych danych i szybkie ograniczanie wyników/zapytań w zależności od zadanych parametrów. Wyniki obliczeń wskazują na scenariusze o największym prawdopodobieństwie wystąpienia, a tym samym na okoliczności, w jakich dochodzi najczęściej do wypadków. Wiedza ta może stanowić podstawę do prowadzenia działań o charakterze profilaktycznym.

Zaproponowany model ma duże znaczenie dla praktyki budowlanej. Otrzymane wyniki badań stanowią podstawę do poprawy stanu bezpieczeństwa w budownictwie. Na podstawie dużego zbioru danych o wypadkach, zawartego w Informatycznej Bazie Danych, możliwe jest zbadanie wpływu na wypadkowość stosowanych w budownictwie technologii, rodzajów realizowanych obiektów budowlanych oraz stosowanych urządzeń. Uzyskane informacje stanowią bazę danych do szacowania ryzyka zawodowego, związanego z pracą w budownictwie.

Otrzymane wyniki badań w zakresie najbardziej niebezpiecznych obszarów budownictwa i najbardziej prawdopodobnych scenariuszy zdarzeń należy wykorzystywać w procesie nauczania i edukacji pracowników budowlanych. Większa świadomość dotycząca istnienia zagrożeń na stanowiskach pracy i wiedza dotycząca najbardziej niebezpiecznych zdarzeń wśród pracowników oznacza większe bezpieczeństwo pracowników i osób postronnych.

Znajomość okoliczności wypadków pozwala odpowiednio modyfikować przepisy prawa pracy, a także właściwie ukierunkować działania prewencyjne oraz szkolenia w zakresie bezpieczeństwa pracy, co z pewnością wpłynie na zmniejszenie liczby wypadków, a także znacznie przyczyni się do podniesienia poziomu bezpieczeństwa pracy w budownictwie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Chen Y., Shen S., Chen T., Yang R. (2014), *Path optimization study for vehicles evacuation based on Dijkstra algorithm*, Procedia Engineering, 71, 159–164.
- [2] Chu C., Liang G., Liao C. (2008), *Controlling Inventory by Combining ABC Analysis and Fuzzy Classifications*, Computers & Industrial Engineering, 55(4), 841–851.
- [3] Dhoka D., Choudary Y. (2013), *ABC Classification for Inventory Optimization*, Journal of Business and Management (IOSR-JBM), 15(1), 38–41.
- [4] Dijkstra E.W. (2022), *A note on two problems in connexion with graphs*, [in:] K.R. Apt, T. Hoare (eds), *Edsger Wybe Dijkstra: His Life, Work and Legacy*, 287–290.
- [5] European Statistics on Accident at Work ESAW (2013), *Summary methodology*, Eurostat Methodologies & Working Papers, European Union.

- [6] Główny Urząd Statystyczny (2021), *Wypadki przy pracy w 2020 r.*, Informacje Statystyczne, Warszawa – Gdańsk.
- [7] Hebda A. (2005), *Metoda techniczno-ekonomicznej oceny składników oraz uciążliwości ryzyka wystąpienia wypadków przy pracy w kopalniach węgla kamiennego*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
- [8] Heinrich H.W. (1959), *Industrial Accidents Prevention*, Mc Graw Hill Book Company, Inc., New York – Toronto – London.
- [9] Hoła B., Nowobilski T. (2019), *Analysis of the influence of socio-economic factors on occupational safety in construction industry*, Sustainability, 11(16), 4469, 1–12.
- [10] Hoła B., Szóstak M. (2019), *Modeling of the accidentality phenomenon in the construction industry*, Applied Sciences, 9(9), 1878, 1–16.
- [11] Hughes B., Newstead S., Anund A., Shu C., Falkmer T. (2015), *A review of models relevant to road safety*, Accident Analysis & Prevention, 74, 250–270.
- [12] Lehto M., Salvendy G. (1991), *Models of accident causation and their application: Review and reappraisal*, Journal of Engineering and Technology Management, 8(2), 173–205.
- [13] López-Soto D., Angel-Bello F., Yacout S., Alvarez A. (2017), *A multi-start algorithm to design a multi-class classifier for a multi-criteria ABC inventory classification problem*, Expert Systems with Applications, 81, 12–21.
- [14] Manu P., Ankrah N., Proverbs D., Suresh S. (2012), *Investigating the multi-casual and complex nature of the accident casual influence of construction project feature*, Accident analysis & Prevention, 48, 126–133.
- [15] Reason J. (1990a), *Human error*, Cambridge University Press, New York.
- [16] Reason J. (1990b), *The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 327(1241), Human Factors in Hazardous Situations, 475–484.
- [17] Rosita Y., Rosyida E., Rudiyanto M. (2019), *Implementation of Dijkstra algorithm and multi-criteria decision-making for optimal route distribution*, Procedia Computer Science, 161, 378–385.
- [18] Szóstak M. (2018), *Modelowanie rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław.
- [19] Szóstak M., Hoła B., Bogusławski P. (2021), *Identification of accident scenarios involving scaffolding*, Automation in Construction, 126, 103690.
- [20] Ustawa z dnia 30 października 2002 r. o ubezpieczeniu społecznym z tytułu wypadków przy pracy i chorób zawodowych (Dz.U. 2002, nr 199, poz. 1673 z późn. zm.).
- [21] Wang S. (2012), *The improved Dijkstra's shortest path algorithm and its application*, Procedia Engineering, 29, 1186–1190.

11. NARZĘDZIA WSPOMAGAJĄCE PRZEPROWADZANIE OCEN ŚRODOWISKOWYCH INWESTYCJI BUDOWLANYCH

Jolanta Harasymiuk¹, Elżbieta Szafranko²

11.1. WSTĘP

Problem ocen środowiskowych w procesach inwestycyjno-budowlanych był i jest dość szeroko opisywany w literaturze na całym świecie, zwłaszcza w Europie [16, 31], Stanach Zjednoczonych [32], Kanadzie [33, 40] i krajach Dalekiego Wschodu [20, 35, 45]. Zainteresowanie tym problemem jest z jednej strony naturalną konsekwencją degradacji środowiska w krajach wysoko uprzemysłowionych, a z drugiej – skutkiem wzrostu świadomości społeczeństw w zakresie ochrony zasobów środowiskowych. Pierwsza oficjalna wzmianka o ocenie oddziaływania na środowisko (OOS) pojawiła się w 1969 roku w amerykańskiej ustawie o narodowej polityce ekologicznej. Niedługo później, bo w 1972 roku, Australia i Nowa Zelandia również wprowadziły do swojego prawa zapisy o ocenach środowiskowych. Rok później regulacje dotyczące ocen w projektach, planach i programach publicznych wprowadziła Kanada, a w 1975 roku wzmianki na ten temat pojawiły się w prawie RFN. W 1985 roku oceną oddziaływania na środowisko zainteresowała się Europejska Wspólnota Gospodarcza. Obecnie OOS w 46 krajach świata stanowi część składową planowania inwestycyjnego, znajdując ponadto poparcie wśród międzynarodowych instytucji, takich jak Bank Światowy czy Europejski Bank Odbudowy i Rozwoju (EBOR). Nie dziwi zatem fakt, że na przestrzeni lat rozbudowie ulegał również pakiet metod i narzędzi wspomagających przeprowadzanie ocen środowiskowych. Wynikało to m.in. z:

- mnogości ocen środowiskowych, z którymi może mieć do czynienia inwestor planujący realizację inwestycji budowlanej,
- zróżnicowanego celu i zakresu merytorycznego ocen środowiskowych,
- mnogości oddziaływań rozpatrywanych w ramach ocen.

¹ Wydział Geoinżynierii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, e-mail: jolanta.harasymiuk@uwm.edu.pl.

² Wydział Geoinżynierii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, e-mail: elasz@uwm.edu.pl.

W procesach inwestycyjnych w budownictwie w Polsce zastosowanie znajdują różne oceny środowiskowe. Najbardziej rozpowszechniona jest ocena oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko oraz ocena oddziaływania na obszar Natura 2000. Analizy porównawczej tych ocen dokonano w pracy Harasymiuk [21]. Oprócz tego znaczenie może mieć również ponowna ocena oddziaływania na środowisko, której szczegółową charakterystykę podano w pracy Harasymiuk i Szafranko [24], oraz najmniej rozpoznana w badaniach transgraniczna ocena oddziaływania na środowisko [32, 52]. Ta ostatnia jest przeprowadzana w sytuacji, gdy realizacja inwestycji w danym państwie Unii Europejskiej może powodować znaczące transgraniczne oddziaływanie na środowisko, a jej istotnym elementem jest współpraca z państwem narażonym na takie oddziaływanie. Państwo pochodzenia inwestycji, przez właściwy organ ochrony środowiska (w Polsce jest to Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska), jest zobligowane w takiej sytuacji do powiadomienia strony narażonej o planowanej inwestycji i jej możliwym oddziaływaniu na środowisko w celu umożliwienia jej udziału w procedurze oceny oddziaływania na środowisko. O planowanej inwestycji powinna zostać poinformowana również opinia publiczna tych państw, w tym stowarzyszenia i organizacje, którym przysługuje prawo zgłaszania państwu pochodzenia inwestycji swoich uwag lub zastrzeżeń (również do przedłożonej dokumentacji oceny oddziaływania na środowisko). Decyzja końcowa dotycząca inwestycji powinna uwzględniać wyniki konsultacji prowadzonych przez strony oraz uwagi zgłaszane przez stronę narażoną na transgraniczne oddziaływanie (w tym jej opinię publiczną).

Każda z ocen środowiskowych wykazuje istotne różnice pod względem celu jej przeprowadzenia oraz zakresu merytorycznego wykonywanych analiz. Ocena oddziaływania na środowisko jest ukierunkowana na dostarczenie informacji na temat środowiskowych skutków realizacji inwestycji budowlanej, a ponowna ocena oddziaływania na środowisko – na upewnienie się, czy wprowadzone zmiany do pierwotnych założeń inwestycyjnych nie stoją w sprzeczności z warunkami określonymi w decyzji środowiskowej. Celem oceny transgranicznej jest kompleksowa ocena możliwych oddziaływań transgranicznych inwestycji przed rozpoczęciem jej realizacji. Najbardziej kateryczna w skutkach jest ocena oddziaływania na obszar Natura 2000. Ma być ona bowiem ukierunkowana na wykluczenie wystąpienia negatywnego, znaczącego oddziaływania inwestycji na ten obszar [25].

Wpływ inwestycji budowlanej na środowisko ocenia się w dwóch etapach: na etapie realizacji oraz eksploatacji przedsięwzięcia. Taki podział jest uzależniony przede wszystkim od warunków prowadzenia prac budowlanych. Można go podzielić na: wpływ bezpośredni i nieodwracalny (trwały) oraz pośredni i odwracalny. Zmianą bezpośrednią i nieodwracalną będzie: trwałe zajęcie terenu pod inwestycję, wpływ budowy na występujące tam ekosystemy oraz trwała zmiana krajobrazu, której towarzyszyć może również nieodwracalne przekształcenie stref przyległych. Zmiany pośrednie i odwracalne (bądź częściowo odwracalne) są związane z procesem

realizacji inwestycji, dojazdem na plac budowy ciężkich maszyn i urządzeń budowlanych, przerzucaniem mas ziemnych itp. Po zakończeniu budowy część przejściowo zajmowanych terenów może zostać przywrócona do poprzedniego użytkowania. Następstwem oddziaływań bezpośrednich mogą być również skutki wtórne, występujące w późniejszym okresie niż oddziaływania bezpośrednie. Skutki wtórne mogą dotyczyć zarówno fazy budowy, jak i poszczególnych oddziaływań. Na wtórne oddziaływania spowodowane zmianami powierzchni ziemi i gleby wpływają dodatkowo: struktura gruntu, skład chemiczny i biologiczny gruntu i gleby. Inny podział oddziaływań mówi o wpływach stałych i chwilowych. Oddziaływania związane z pracami budowlanymi (np. podwyższony poziom hałasu i zanieczyszczeń powietrza) można określić jako okresowe – krótkoterminowe i chwilowe. Oddziaływania związane z etapem eksploatacji wybudowanej inwestycji to oddziaływania stałe i długoterminowe. Złożonym merytorycznie zagadnieniem są również oddziaływania skumulowane, wywołane realizacją planowanego przedsięwzięcia oraz przedsięwzięć już zrealizowanych i planowanych do realizacji w zasięgu oddziaływania inwestycji [15].

Przegląd literatury (tab. 11.1) pokazuje, że w prowadzonych na świecie na przestrzeni ostatnich czterdziestu lat badaniach analizowanych było wiele problemów szczegółowych związanych z ocenami środowiskowymi inwestycji budowlanych. Wśród nich ważne miejsce zajmowała adekwatność metod, technik i narzędzi badawczych, stosowanych w poszczególnych etapach ocen środowiskowych. Niestety, do dnia dzisiejszego problem ten nie znalazł satysfakcjonującego rozwiązania w polskich przepisach i wytycznych metodycznych. Skutkiem takiego stanu rzeczy były badania podjęte przez autorki pracy. W ramach badań dokonano:

- analizy obecnego stanu wiedzy w zakresie metod, technik i narzędzi wspomagających prowadzenie ocen środowiskowych,
- doboru technik i narzędzi analitycznych do rozwiązania kluczowych problemów oceny oddziaływania na środowisko na przykładzie konkretnej inwestycji budowlanej.

Tabela 11.1

Zestawienie wybranych pozycji literatury

Nr	Tytuł, czasopismo	Autorzy	Rok
1	<i>Whole life cycle environmental impact assessment of buildings: Developing software tool and database support for the EU framework Level(s)</i> , Resources, Conservation & Recycling, 188, 106642.	De Wolf C., Cordella M., Dodd N., Byers B., Donatello S.	2023
2	<i>Method of Construction Projects' Classification Assessment in Poland and the Materials Solutions</i> , Sustainability, 14(7), 4277.	Harasymiuł J., Szafranko E.	2022

3	Whole-Life Carbon: Challenges and Solutions for Highly Efficient and Climate-Neutral Buildings, Buildings Performance Institute Europe, Brussels, Belgium	Building Performance Institute Europe	2021
4	<i>Fuzzy-based computational intelligence to support screening decision in environmental impact assessment: A complementary tool for a case-by-case project appraisal</i> , Environmental Impact Assessment Review, 85, 106446.	Bressane A., da Silva P.M., Fiore F.A., Carra T.A., Ewbank H., De-Carli B.P., da Mota M.T.	2020
5	<i>Assessment of the economic efficiency of energy-saving projects, methodology based on simple and compound methods</i> , Energy Science & Engineering, 10(2), 423–438.	Szafranko E.	2020
6	<i>Development of LCAByg: a national life cycle assessment tool for buildings in Denmark</i> , Earth and Environmental Science, 290(1), 012039.	Birgisdottir H., Rasmussen F.N.	2019
7	<i>A Life Cycle Assessment of Two Residential Buildings Using Two Different LCA Database-Software Combinations: Recognizing Uniformities and Inconsistencies</i> , Buildings, 9(1), 20.	Emami N., Heinonen J., Marteinson B., Säynäjoki A., Junnonen J.M., Laine J., Junnila S.	2019
8	<i>Environmental Impact Assessments in Investment Process – Legal and Methodological Aspects</i> , Journal of Ecological Engineering, 20(10), 79–87.	Harasymiuk J.	2019
9	<i>Methods of habitat reports' evaluation</i> , Open Engineering, 9(1), 26–33.	Harasymiuk J., Szafranko E.H., Tyburski J.	2019
10	<i>Assessment of direct and indirect effects of building developments on the environment</i> , Open Engineering, 9(1), 109–114.	Szafranko E.	2019
11	<i>Tourism impact assessment: A tool to evaluate the environmental impacts of touristic activities in Natural Protected Areas</i> , Tourism Management Perspectives, 28, 220–227.	Canteiro M., Córdova-Tapia F., Brazeiro A.	2018
12	<i>On the usefulness of guidelines and instructions for environmental assessment – a qualitative study of the helpfulness perceived by Polish practitioners</i> , Impact Assessment and Project Appraisal, 37(2), 150–164.	Tokarczyk-Dorociak K., Kazak J.K., Szewrański S., Haładyj A., Szkudlarek Ł., Chrobak G., Van Hoof J.	2018

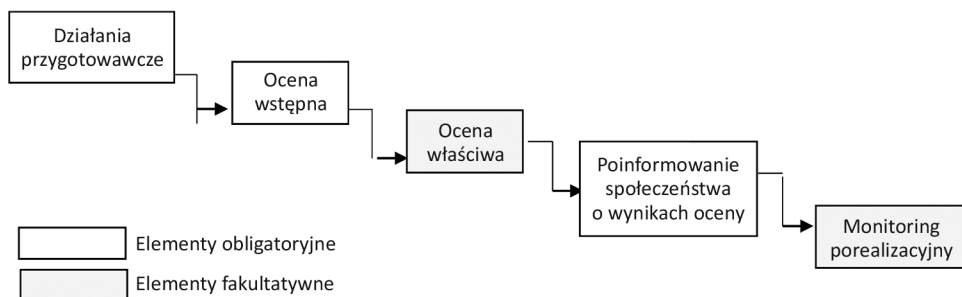
13	<i>Quality of the guidelines for preparation and review of environmental impact assessment reports in Pakistan</i> , Impact Assessment and Project Appraisal, 37(2), 139–149.	Hameed R., Nadeem O.	2018
14	<i>Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design</i> , Building and Environment, 133, 228–236.	Meex E., Hollberg A., Knapen E., Hildebrand L., Verbeeck G.	2018
15	<i>A review of life cycle assessment tools</i> , Dovetail Partners Inc., Minneapolis.	Hollerud B., Bowyer J., Howe J., Pepke E., Fernholz K.	2017
16	<i>An environmental life-cycle assessment of selected concrete recycling processes</i> , Czasopismo Techniczne, 10, 123–130.	Sobotka A., Sagan J.	2017
17	<i>Environmental product declarations entering the building sector: critical reflections based on 5 to 10 years' experience in different European countries</i> , The International Journal of Life Cycle Assessment, 20(9), 1199–1212.	Passer A., Lasvaux S., Allacker K., De Lathauwer D., Spirinckx C., Wittstock B., Wallbaum H.	2015
18	<i>The application of checklists in environmental studies in the field of road construction</i> , Building and Architecture, 13(1), 295–304.	Gałaś S., Bohatkiewicz J.	2014
19	<i>Wykorzystanie wielokryterialnej metody AHP i macierzy Leopolda do oceny wpływu eksploatacji złóż żwirowo-piaskowych na środowisko przyrodnicze doliny Jasiółki</i> , Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 30(2), 157–172.	Sobczyk W., Kowalska A., Sobczyk E.J.	2014
20	<i>Towards a new generation of building LCA tools adapted to the building design process and to the user needs?</i> , Sustainable Building, 406–417.	Lasvaux S., Gantner J., Schiopu N., Nibel S., Bazzana M., Bosdevigie B., Sibiude G.	2013
21	<i>Framework for detailed comparison of building environmental assessment tools</i> , Buildings, 3, 39–60.	Wallhagen M., Glaumann M., Eriksson O., Westerberg U.	2013
22	<i>Metody oceny oddziaływania przedsięwzięć inwestycyjnych na środowisko naturalne</i> , Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, 37(3), 107–115.	Strulak-Wójcikiewicz R., Łatuszyńska M.	2013

23	<i>Zrównoważone budownictwo a strategie UE</i> , BTA	Wall S.	2012
24	<i>Environmental decision-making under uncertainty using intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process (IF-AHP)</i> , Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23(1), 75–91.	Sadiq R., Tesfamariam S.	2009
25	<i>A critical review of building environmental assessment tools</i> , Environmental Impact Assessment Review, 28(7), 469–482.	Haapio A., Viitaniemi P.	2008
26	<i>Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices</i> , International Journal of Project Management, 25(3), 300–314.	Danilovic M., Browning T.R.	2007
27	<i>A decision support method for environmental impact assessment using a fuzzy logic approach</i> , Ecological Economics, 58(1), 170–181.	Boclin A.D.S.C., de Mello R.	2006
28	<i>Environmental systems analysis tools – an overview</i> , Journal of Cleaner Production, 13(12), 1165–1173.	Finnveden G., Moberg A.	2005
29	<i>Innowacyjne podejście do oceny oddziaływania inwestycji w infrastrukturę transportu na środowisko</i> , Handel Wewnętrzny, 5(352), 95–106.	Łatuszyńska M., Strulak-Wójcikiewicz R.	2004
30	<i>Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards</i> , The International Journal of Life Cycle Assessment, 7, 311–313.	Guinee J.B.	2002
31	<i>Comparison of currently available European LCA software</i> , The International Journal of Life Cycle Assessment, 2, 53–59.	Rice G., Clift R., Burns R.	1997
32	Environmental Impact Assessment edited by PADC Environmental Impact Assessment and Planning Unit University of Aberdeen United Kingdom. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Environmental Impact Assessment, Chateau de Bonas, Toulouse, France, August 30–September 12.	NATO Advanced Study Institute on Environmental Impact Assessment	1981

Źródło: oprac. własne

11.2. MODEL OCENY ODDZIAŁYWANIA NA ŚRODOWISKO

Proponowany model oceny środowiskowej dla przedsięwzięcia budowlanego ma charakter relacyjny i może być wykorzystany do ocen różnego rodzaju inwestycji. W modelu tym wyszczególniono takie elementy jak: działania przygotowawcze, ocena wstępna, ocena właściwa, poinformowanie społeczeństwa o wynikach oceny oraz monitoring. W realizacji tych elementów obowiązują relacje kolejnościowe, które określa graf skierowany. O przeprowadzeniu elementów fakultatywnych procesu oceny decyduje prawo (przedsięwzięcia zawsze znacząco oddziałujące na środowisko podlegają ocenie właściwej z mocy prawa) lub uprawniony organ (może podjąć decyzję o konieczności przeprowadzenia pełnej oceny dla inwestycji sklasyfikowanej wstępnie jako przedsięwzięcie potencjalnie znacząco oddziałujące na środowisko lub zdecydować o konieczności wykonania monitoringu porealizacyjnego w wydanej dla inwestycji decyzji środowiskowej). Realizacja każdego z elementów powinna być wspomagana przez zastosowanie różnych narzędzi, technik i metod badawczych o zweryfikowanej przydatności. Schemat uogólnionego modelu oceny środowiskowej zaprezentowano na rys. 11.1.



Rys. 11.1. Model oceny środowiskowej. Źródło: oprac. własne

11.3. PROPOZYCJA TECHNIK I NARZĘDZI WSPOMAGAJĄCYCH PRZEPROWADZENIE OCEN ŚRODOWISKOWYCH

W literaturze przedmiotu istnieje duża swoboda w klasyfikowaniu metod, technik i narzędzi badawczych odnoszących się do ocen środowiskowych. Część autorów prezentuje przykłady wykorzystania w takich ocenach różnych metod analizy ilościowej, w tym: analizy wielokryterialnej (MDM, MCM, MCDM, MADM), szacowania ważności kryteriów metodą porównania parami, metod punktowych czy skalaryzacji wagowo-punktowej [26, 36, 54]. Inni autorzy [46] zamiennie powołują się

na różne narzędzia badawcze, nazywając je metodami. Jeszcze inna grupa autorów koncentruje się na przybliżeniu możliwości wykorzystania w ocenach środowiskowych różnych narzędzi analitycznych [14, 15, 44].

W przeprowadzonych badaniach skupiono się na charakterystyce oraz ocenie tych technik i narzędzi, które mogą być zastosowane w każdym rodzaju oceny środowiskowej oraz przez różnych uczestników tego procesu (inwestora, właściwe organy administracji). Efektem przeprowadzonych badań jest również opracowany wzorec listy kontrolnej inwestycji (LKI), który może być wykorzystany do oceny kompletności dokumentacji środowiskowej inwestycji budowlanej.

Stosowanie listy kontrolnej polecane jest w przypadku działań złożonych, których realizacja wymaga koordynacji działań wielu osób [14]. Funkcjonują dwa podejścia do opracowywania list kontrolnych – na etapie przygotowawczym oraz na etapie kontroli wdrażanych rozwiązań. Niezależnie od podejścia, arkusz listy kontrolnej powinien zawierać logicznie uporządkowany i ustrukturalizowany zbiór pytań lub stwierdzeń, odniesionych do różnych zagadnień związanych z oceną środowiskową. Zbiór pytań jest stosowany jako pewnego rodzaju procedura, która polega na wykonywaniu konkretnych zaleceń, krok po kroku, często w zstępującym układzie. Zastosowanie takiej procedury ułatwia otrzymanie satysfakcjonującego rozwiązania oraz zapobiega pominięciu istotnych zagadnień. Celem stosowania listy kontrolnej jest zwiększenie prawdopodobieństwa uzyskania pożądanego efektów, np. w trakcie rozwiązywania problemu zawartości raportu środowiskowego lub karty informacyjnej przedsięwzięcia. Nie daje ona gwarancji otrzymania najlepszego wyniku, ale wspomaga proces rozwiązywania problemu optymalnej zawartości tych dokumentów i w dużym stopniu go porządkuje. Sprawia, że ostateczna wersja opracowania (karty informacyjnej przedsięwzięcia, raportu) może osiągnąć pożądaną zawartość merytoryczną.

Wykorzystanie narzędzia zarządzania jakością, jakim jest diagram przyczynowo-skutkowy, może pomóc w przeanalizowaniu poszczególnych przyczyn problemu oraz znalezieniu relacji pomiędzy problemami szczegółowymi.

Najistotniejszym elementem każdej oceny środowiskowej jest analiza wpływu inwestycji na różne komponenty środowiska (np. powietrze, wodę, glebę, formy ochrony przyrody itp.). W literaturze przedmiotu funkcjonuje wiele różnych metod oceny takich oddziaływań. Metodą pomocną w przeprowadzeniu oceny ważności kryteriów oceny oddziaływań na środowisko obiektów budowlanych może być opracowana przez T.L. Saatiego [42] metoda porównania kryteriów parami. Pozwala ona na głębszą analizę kryteriów i przez ich porównanie skuteczniejsze przypisanie im ważności w prowadzonych badaniach. Ze względu na fakt, że kryteria oceny oddziaływania na środowisko są często kryteriami niemierzalnymi lub trudno mierzalnymi, przypisanie im wartości bywa trudne, a bezpośrednia ich ocena wymaga często obszernego opisu skali lingwistycznej. Przeprowadzenie procesu porównania parami pozwala w sposób prosty wyznaczyć ich ważność. W niniej-

szym rozdziale, posilując się techniką porównywania kryteriów parami, dokonano oceny ważności czynników oceny oddziaływań na środowisko obiektu, jakim jest garaż wielostanowiskowy.

11.3.1. ZASTOSOWANIE LISTY KONTROLNEJ DO OCENY KOMPLETNOŚCI DOKUMENTACJI ŚRODOWISKOWEJ

W odpowiedzi na niedostatek wytycznych w zakresie doboru narzędzi do weryfikowania kompletności dokumentacji środowiskowej, przedkładanej przez inwestorów w ramach ocen środowiskowych, zaproponowano zastosowanie listy kontrolnej. Lista może być wykorzystywana do sprawdzenia jakości uzyskanych danych oraz kompletności zagadnień analizowanych w raporcie środowiskowym lub karcie informacyjnej przedsięwzięcia. Zdefiniowanie komponentów listy kontrolnej ma duże znaczenie dla inwestorów planujących inwestycje kwalifikowane z mocy prawa jako przedsięwzięcia potencjalnie znacząco oddziałujące na środowisko [22] lub przedsięwzięcia, które mogą znacząco oddziaływać na obszar Natura 2000. Od jakości informacji zawartych w karcie informacyjnej przedsięwzięcia (KIP) zależy bowiem, czy ocena oddziaływania na środowisko zakończy się na etapie ocenie wstępnej i wydaniu uproszczonej decyzji środowiskowej, czy też będzie wymagana pełna ocena z raportem środowiskowym i udziałem społeczeństwa na każdym etapie tej oceny. Tabela 11.2 prezentuje projekt arkusza listy kontrolnej inwestycji (LKI). Arkusz zawiera sześć podstawowych komponentów, które mają złożony i wieloaspektowy charakter. Każdy z komponentów jest uszczegóławiany przez dedykowany mu zestaw ponumerowanych pytań kontrolnych, mających na celu ustalenie, czy informacje zawarte w karcie informacyjnej przedsięwzięcia są wystarczające do podjęcia decyzji, a jeżeli nie – jakie dodatkowe informacje będą wymagane. Z uwagi na ograniczenia objętościowe pytania szczegółowe nie są prezentowane w pracy. Widoczne w tabeli 11.2 główne komponenty LKI nawiązują do prawnych kryteriów kwalifikacji inwestycji do oceny oddziaływania na środowisko (określonych w Ustawie o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (dalej: Ustawa OOS)). Są jednak bardziej precyzyjne i kompletne. Nawiązują również do wytycznych Komisji Europejskiej, dotyczących weryfikacji raportów ochrony środowiska (ROŚ). Widoczny w tabeli 11.2 ramowy układ LKI został przygotowany do oceny kompletności karty informacyjnej przedsięwzięcia przed złożeniem jej przez inwestora do uprawnionego organu. Karta została opracowana na zlecenie inwestora i dotyczyła inwestycji polegającej na budowie miejsc parkingowych naziemnych oraz miejsc parkingowych w garażach podziemnych dla zespołu dziewięciu projektowanych budynków mieszkalnych wielorodzinnych w Olsztynie. Obok inwestycji głównej, składającej się z budowy parkingów i garaży, w zakres infrastruktury towarzyszącej wchodziła budowa: dróg dojazdowych wewnętrznych,

chodników do komunikacji pomiędzy budynkami i miejscami parkingowymi naziemnymi oraz ciągów komunikacyjnych do garaży podziemnych.

Zakres prac obejmował również wykonanie instalacji technicznych, w tym wentylacyjnej, w garażach podziemnych, oświetlenia, odwodnienia i kanalizacji deszczowej.

Tabela 11.2

Projekt arkusza listy kontrolnej inwestycji (LKI)

Główne komponenty listy kontrolnej			Czy dany element został wyczerpująco opisany?	Jakie dodatkowe informacje są wymagane?
LK-A. Charakterystyka inwestycji				
LKI-A.1	Opis inwestycji	Czy precyzyjnie określono nazwę i adres przedsięwzięcia? Czy właściwie zidentyfikowano przedsięwzięcie z punktu widzenia przepisów budowlanych (rodzaj obiektu/ów budowlanych składających się na inwestycję) i środowiskowych (przedsięwzięcie zawsze lub potencjalnie znacząco oddziałujące na środowisko, inne)? Czy opisano ewentualne warianty inwestycyjne?		
LKI-A.2	Skala inwestycji	Czy określono podstawowe parametry techniczne inwestycji (powierzchnia nieruchomości gruntowych, na których realizowana będzie inwestycja, powierzchnia poszczególnych obiektów budowlanych – parkingi naziemne, garaże podziemne, drogi wewnętrzne, zjazdy, chodniki itp.)? Czy szczegółowo przeanalizowano wynikające z przepisów progi ilościowe dla wszystkich elementów inwestycji? Czy wskazano przewidywane wielkości emisji wynikające z funkcjonowania inwestycji (np. zużycie energii na oświetlenie miejsc garażowych i miejsc parkingowych naziemnych)?		

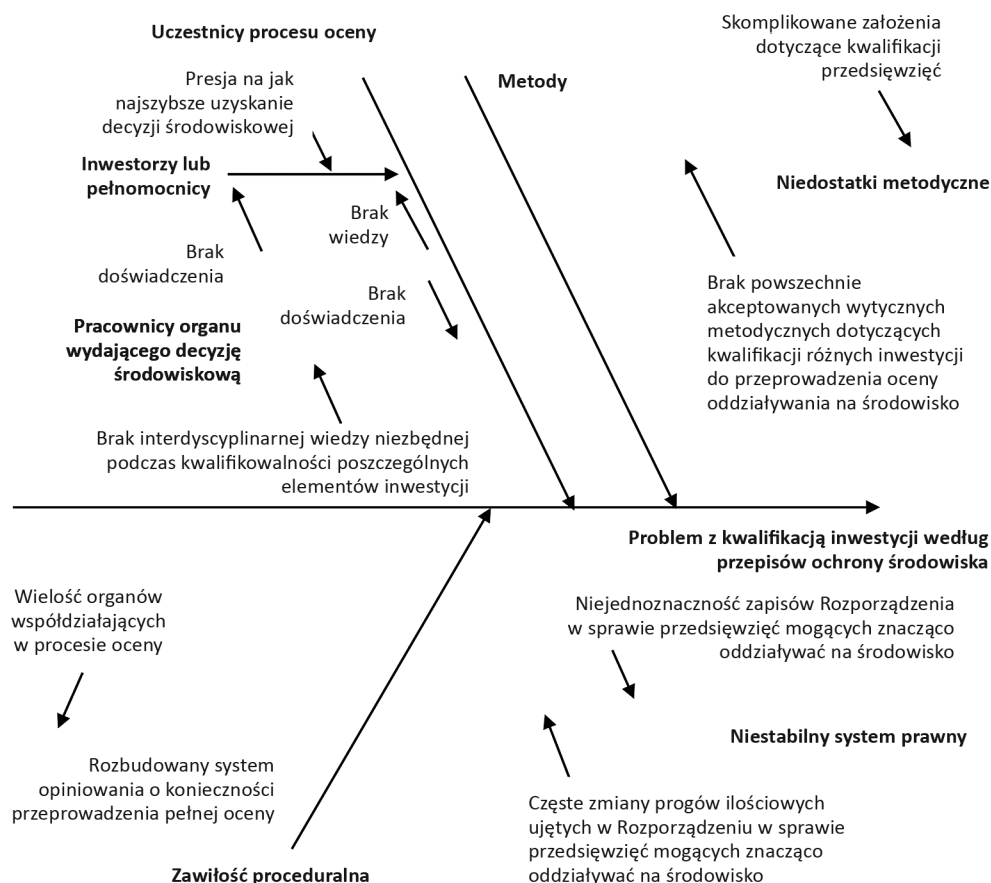
LKI-B. Usytuowanie inwestycji				
LKI-B.1	Podstawy prawne	Czy szczegółowo przeanalizowano wszystkie prawne uwarunkowania lokalizacyjne inwestycji?		
LKI-B.2	Lokalizacja przedsięwzięcia w wymiarze przestrzennym	Czy podano szczegółowe informacje o numerach ewidencyjnych działek, lokalizacji i najbliższym otoczeniu przedsięwzięcia?		
LKI-B.3	Lokalizacja przedsięwzięcia w wymiarze środowiskowym	Czy informacje o odległości przedsięwzięcia od prawnie chronionych obszarów i korytarzy ekologicznych są kompletne?		
LKI-C. Charakterystyka środowiska dotkniętego realizacją inwestycji				
LKI-C.1	Opis środowiska poddanego oddziaływaniu inwestycji	Czy szczegółowo scharakteryzowano wszystkie elementy środowiska dotknięte realizacją inwestycji?		
LKI-D. Oddziaływanie inwestycji				
LKI-D.1	Oddziaływanie przedsięwzięcia	Czy szczegółowo scharakteryzowano przewidywany wpływ na środowisko (np. na obszary wodno-błotne i inne obszary o płytkim zaleganiu wód podziemnych, strefy ochronne ujęć wód) i prognozowane możliwe skutki negatywne, które mogą wystąpić w różnych fazach realizacji inwestycji?		
LKI-D.2	Oddziaływanie transgraniczne	Czy stwierdzono możliwość wystąpienia oddziaływań o charakterze transgranicznym (bezpośrednich lub pośrednich)? Czy wykazano, że lokalizacja przedsięwzięcia oraz skala jej potencjalnych oddziaływań nie przekroczą minimalnej odległości do najbliższej granicy państwa polskiego?		

LKI-D.3	Oddziaływania skumulowane	Czy uwzględniono skumulowane oddziaływanie planowanego przedsięwzięcia z innymi przedsięwzięciami (istniejącymi lub planowanymi) w granicach terenu inwestycyjnego? Czy przy identyfikacji oddziaływań skumulowanych uwzględniono te, które będą miały powtarzalny i trwały charakter oraz będą występowały przez dłuższy czas? Czy wskazano adekwatne instrumenty w celu uniknięcia, minimalizacji bądź redukcji oddziaływań?		
LKI-E. Charakterystyka działań łagodzących				
LKI-E.1	Adekwatność działań łagodzących	Czy opracowanie zawiera zobowiązanie do łagodzenia skutków (w postaci programu)? Czy zaproponowany program działań łagodzących jest adekwatny do skali ingerencji inwestycji w środowisko?		
LKI-F. Merytoryczność opracowania				
LKI-F.1	Zgodność z wymaganiami	Czy opracowanie zawiera precyzyjnie określony cel oraz rzetelne wnioski mające oparcie w przeprowadzonych badaniach? Czy zawarto w nim źródła informacji stanowiących podstawę opracowania? Czy towarzyszy mu streszczenie w języku niespecjalistycznym informacji w nim zawartych? Czy wskazano kompetencje i doświadczenie członków zespołu autorskiego?		
LKI-F.2	Zwięzłość, przejrzystość opracowania	Czy opracowanie jest zwięzłe, wyczerpujące i obiektywne? Czy zostało napisane w sposób bezstronny?		

Źródło: oprac. własne

11.3.2. ZASTOSOWANIE DIAGRAMU PRZYZYNOWO-SKUTKOWEGO DO USTALENIA ŹRÓDEŁ DANEGO PROBLEMU

Do rozwiązania konkretnych problemów mających złożony charakter, również tych rozpatrywanych przy opracowywaniu KIP, mogą być zastosowane różne narzędzia zarządzania jakością, wspomagające proces analizy. Jednym z nich jest diagram przyczynowo-skutkowy. Diagram umożliwia graficzną prezentację powiązań między przyczynami danego problemu a ich hierarchią. Jego budowa ma strukturę hierarchiczną, która porządkuje w sposób logiczny czynności lub przyczyny związane z zaistniałym problemem. Przyczyny główne problemu zapisywane są na osiach skierowanych w kierunku osi głównej diagramu. Przyczyny pośrednie (szczegółowe) są połączone z przyczynami głównymi i stanowią ich rozwinięcie [8]. Na rys. 11.2 pokazano wykres przyczynowo-skutkowy, odniesiony do problemu



Rys. 11.2. Ogólny diagram przyczynowo-skutkowy dla problemu kwalifikowalności inwestycji według przepisów z zakresu ochrony środowiska. Źródło: oprac. własne

kwalifikowalności elementów przedsięwzięcia, polegającego na budowie miejsc parkingowych naziemnych i podziemnych według Rozporządzenia w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko.

Środowiskowa kwalifikacja inwestycji to skomplikowany proces, który jest realizowany zarówno przez inwestora (lub jego pełnomocnika) w ramach opracowywania raportu lub karty informacyjnej przedsięwzięcia, jak i przez organ prowadzący postępowanie administracyjne w sprawie oceny oddziaływania na środowisko. Jeżeli zakres rzeczowy planowanej inwestycji zawiera elementy, które można przypisać do przedsięwzięć ujętych w § 2 i 3 Rozporządzenia (odpowiednio: przedsięwzięcia zawsze i potencjalnie znacząco oddziałujące na środowisko), nie należy ich rozdzielać, tylko potraktować całą inwestycję jako przedsięwzięcie mogące zawsze znacząco oddziaływać na środowisko. Jeżeli planowana inwestycja ma cechy umożliwiające przypisanie jej do dwóch lub więcej kategorii w ramach jednego paragrafu, niezbędne jest określenie, do której kategorii Rozporządzenia należy przypisać inwestycję. Z mocy prawa, inwestycja polegająca na budowie parkingów i garaży może zostać zaliczona do przedsięwzięć potencjalnie znacząco oddziałujących na środowisko, o ile spełnia określone progi ilościowe. Próg ten został ustalony w § 3 ust. 1 pkt 56 lit. b następująco: „garaże, parkingi samochodowe lub zespoły parkingów (w tym na potrzeby planowanych, realizowanych lub zrealizowanych przedsięwzięć, o których mowa m.in. w pkt. 531), wraz z towarzyszącą infrastrukturą o powierzchni użytkowej nie mniejszej niż 0,5 ha na obszarach nie objętych formami ochrony przyrody”. Kwalifikowalności według progów ilościowych, określonych w Rozporządzeniu w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko, powinny podlegać również pozostałe elementy inwestycji (zabudowa mieszkaniowa wraz z towarzyszącą infrastrukturą, drogi wewnętrzne i sieci kanalizacyjne).

11.3.3. ZASTOSOWANIE TECHNIKI PORÓWNIANIA PARAMI DO OCENY WPŁYWU INWESTYCJI NA WYBRANY KOMPONENT ŚRODOWISKA

W przypadku budowy garaży i naziemnych miejsc parkingowych można mówić o różnych możliwych oddziaływaniach negatywnych. Jednym z nich jest oddziaływanie na klimat. W odpowiedzi na niedostatek wskazań w zakresie zastosowania konkretnych technik analitycznych, odniesionych do wpływu przedsięwzięcia na klimat, w pracy proponuje się zastosowanie technik porównania parami.

- **Określenie czynników oceny**

Obiekt ze względu na jego specyfikę może powodować wiele niedogodności oraz zagrożeń związanych z użytkowaniem, polegającym na intensywnym ruchu samochodowym (ponad 700 pojazdów). W tabeli 11.3 przedstawiono analizę kryteriów wpływu inwestycji na środowisko w trakcie eksploatacji.

Tabela 11.3

Ocena kryteriów wpływu obiektu na środowisko w trakcie eksploatacji

Lp.	Kryterium oceny przedsięwzięcia	Ocena (tak/nie)	Uzasadnienie
1	Czy przedsięwzięcie ogranicza obieg powietrza lub obszary otwarte?	Nie	Inwestycja będąca przedmiotem wniosku będzie realizowana na poziomie terenu lub pod powierzchnią terenu.
2	Czy przedsięwzięcie będzie pochłaniało lub generowało wysokie temperatury?	Nie	Parkingi zaprojektowano w pojedynczych szeregach, a nie w formie dużych placów (jak np. przy obiektach handlowych), co będzie ograniczało emisję temperaturę w czasie upałów.
3	Czy przedsięwzięcie będzie emitowało lotne związki organiczne oraz tlenki azotu i przyczyniało się do tworzenia ozonu troposferycznego w ciepłe, słoneczne dni?	Tak	Użytkowanie parkingów i garaży powoduje emisję tlenków azotu. Zawarte w karcie informacyjnej przedsięwzięcia obliczenia wskazują, że emisja ta nie przekracza standardów środowiskowych.
4	Czy przedsięwzięcie zakłada użytkowanie gruntów, zmianę sposobu użytkowania gruntów lub np. wylesianie, które mogą prowadzić do zwiększenia emisji?	Tak	Nastąpi zmiana obecnego sposobu użytkowania gruntów (tj. likwidacja nieużytku stanowiącego na całej powierzchni teren biologicznie czynny).
5	Czy przedsięwzięcie pociąga za sobą inne działania (np. zalesianie), które mogą służyć jako pochłaniacze emisji?	Tak	Zgodnie z przyjętą koncepcją realizacji całej zabudowy zachowana zostanie powierzchnia biologicznie czynna zgodnie z wymogami MPZP.
6	Czy przedsięwzięcie zwiększy zapotrzebowanie na energię i wodę do chłodzenia?	Tak	Zapotrzebowanie na energię do oświetlenia parkingów i garaży można ocenić jako relatywnie niewielkie.
7	Czy można będzie korzystać z odnawialnych źródeł energii?	Nie	Na obecnym etapie projektu nie przewidziano takich rozwiązań.
8	Czy przedsięwzięcie w znaczący sposób zwiększy lub zmniejszy liczbę podróży jednostek?	Tak	W układzie lokalnym dojazd do zaprojektowanej liczby mieszkań zwiększy natężenie ruchu na istniejącej ulicy dojazdowej.
9	Czy przedsięwzięcie w znaczący sposób zwiększy lub zmniejszy transport towarów?	Nie	Przedsięwzięcie nie ma charakteru produkcyjnego.
10	Czy przedsięwzięcie zwiększy zapotrzebowanie na wodę?	Nie	Użytkowanie parkingów nie wymaga zużycia wody.
11	Czy materiały użyte do budowy będą odporne na działanie wysokich temperatur?	Tak	Użyta zostanie kostka betonowa.

12	Czy zmieni się wydajność obecnych obszarów zalewowych w zakresie naturalnego radzenia sobie z powodzią?	Nie	Inwestycja nie będzie lokalizowana na obszarach zalewowych.
13	Czy zmieni się zdolność retencji powierzchniowego działu wodnego?	Tak	Inwestycja o planowanej skali zmieni zdolność retencyjną w układzie lokalnym, ale zmiana ta nie powinna wpłynąć znacząco na dział wodny. Wody opadowe i roztopowe będą odprowadzane do wód tego działu.
14	Czy zwiększy się ogólna emisja gazów szkodliwych do atmosfery?	Tak	Źródłem emisji gazów do atmosfery będą pojazdy korzystające z parkingów i dojeżdżające do garaży podziemnych. System wentylacyjny projektowanych garaży podziemnych, z wyprowadzeniem usuwanego powietrza na poziomie dachów, a więc na wysokości powyżej 15 m n.p.t., będzie istotnie ograniczał dla człowieka uciążliwość emisyjną z garaży podziemnych.
15	Czy eksploatowany obiekt będzie źródłem zwiększonego hałasu?	Tak	Źródłem hałasu komunikacyjnego będą pojazdy osobowe należące do mieszkańców projektowanych bloków. Źródłem hałasu instalacyjnego będzie wentylacja garaży podziemnych. Dla każdego garażu zaprojektowano wstępnie dwa kanały z wyrzutniami usytuowanymi na dachu budynków.
16	Czy inwestycja będzie źródłem emisji do wód i ziemi?	Tak	Eksploatacja parkingów i garaży nie będzie powodowała emisji ścieków bytowych ani przemysłowych. Obiekt będzie źródłem ścieków pochodzących z opadów atmosferycznych.

Źródło: oprac. własne na podstawie [50]

Zestawienie w tabeli 11.3 pokazuje, że nie wszystkie z przewidywanych oddziaływań będą występowały w trakcie eksploatacji obiektu. Te, których wystąpienie jest prawdopodobne, można podzielić na takie, których uciążliwość można zredukować, stosując określone rozwiązania techniczne (np. uciążliwość wentylacji mechanicznej może być zniwelowana przez zastosowanie urządzeń o niskich poziomach dźwięku), oraz takie, które trudno ograniczyć, np. ruch pojazdów osobowych jako źródło hałasu.

Analiza czynników pozwoliła na opracowanie listy kryteriów oceny oddziaływań inwestycji na środowisko w etapie eksploatacji: Należą do nich:

1. C1 – emisja lotnych związków azotu i spalin,
2. C2 – zmiana użytkowania gruntów,
3. C3 – zwiększenie zapotrzebowania na energię,
4. C4 – zwiększenie wskaźnika podróży i nasilenie ruchu pojazdów osobowych,
5. C5 – zmiana zdolności retencyjnej w układzie lokalnym,
6. C6 – zwiększenie emisji hałasu,
7. C7 – zwiększenie emisji do wód i ziemi.

Zdefiniowane w wyniku przeprowadzonej analizy czynniki mogą posłużyć ocenie oddziaływań na środowisko w różnych sytuacjach, np. przy porównaniu z innymi podobnymi obiektami lub przy ocenie wariantów rozwiązania, uwzględniających różne rozwiązania, np.: rozwiązania konstrukcyjne, układ komunikacyjny, rozwiązania wentylacyjne i instalacyjne. Aby dokonać ocen, należy ustalić, które z tych kryteriów są najważniejsze i mogą w najwyższym stopniu wpływać na ocenę całego przedsięwzięcia. W tym celu przeprowadzono porównanie ich parami.

- Ustalenie ważności kryteriów

Lista czynników oddziaływań została poddana testowaniu oraz weryfikacji przez specjalistów praktyków. W badaniach wykorzystano metodę wywiadu pogłębionego oraz metodę ankietową w celu uzyskania opinii ekspertów. W tabeli 11.4 zaprezentowano fragment ankiety, przedstawiający możliwość oceny przewagi kryterium C1 nad pozostałymi (od C2 do C7).

Tabela 11.4

Fragment ankiety służącej do porównania parami kryteriów oceny względnej ważności

Nr kryterium	9	7	5	3	1	-3	-5	-7	-9	Porównywane kryterium
C1										C2
										C3
										C4
										C5
										C6
										C7
										C8

Źródło: oprac. własne

Skala oceny w tabeli 11.4 obejmuje wartości dodatnie i ujemne: od -9 do +9. Skala została zaproponowana w oparciu o podstawy teoretyczne metody AHP, uwzględniającej również porównywanie badanych kryteriów parami. Zgodnie z założeniami tej metody [42] ocena 9 oznacza bardzo dużą przewagę ważności kryterium C1 nad porównywanym kryterium, a 1 takie

samo ich znaczenie. Przyjęto natomiast (w celu ułatwienia procesu gromadzenia danych od ekspertów), że wartości ujemne oznaczają zależność odwrotną, tzn. że kryterium C1 jest mniej ważne (skala obejmująca wartości od -1 do -9 oznacza również siłę przewagi). W podobny sposób porównuje się każde kolejne pytanie/kryterium z pozostałymi.

W wyniku przeprowadzonych badań dokonano analizy zaproponowanych pytań kontrolnych, traktowanych jako kryteria oceny, oraz ocenę ich ważności przez porównanie ich parami. Porównanie przeprowadzono w macierzy, którą tworzą wartości a_{ij} , równe dodatnim wartościom oceny uzyskanej z ankiet, oraz $1/a_{ij}$, stanowiące odwrotność tej oceny. Przez porównanie każdego kryterium z samym sobą przekątną macierzy utworzyły wartości równe 1. Macierz przedstawia formuła (11.1):

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} = 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} = \frac{1}{a_{12}} & a_{22} = 1 & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} = \frac{1}{a_{13}} & a_{32} = \frac{1}{a_{23}} & a_{33} = 1 & a_{34} \\ a_{41} = \frac{1}{a_{14}} & a_{42} = \frac{1}{a_{24}} & a_{43} = \frac{1}{a_{34}} & a_{44} = 1 \end{vmatrix} \quad (11.1)$$

Literatura [42] podaje formuły wymaganych obliczeń. W kolejnych krokach prowadzą one do ustalenia wartości wskaźnika priorytetu:

I. kalkulacja wartości znormalizowanej macierzy:

$$w_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (11.2)$$

II. określenie wektora priorytetów:

$$w_j = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} \quad (11.3)$$

gdzie:

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ij}}{n} \quad (11.4)$$

- Rozwiązanie problemu

Wyniki analizy, przeprowadzonej na podstawie danych uzyskanych drogą wywiadów i ankiet, przedstawiono w tabelach 11.5 i 11.6. Analiza wyników

oceny przez porównania parami pozwoliła ustalić ranking ważności kryteriów, obejmujących problematykę oddziaływania na środowisko badanego obiektu.

Tabela 11.5

Macierz porównań badanych pytań/kryteriów

Kryteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Suma a_{ij}
C1	1,00	7,00	5,00	3,00	5,00	1,00	3,00	25,00
C2	0,14	1,00	0,20	0,33	1,00	0,14	0,33	3,15
C3	0,20	5,00	1,00	0,33	1,00	0,14	1,00	8,67
C4	0,33	3,00	3,00	1,00	5,00	1,00	5,00	18,33
C5	0,20	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	1,00	4,60
C6	1,00	7,00	7,00	1,00	5,00	1,00	5,00	27,00
C7	0,33	3,00	1,00	0,20	1,00	0,20	1,00	6,73
Suma a_{ij}	3,21	27,00	18,20	6,06	19,00	3,68	16,33	93,48

Źródło: oprac. własne

Tabela 11.6

Macierz preferencji

Kryteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Suma w_{ij} w wierszach	Wektor priorytetów (suma w_{ij}/n)	Wektor priorytetów w_j [%]
C1	0,31	0,26	0,27	0,49	0,26	0,27	0,18	2,06	0,29	29,42
C1	0,04	0,04	0,01	0,05	0,05	0,04	0,02	0,26	0,04	3,69
C3	0,06	0,19	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,51	0,07	7,27
C4	0,10	0,11	0,16	0,16	0,26	0,27	0,31	1,39	0,20	19,80
C5	0,06	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05	0,06	0,36	0,05	5,08
C6	0,31	0,26	0,38	0,16	0,26	0,27	0,31	1,96	0,28	28,03
C7	0,10	0,11	0,05	0,03	0,05	0,05	0,06	0,47	0,07	6,72
Suma w_{ij}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	1,00	100,00

Źródło: oprac. własne

Ważność poszczególnych kryteriów w kolejności malejącej przedstawia poniższe zestawienie:

1. C1 – emisja lotnych związków azotu i spalin,
2. C6 – zwiększenie emisji hałasu,
3. C4 – zwiększenie wskaźnika podróży i nasilenie ruchu pojazdów osobowych,
4. C3 – zwiększenie zapotrzebowania na energię,
5. C7 – zwiększenie emisji do wód i ziemi,

6. C5 – zmiana zdolności retencyjnej w układzie lokalnym,
7. C2 – zmiana użytkowania gruntów.

Na trzech pierwszych miejscach tej listy znalazły się czynniki związane ze specyfiką obiektu, czyli funkcjonowaniem pojazdów korzystających z parkingu. W ankietach 89% respondentów wskazało, że te pytania są ważne lub bardzo ważne. Zaznaczenie tych zagadnień jako bardzo ważnych wskazuje na uciążliwości związane z budową garaży dla dużej liczby pojazdów. Pytania związane z bieżącą eksploatacją obiektu, czyli zapotrzebowaniem na energię i odprowadzenie ścieków, znalazły się w środkowej części listy rankingowej. Są to czynniki popularne w ocenach etapu użytkowania obiektów budowlanych. Na uwagę zasługuje fakt, że kryteria związane z oddziaływaniami na układ retencyjny i użytkowanie terenu znalazły się na końcu tej listy. Są to dwa czynniki, których oddziaływanie postrzega się w skali globalnej i w związku z tym grupy ekspertów zainteresowanych eksploatacją obiektu nie odczuwają tych zjawisk jako bardzo uciążliwych w bezpośrednim środowisku. Natomiast trzy pierwsze miejsca zajmują czynniki odbierane jako uciążliwości bezpośrednie, zarówno dla środowiska przyrodniczego, jak i społecznego.

11.4. PODSUMOWANIE

Ocena środowiskowa stanowi obecnie jeden z ważniejszych elementów etapu przygotowania inwestycji do realizacji. W krajach o długoletniej tradycji przeprowadzania ocen środowiskowych dla inwestycji budowlanych, w odniesieniu do poszczególnych etapów oceny, rekomendowane jest stosowanie różnych metod, technik i narzędzi (proceduralnych i analitycznych). W Polsce takie postępowanie nie jest regułą. Przeprowadzane oceny są często niekompletne i wykonywane pobieżnie, dlatego też autorki tego opracowania zwracają uwagę na konieczność dokonywania tych ocen z uwzględnieniem wszystkich etapów cyklu życia obiektu oraz z możliwością wykorzystania różnych metod, technik i procedur przy ich przeprowadzaniu.

Lista kontrolna może być przydatnym narzędziem w ocenie kompletności dokumentacji środowiskowej. Umożliwia sprawdzenie, czy wszystkie kluczowe kwestie i elementy zostały w danym dokumencie uwzględnione. Oceny ważności kryteriów oceny można natomiast dokonać, stosując metodę porównania parami. Jest to metoda wygodna, zwłaszcza gdy mamy do czynienia z czynnikami niemierzalnymi. Metoda ta pozwala uniknąć problemów związanych np. z przypisaniem wartości punktowych niektórym zjawiskom, co wydaje się niejednokrotnie nieobiektywne lub trudne do określenia.

W toku przygotowywania dokumentacji, stanowiącej podstawę oceny środowiskowej, mogą wystąpić różne problemy z kwalifikacją przedsięwzięcia wykazującego złożone oddziaływania na środowisko. Narzędziem pomocnym w identyfikowaniu przyczyn tych problemów może być diagram przyczynowo-skutkowy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Akerboom S., Craig R.K. (2022), *How law structures public participation in environmental decision making: A comparative law approach*, Environmental Policy and Governance, 32(3), 232–246.
- [2] Bar M.M., Jendrońska J., Lenart W. (2011), *Ocena oddziaływania na środowisko w inwestycji budowlanej*, Procedury prawa i sporządzanie raportów w procesie inwestycyjnym, Warszawa.
- [3] Birgisdottir H., Rasmussen F.N. (2019), *Development of LCAByg: A national Life Cycle Assessment tool for buildings in Denmark*, Earth and Environmental Science, 290(1), 012039.
- [4] Boclin A.D.S.C., de Mello R. (2006), *A decision support method for environmental impact assessment using a fuzzy logic approach*, Ecological Economics, 58(1), 170–181.
- [5] Bressane A., da Silva P.M., Fiore F.A., Carra T.A., Ewbank H., De-Carli B.P., da Mota M.T. (2020), *Fuzzy-based computational intelligence to support screening decision in environmental impact assessment: A complementary tool for a case-by-case project appraisal*, Environmental Impact Assessment Review, 85, 106446.
- [6] Buildings Performance Institute Europe (2021), *BPIE, Whole-Life Carbon: Challenges and Solutions for Highly Efficient and Climate-Neutral Buildings*, Brussels.
- [7] Canteiro M., Córdova-Tapia F., Brazeiro A. (2018), *Tourism impact assessment: A tool to evaluate the environmental impacts of touristic activities in Natural Protected Areas*, Tourism Management Perspectives, 28, 220–227.
- [8] Chądzyńska M., Klimecka-Tatar D. (2017), *Wykorzystanie narzędzia zarządzania jakością, jakim jest diagram Ishikawy na przykładzie małego przedsiębiorstwa kafeinowego*, Archiwum Wiedzy Inżynierskiej, 2(1), 20–22.
- [9] Danilovic M., Browning T.R. (2007), *Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices*, International Journal of Project Management, 25(3), 300–314.
- [10] De Wolf C., Cordella M., Dodd N., Byers B., Donatello S. (2023), *Whole life cycle environmental impact assessment of buildings: Developing software tool and database support for the EU framework Level (s)*, Resources, Conservation and Recycling, 188, 106642.
- [11] Emami N., Heinonen J., Marteinsson B., Säynäjoki A., Junnonen J.M., Laine J., Junnila S. (2019), *A life cycle assessment of two residential buildings using two different LCA database-software combinations: Recognizing uniformities and inconsistencies*, Buildings, 9(1), 20.

- [12] Environmental Impact Assessment edited by PADC Environmental Impact Assessment and Planning Unit University of Aberdeen United Kingdom. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Environmental Impact Assessment, Chateau de Bonas, Toulouse, France, August 30–September 12, 1981.
- [13] Feng L., Wu Q., Wu W., Liao W. (2020), *Decision-maker-oriented vs. collaboration: China's public participation in environmental decision-making*, Sustainability, 12(4), 1334.
- [14] Gałaś S., Bohatkiewicz J. (2014), *The application of checklists in environmental studies in the field of road construction*, Budownictwo i Architektura, 13(1), 295–304.
- [15] Gerlée A., Kaim K. (2011), *Metody oceny oddziaływań skumulowanych w procedurze OOS – wybrane zagadnienia*, Czasopismo Techniczne, 6-A, 107–111.
- [16] Glasson J., Therivel R. (2013), *Introduction to environmental impact assessment*, Routledge.
- [17] Goto Y., Miura H., Son D., Scholl I., Kriston L., Härter M., Arai H. (2021), *Association between physicians' and patients' perspectives of shared decision making in primary care settings in Japan: The impact of environmental factors*, Plos one, 16(2), e0246518.
- [18] Guinée J.B., Lindeijer E. (eds) (2002), *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*, 7, Springer Science & Business Media.
- [19] Hameed R., Nadeem O. (2019), *Quality of the guidelines for preparation and review of environmental impact assessment reports in Pakistan*, Impact Assessment and Project Appraisal, 37(2), 139–149.
- [20] Harashina S. (1988), *Environmental dispute resolution in road construction projects in Japan*, Environmental Impact Assessment Review, 8(1), 29–41.
- [21] Harasymiuk J. (2017), *Analiza wybranych procedur środowiskowych inwestycji budowlanych*, Inżynieria Ekologiczna, 18(4), 79–88.
- [22] Harasymiuk J. (2019), *Environmental Impact Assessments in Investment Process—Legal and Methodological Aspects*, Journal of Ecological Engineering, 20(10), 79–87.
- [23] Harasymiuk J., Szafranko E. (2022), *Method of Construction Projects' Classification for Habitat Assessment in Poland and the Problem of Choosing Materials Solutions*, Sustainability, 14(7), 4277.
- [24] Harasymiuk J., Szafranko E. (2022), *Ponowna ocena oddziaływania inwestycji budowlanej na środowisko*, Materiały Budowlane, 12, 79–81.
- [25] Harasymiuk J., Szafranko E., Tyburski J. (2019), *Methods of habitat reports' evaluation*, Open Engineering, 9(1), 26–33.
- [26] Hickethier G., Tommelein I.D., Hofmann M., Lostuvali B., Gehbauer F. (2011), *MDM as a tool for process improvement in building modelling*, 13th International

- Dependency And Structure Modelling Conference, DSM'11 Cambridge, Massachusetts, USA, September 14–15.
- [27] Hollerud B., Bowyer J., Howe J., Pepke E., Fernholz K. (2017), *A review of life cycle assessment tools*, Dovetail Partners Inc., Minneapolis.
 - [28] Kaproń M., Tworek J., Wall S. (2014), *Inicjatywy Unii Europejskiej kształtujące nowe ekologiczne wymagania dla producentów wyrobów budowlanych*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, 7(19), 47–57.
 - [29] Kim I., Lee J.H., Kwon H. (2021), *Participatory ecosystem service assessment to enhance environmental decision-making in a border city of South Korea*, Ecosystem Services, 51, 101337.
 - [30] Lasvaux S., Gantner J., Schiopu N., Nibel S., Bazzana M., Bosdevigie B., Sibiude G. (2013), *Towards a new generation of building LCA tools adapted to the building design process and to the user needs?*, Sustainable Building, 406–417.
 - [31] Łatuszyńska M., Strulak-Wójcikiewicz R. (2014), *Innowacyjne podejście do oceny oddziaływania inwestycji w infrastrukturę transportu na środowisko*, Handel Wewnętrzny, 5(352), 95–106.
 - [32] Makowski M. (2014), *Budowa pierwszej polskiej elektrowni jądrowej a ochrona środowiska Morza Bałtyckiego w świetle prawa międzynarodowego*, Prawo Morskie, 30, 235–250.
 - [33] Meex E., Hollberg A., Knapen E., Hildebrand L., Verbeeck G. (2018), *Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design*, Building and Environment, 133, 228–236.
 - [34] Morris P., Therivel R. (eds) (2001), *Methods of environmental impact assessment*, 2, Taylor and Francis.
 - [35] Murray C.C., Wong J., Singh G.G., Mach M., Lerner J., Ranieri B., Chan K. (2018), *The insignificance of thresholds in environmental impact assessment: An illustrative case study in Canada*, Environmental Management, 61(6), 1062–1071.
 - [36] Nadkarni R.R., Puthuvayi B. (2020), *A comprehensive literature review of Multi-Criteria Decision Making methods in heritage buildings*, Journal of Building Engineering, 32, 101814.
 - [37] Nakano K., Karube M., Hattori N. (2020), *Environmental impacts of building construction using cross-laminated timber panel construction method: A case of the research building in Kyushu, Japan*, Sustainability, 12(6), 2220.
 - [38] Passer A., Lasvaux S., Allacker K., De Lathauwer D., Spirinckx C., Wittstock B., Wallbaum H. (2015), *Environmental product declarations entering the building sector: critical reflections based on 5 to 10 years' experience in different European countries*, The International Journal of Life Cycle Assessment, 20(9), 1199–1212.

- [39] Przybyłowski P. (2005), *Podstawy zarządzania środowiskiem*, Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia.
- [40] Rice G., Clift R., Burns R. (1997), *Comparison of currently available european LCA software*, The International Journal of Life Cycle Assessment, 2(1), 53–59.
- [41] Saaty T.L. (2004), *Decision making – the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP)*, Journal of Systems Science and Systems Engineering, 13(1), 1–35.
- [42] Sadiq R., Tesfamariam S. (2009), *Environmental decision-making under uncertainty using intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process (IF-AHP)*, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23(1), 75–91.
- [43] Sauve G., Van Acker K. (2020), *The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making*, Journal of Environmental Management, 261, 110216.
- [44] Sobczyk W., Kowalska A., Sobczyk E.J. (2014), *Wykorzystanie wielokryterialnej metody AHP i macierzy Leopolda do oceny wpływu eksploatacji złóż żwirowo-piaskowych na środowisko przyrodnicze doliny Jasiołki*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 30(2), 157–172.
- [45] Sobotka A., Sagan J. (2017), *An environmental life-cycle assessment of selected concrete recycling processes*, Czasopismo Techniczne, 10, 123–130.
- [46] Strulak-Wójcikiewicz R., Łatuszyńska M. (2014), *Metody oceny oddziaływania przedsięwzięć inwestycyjnych na środowisko naturalne*, Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, 37(3), 107–115.
- [47] Suwanteep K., Murayama T., Nishikizawa S. (2016), *Environmental impact assessment system in Thailand and its comparison with those in China and Japan*, Environmental Impact Assessment Review, 58, 12–24.
- [48] Szafranko E. (2019), *Assessment of direct and indirect effects of building developments on the environment*, Open Engineering, 9(1), 109–114.
- [49] Szafranko E. (2022), *Assessment of the economic efficiency of energy-saving projects, methodology based on simple and compound methods*, Energy Science & Engineering, 10(2), 423–438.
- [50] Tokarczyk-Dorociak K., Kazak J.K., Szewrański S., Haładyj A., Szkudlarek Ł., Chrobak G., Van Hoof J. (2019), *On the usefulness of guidelines and instructions for environmental assessment – a qualitative study of the helpfulness perceived by Polish practitioners*, Impact Assessment and Project Appraisal, 37(2), 150–164.
- [51] Voytyuk O. (2022), *The Baltic Pipe and its impact on energy security in Central and Eastern Europe*, Polityka Energetyczna, 25(1), 89–108.
- [52] Wall S. (2012), *Zrównoważone budownictwo a strategię UE*, Budownictwo, Technologie, Architektura, 3(59), 50–53.

- [53] Zavadskas E.K., Turskis Z., Kildienė S. (2014), *State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods*, Technological and Economic Development of Economy, 20(1), 165–179.

12. METODA OCENY SOCJALNYCH WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH OBIEKTÓW MIESZKALNYCH

Aleksandra Radziejowska¹

12.1. WSTĘP

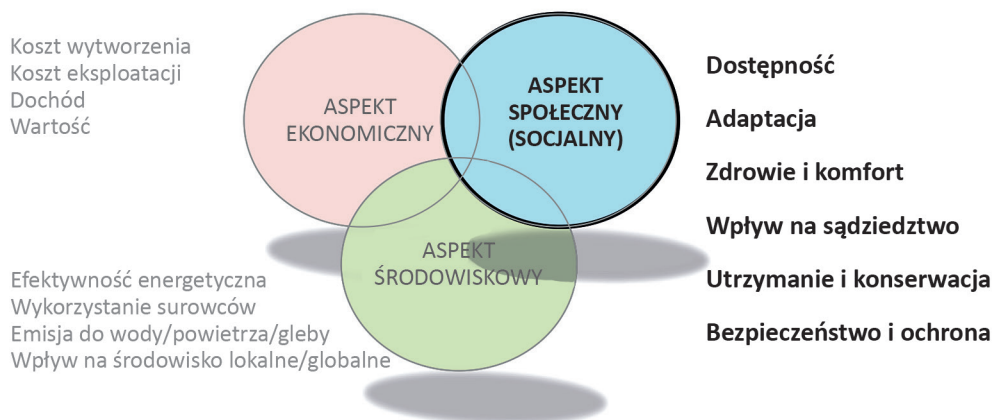
Budownictwo stanowi jeden z ważniejszych obszarów życia gospodarczego i społecznego, który w dużym stopniu wykorzystuje zasoby środowiska naturalnego i oddziałuje na otoczenie zarówno podczas produkcji budowlanej, której efektem są usługi i obiekty budowlane, jak i podczas ich eksploatacji. Budownictwo zajmuje istotne miejsce w działaniach zmierzających do realizacji założeń zrównoważonego rozwoju (ZR).

W licznych publikacjach przyjmuje się, że priorytetem budownictwa zrównoważonego jest ograniczenie zużycia energii i zużywania zasobów naturalnych, a także zmniejszenie produkcji odpadów i zanieczyszczeń z transportu materiałów budowlanych. Celem pośrednim wskazywanym w wyżej wspomnianych publikacjach jest ochrona zdrowia mieszkańców, stanowiąca korzyść społeczną (socjalną). Takie akcentowanie aspektów budownictwa zrównoważonego nie uwzględnia równoważności trzech podstawowych celów zrównoważonego budownictwa (ZB), tj. aspektu środowiskowego, ekonomicznego i socjalnego. Mając na uwadze fakt, że człowiek w naszej strefie klimatycznej spędza w mieszkaniu ok. 80% swojego życia, aspekt społeczny (zdrowie i komfort użytkowników) nabiera wyjątkowego znaczenia.

Rozwój współczesnego budownictwa jest uwarunkowany wdrażaniem innowacyjnych technologii i nowoczesnych rozwiązań, które będą łączyły korzystne efekty ekonomiczne z dbałością o zdrowie i komfort użytkowników. Należy dążyć do poprawy efektywności energetycznej budownictwa, zwłaszcza budynków mieszkalnych i obiektów użyteczności publicznej. Norma ISO 15392 wyodrębnia trzy aspekty (filary) zrównoważonego budownictwa: środowiskowy, socjalny (społeczny) i ekonomiczny. Na rys. 12.1 przedstawiono aspekty budownictwa zrównoważonego i ich główne cechy.

¹ Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: aradziej@agh.edu.pl.

ASPEKTY ZRÓWNOWAŻONEGO BUDOWNICTWA



Rys. 12.1. Trzy główne aspekty zrównoważonego budownictwa. Źródło: oprac. własne

Wśród wymienianych aspektów najmniej zbadany i opracowany jest aspekt społeczny. Na ogół analizy, które poruszają to zagadnienie, są ograniczone do ujmowania tylko części cech, jakie zawarte są w tym aspekcie. Brak jest opracowania przedstawiającego go w ujęciu całościowym. W normach międzynarodowych dotyczących aspektu socjalnego [30, 31] znaleźć można wytyczne do opracowania i wdrażania zasad, nie ma w nich jednak podanych sposobów oceny, jak i poziomów, klas lub standardów klasyfikacji budynków.

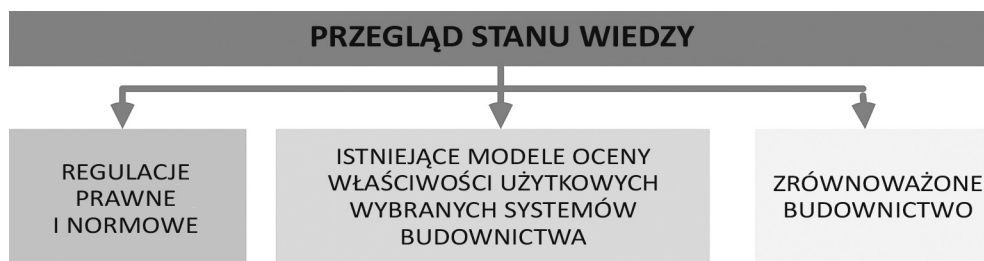
Ponadto, z analizy działalności organizacji zajmujących się zarządzaniem zasobami budynkowymi wynika, że fundusze przeznaczone na cele remontowe i modernizacyjne są często wydawane przypadkowo, mają charakter „wizerunkowy” i nie uwzględniają potrzeb społecznych (trzeciego filaru) budownictwa zrównoważonego. Prowadzona dotychczas polityka remontowa pokazuje, że warto pracować nad narzędziem uwzględniającym również potrzeby użytkowników, co może przyczynić się do lepszego planowania prac naprawczych i modernizacyjnych oraz poprawy polityki finansowej związanej z eksploatacją budynków mieszkalnych. Brak całościowego ujęcia tej problematyki i propozycji metody oceny socjalnej budynków był powodem podjęcia w tym zakresie badań i opracowania metody oceny socjalnych właściwości użytkowych obiektów mieszkalnych.

12.2. METODYKA BADAŃ

W dyscyplinach naukowych, związanych bezpośrednio z budownictwem oraz pokrewnych, spotkać można zagadnienia o różnym stopniu złożoności (jedno- i wielokryterialne). Najczęściej natura rozpatrywanego problemu decyzyjnego deter-

minuje jego wielokryterialność. W większości zagadnień zidentyfikować można kilka wariantów do rozpatrzenia, przy czym każdy z nich powinien być badany pod kątem wielu czynników go charakteryzujących. Zagadnienie prezentowane w niniejszym opracowaniu, również ze względu na liczną grupę kryteriów istotnych w procesie oceny aspektu socjalnego zrównoważonego budownictwa, należy do zagadnień analizy wielokryterialnej.

Należy zwrócić uwagę, że przedstawiane zagadnienie, dotyczące aspektu socjalnego, obejmuje szerokie spektrum wiedzy [m.in. 1, 6, 11, 29, 31]. Tematyka związana z utrzymaniem i oceną obiektów budowlanych wymaga dużej wiedzy eksperckiej z wielu dziedzin i dyscyplin naukowych, związanych z budownictwem, inżynierią środowiska, ekonomią, naukami o zarządzaniu, socjologią itp. Usystematyzowanie wiedzy potrzebnej do analizy omawianej tematyki podzielono na trzy główne zagadnienia (rys. 12.2).



Rys. 12.2. Zakres przeprowadzonego stanu wiedzy

W przepisach i normach znajdują się regulacje dotyczące utrzymania obiektów budowlanych. Wśród najważniejszych są m.in.: Ustawa Prawo Budowlane, Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, oraz serie norm: PN-ISO 15686, PN-EN 15643 i PN-EN 16309.

Spektrum zagadnień, jakie wchodzi w zakres zagadnienia oceny stopnia zużycia budynku, jest na tyle szerokie, że wydaje się niewyczerpanym źródłem analiz. Przegląd literatury [m.in. 2, 14, 20, 22, 23, 35, 36] wykazał wielokrotne podejmowanie tematu dotyczącego oceny stanu technicznego obiektów budowlanych. Wielu autorów [m.in. 8, 16–18, 24–26, 33, 34] zajmowało się również budową modeli wspomagających ocenę budynków, które uwzględniały np. stan funkcjonalny czy trwałość moralną, jednak nigdy w sposób kompleksowy.

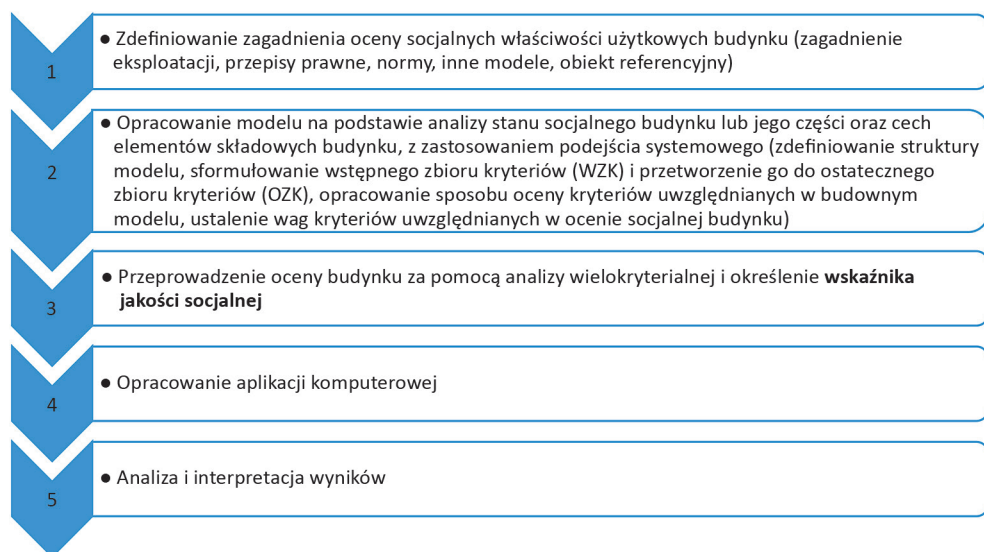
W literaturze można również spotkać wiele opracowań, w których przedstawiano propozycje metod oceny obiektów budowlanych w aspekcie zrównoważonego rozwoju (np. certyfikacje ZR, tj. [5, 9, 13, 21]), jednak w większości z nich najwięcej uwagi poświęca się jednemu z trzech głównych aspektów charakteryzujących ZB – środowisku.

W związku z tym problematyka przedstawiana w niniejszym opracowaniu skupia się na aspekcie socjalnym, który zgodnie z zasadami ZR jest tak samo ważny w ocenie zrównoważenia, a rozważając budynki mieszkalne wydaje się być najistotniejszy.

Z uwagi na charakter aspektu socjalnego, stanowiącego jeden z trzech głównych aspektów ZB, przeanalizowano opracowane normy i wdrażaną politykę, związaną ze zrównoważonym budownictwem. Zauważyć można, że normy w większości zawierają jedynie wykaz podstawowych kryteriów oceny obiektów i ogólne wytyczne ich oceny. W przypadku aspektu ekonomicznego i środowiskowego podane są także sposoby pomiaru poszczególnych czynników (kryteriów), natomiast brakuje ich w odniesieniu do aspektu socjalnego [31]. Ponadto w powyższej normie brakuje również czynników związanych z najbliższym otoczeniem budynku, które mają istotny wpływ na jakość życia jego mieszkańców, co zostało uwzględnione w przedstawianej metodzie oceny.

Przegląd literatury pozwolił stwierdzić, że w celu zachowania spójnej polityki ZB należy opracować narzędzie pozwalające na kompleksową ocenę każdego z filarów ZB. W związku z tym, że metody oceny aspektów zarówno środowiskowego, jak i ekonomicznego zostały już opracowane, istnieje potrzeba zbudowania funkcjonalnego narzędzia do kompleksowej oceny zrównoważenia ze względu na ostatni, równie ważny aspekt – aspekt socjalny.

W związku z tym proponuje się metodykę, która ma na celu opracowanie narzędzia wspomagającego właściciela lub zarządcę obiektu budowlanego w podejmo-



Rys. 12.3. Schemat postępowania przy opracowaniu oceny socjalnych właściwości użytkowych budynków

waniu decyzji związanych z zarządzaniem substancją mieszkaniową, uwzględniających potrzeby socjalne mieszkańców. Składające się na nią etapy przedstawiono na rys. 12.3.

Proponowana metodyka pozwala na identyfikację praktycznych i mierzalnych rozwiązań prosocjalnych w zakresie właściwego użytkowania i konserwacji istniejących obiektów mieszkalnych. Pozwala też na szczegółową ocenę socjalną analizowanego budynku i porównanie go z wyznaczoną uprzednio oceną budynku referencyjnego. Uzyskana różnica pozwala na wyznaczenie wskaźnika, pokazującego, jak duże są rozbieżności pomiędzy danym obiektem a wartością uzyskaną dla budynku referencyjnego, uwzględniającego aktualne przepisy techniczno-budowlane, współczesne rozwiązania logistyczne miast i osiedli, nowe technologie wznoszenia itp.

12.3. MODEL DECYZYJNY DLA ROZPATRYWANEGO ZAGADNIENIA

12.3.1. OBIEKT BUDOWLANY JAKO STRUKTURA SYSTEMOWA

W celu analizy (ustalenia) oceny socjalnej budynków mieszkalnych w dalszych rozważaniach obiekt budowlany będzie traktowany jako system. Definicja tego pojęcia zależy od obszaru (dyscypliny naukowej), zainteresowań oraz zastosowanego języka formalizacji. W opracowaniu przyjęto definicję systemu według Mario Bungego [7]. System można określić tylko wtedy, gdy zna się jego kompozycję C (zbiór jego części, tj. wyroby budowlane, komponenty, ustroje budowlane i budynek), jego otoczenie E i strukturę relacji S (tj. relacje między cechami budynku oraz budynku i jego otoczenia). W ontologii Bungego stanowi to punkt wyjścia do definicji pojęcia systemu.

Tak więc budynek mieszkalny postrzegany jest jako dynamiczny system, składający się ze zbioru różnych elementów, komponentów, dobranych w sposób celowy, mających spełnić określone wymagania stawiane przez właścicieli i użytkowników. Elementy te stanowią celowo zorientowaną jedną całość, mają pewne właściwości oraz znajdują się w określonych relacjach między sobą. Traktowanie w dalszych analizach budynku jako system niesie za sobą określone „skutki”. Takie założenie pozwoliło na przedstawianie badanych zjawisk i procesów w postaci modeli matematycznych, a następnie przeprowadzanie analizy za pomocą dostępnego aparatu matematycznego.

Ocena techniczna i funkcjonalna budynku nazwana została w niniejszym opracowaniu ekwiwalentem funkcjonalnym (EF) i wyraża wymagania eksploatacyjne, których sposób oceny przedstawiony jest w literaturze przedmiotu badań. Wśród ocenianych czynników znajdują się wymagania podstawowe zawarte w Rozporządzeniu [32]. Każda z ocenianych cech zawartych w EF oparta jest na analizie

procesu eksploatacji obiektu budowlanego, dla którego podstawą oceny jest książka obiektu budowlanego (KOB). Ekwiwalent funkcjonalny stanowi przedstawienie wymaganych właściwości technicznych i funkcjonalności budynku.

W proponowanej metodzie przyjmuje się obiekt odniesienia, tzw. obiekt referencyjny, który traktować należy jako hipotetyczny obiekt zaprojektowany zgodnie z obowiązującymi normami i powszechną praktyką oraz cechujący się takimi samymi parametrami technologicznymi, konstrukcyjnymi i użytkowymi jak budynek oceniany. Budynek referencyjny służy przeprowadzeniu obliczeń porównawczych z analizowanym obiektem.

Obiekt odniesienia stanowić tu będzie formę uproszczoną, w której zawarte są parametry niezbędne do przeprowadzenia procedur obliczeniowych, służących porównaniu go do badanego budynku. Utworzony obiekt referencyjny ma zatem wszystkie główne parametry analizowanego obiektu, co daje obraz, jak powinien wyglądać wzorcowy obiekt z pożądanymi wartościami parametrów. Co ważne, budynek referencyjny nie jest budynkiem „idealnym”, uzyskującym w ocenach tylko najwyższe noty. W praktyce budynkiem idealnym powinien być obiekt poddawany ocenie. To on ma stanowić jak najlepszy przykład realizacji, zgodnie z wszelkimi stawianymi mu wymogami (niekoniecznie prawnymi). Budynek referencyjny ma stanowić natomiast punkt odniesienia, który reprezentuje wszelkie wymogi, jakie stawia obecne prawo i przepisy budowlane.

Przeprowadzenie oceny socjalnej budynku w odniesieniu do obiektu referencyjnego może być realizowane tylko, gdy spełnione są wszystkie wymagania, jakie zawiera ekwiwalent funkcjonalny (dzięki temu posiadamy informację, że budynek nie stanowi zagrożenia i nie zostały przekroczone stany graniczne nośności). W związku z tym należy opisać główne elementy, z jakich składa się ekwiwalent funkcjonalny, wraz z ich przeznaczeniem i odpowiednimi szczegółowymi wymaganiami technicznymi. Dzięki wstępnemu określeniu wymagań zawartych w ekwiwalencie możliwe jest przeprowadzenie racjonalnej oceny socjalnych właściwości użytkowych analizowanego obiektu. Aspekt socjalny oceniany będzie z punktu widzenia użytkownika przez spełnienie aktualnych standardów i zapewnienie komfortu mieszkańców badanego obiektu.

12.3.2. ALGORYTM OCENY SOCJALNEJ BUDYNKÓW MIESZKALNYCH

Przyjęto, że wybrane cechy charakteryzujące budynek stanowią kryteria oceny. Dodatkowo, z uwagi na dużą liczbę kryteriów, zostały one pogrupowane w podkategorie i kategorie. Przedstawione w niniejszym rozdziale pogrupowanie zbioru kryteriów zostało dokonane zgodnie z proponowaną w normie [31] strukturą podziału. Ostatecznie przyjęto sześć kategorii głównych, z których każda uszczegółowiona została przez scharakteryzowane przez kryteria oceny podkategorie.

Na podstawie opisu kryteriów przyjęto wskaźniki ich oceny. Wskaźniki oceny, dla których nie istnieją regulacje prawne oraz wymagania klienta, ustalano na podstawie badań eksperckich, badań ankietowych lub stosując aparat matematyczny, np. logikę rozmytą (rys. 12.4).



Rys. 12.4. Ogólny schemat modelu i zastosowane techniki oraz narzędzia obliczeniowe.

Źródło: oprac. własne

Przyjęto, że jeśli wymagana cecha jest określona przez prawodawstwo i/lub przez wymagania użytkowników, ocenę tę ustala się przez najwyższe znane wymagania. Oznacza to, że jeżeli wymagania decydentów były wyższe niż obowiązujące przepisy, w ocenie uwzględniono stopień spełnienia wymagań użytkowników. Natomiast w przypadku gdy ocena socjalna opierała się na krajowych, lokalnych lub regionalnych przepisach lub zasadach, cechy i charakterystyki opisano w taki sposób, aby można było wykazać spełnienie lub ulepszenie tych zasad.

Ostatecznie w opracowanym modelu uwzględniono tylko podstawowe, najważniejsze elementy związane z kategoriami kryteriów K_i ($i = 1, 2, \dots, m$), opisującymi dany system (obiekt). Oceny socjalnych właściwości użytkowych dokonuje się przez ocenę każdej z nich. W celu dokładniejszego określenia zakresu danej kategorii K_i wyszczególniono podkategorie K_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n_i; i = 1, 2, \dots, m$), uszczegóławiające K_i ($i = 1, 2, \dots, m$). Każda z podkategorii jest oceniana przez kryteria K_{ijk} ($k = 1, 2, \dots, n_{ij}; j = 1, 2, \dots, n_i; i = 1, 2, \dots, m$).

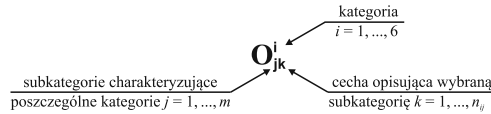
Ocena socjalna określana jest za pomocą wektora ocen uwzględnianych kategorii:

$$O = [O^1, O^2, \dots, O^i] \quad \text{dla} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12.1)$$

W celu formalnego opisanie każdej z ocen O^i macierzy stanu kategorii K_i o n_i składnikach (subkategoriach) ocenianych przez n_{ij} kryteriów, wprowadzono następującą macierz ocen:

$$O^i = [o_{j,1}^i, o_{j,2}^i, \dots, o_{j,k}^i] \quad \text{dla} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, n_{ij} \quad (12.2)$$

gdzie:



przy czym wartości $o_{j,n_{ij}}^i$ dla ostatnich n'_{ij} będą zerami, gdzie:

$$n_{ij} \text{ wartości indeksu } k, \quad n'_{ij} = \max_{1 \leq j \leq n_i} n_{ij} \quad (12.3)$$

$$n_i \text{ wartości indeksu } j, \quad n'_i = \max_{1 \leq i \leq m} n_i \quad (12.4)$$

Wartości ocen kryteriów określono na podstawie wiedzy ekspertów [27]. Do oceny rozpatrywanej cechy (kryterium), w zależności od stwierdzonego stanu istniejącego, finalnie przyjęto dyskretną skalę złożoną z pięciu poziomów (od 1 do 5). Przyjęta skala pozwoliła uwzględnić także wpływ czynników trudno mierzalnych.

Problem niejednakowej ważności uwzględnianych kryteriów, podkategorii i kategorii został wyeliminowany przez wprowadzenie tzw. wag korygujących wartości odpowiednio do wyrażonych przez eksperta preferencji [28]:

$$\lambda_{ijk} \in [0,1] \quad \text{przy czym} \quad \sum_{i=1}^m \lambda_{ijk} = 1, \quad \text{dla} \quad j = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, n_{ij} \quad (12.5)$$

W modelu przyjęto znormalizowane wartości wag od 0 do 1,0 (0,1 – mało ważne, ..., 1,0 – bardzo ważne) [19].

12.3.3. WYZNACZENIE BAZY KRYTERIÓW DO OCENY

Opracowanie kompleksowej bazy kryteriów oceny aspektu socjalnego stanowiło jeden z najtrudniejszych elementów opracowania. Różnorodność zakresu ocenianych charakterystyk wymagała wiedzy i badań z wielu dziedzin, wykonania badań wśród użytkowników i ekspertów oraz szczegółowej ich analizy. Ostatecznie zbudowano bazę kryteriów, składającą się z sześciu kategorii, podzielonych na łącznie 20 podkategorii, które ostatecznie opisywane są przez 59 kryteriów (tab. 12.1).

Tabela 12.1

Struktura zbioru kryteriów do oceny socjalnej budynków mieszkalnych

DOSTĘPNOŚĆ	K₁₁	Dojazd i dojście do obiektu i poruszanie się wewnątrz budynku, z uwzględnieniem osób o specjalnych potrzebach*	K₁₁₁	Podejście (dotarcie) do budynku, możliwość korzystania z obsługi komunikacji miejskiej
			K₁₁₂	Wejście do i poruszanie się wewnątrz budynku (np. klatki schodowe, windy, korytarze)
	K₁₂	Dostępność do usług infrastruktury wewnętrznej (mediów) oraz urządzeń technicznych, również z uwzględnieniem osób o specjalnych potrzebach	K₁₂₁	Wyposażenie w urządzenia sanitarne, sprawność (stan techniczny) tych urządzeń
			K₁₂₂	Wyposażenie w przełączniki i systemy sterujące – łatwość obsługi (np. ogrzewanie, rolety)
			K₁₂₃	Dostępność systemów elektronicznych lub mechanicznych w użytkowaniu mieszkania przez osoby o specjalnych potrzebach
			K₁₂₄	Wyposażenie budynku w systemy komunikacji, np. telefony, systemy informatyczne
	K₁₃	Kompozycja układu urbanistycznego otoczenia	K₁₃₁	Dostęp do usług podstawowych
			K₁₃₂	Dostępność (lokalizacja) obiektów użyteczności publicznej
			K₁₃₃	Bliskość terenów zielonych i rekreacyjnych
			K₁₃₄	Intensywność zabudowy i higiena przewietrzania

K_2	ADAPTACYJNOŚĆ	K_{21}	Zdolność dostosowania budynku do wymagań użytkowników	K_{211}	Łatwość zmiany usytuowania ścian działowych (możliwość zmiany układu pomieszczeń)
				K_{212}	Możliwość montażu dodatkowych urządzeń do transportu osób, w tym osób niepełnosprawnych (np. windy)
		K_{22}	Przystosowalność budynku do zmian infrastruktury technicznej	K_{221}	Łatwość dostępu i możliwość wymiany rur i kabli
				K_{222}	Zapas miejsca (powierzchni) dla montowania dodatkowych rur i kabli do wprowadzenia zmian technicznych
		K_{23}	Możliwość budynku/pomieszczenia do zmian sposobu użytkowania	K_{231}	Zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego
				K_{232}	Zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji obiektu budowlanego
				K_{233}	Zapewnienie warunków higieniczno-sanitarnych oraz ochrony środowiska
	ZDROWIE I KOMFORT	K_{31}	Komfort termiczny (regulacja wymiany powietrza i temperatury)	K_{311}	Możliwość regulacji temperatury w pomieszczeniu/budynku
				K_{312}	Możliwość sterowania wilgotnością powietrza
				K_{313}	Możliwość sterowania wentylacją
				K_{314}	Sterowalność klimatyzacją
		K_{32}	Jakość powietrza w pomieszczeniach	K_{321}	Stopień stężenia szkodliwych substancji stosowanych w materiałach konstrukcyjnych i wykończeniowych
				K_{322}	Stężenie CO ₂ , szkodliwych tlenków i pyłów
				K_{323}	Ryzyko rozwoju pleśni i grzybów
		K_{33}	Komfort akustyczny	K_{331}	Izolacja akustyczna od dźwięków wewnątrz budynków, np. instalacje wentylacyjne, sanitarne, odgłos kroków itp.
				K_{332}	Izolacja akustyczna od dźwięków z zewnątrz, np. dochodzących z sąsiednich budynków; od dźwięków powietrznych, tj. samochodów, samolotów, elektrowni wiatrowych

ZDROWIE I KOMFORT	K_{34}	Komfort wizualny	K_{341}	Dostęp do (udział) światła dziennego	
			K_{342}	Występowanie zjawiska olśnienia i wizualne połączenie ze światem zewnętrznym	
			K_{343}	Jakość oświetlenia sztucznego i możliwość sterowania intensywnością światła	
	K_{35}	Cechy przestrzenne mieszkań	K_{351}	Liczba i powierzchnia wszystkich pokoi/osobę	
			K_{352}	Liczba i powierzchnia WC, łazienek, kuchni/osobę	
			K_{353}	Wysokość pomieszczeń	
			K_{354}	Liczba i wymiary (długość, szerokość, wysokość) komunikacji wewnętrznej mieszkań (hole, podesty, schody, korytarze)	
			K_{355}	Pomieszczenia przynależne i pomieszczenia wspólne	
			K_{356}	Liczba i powierzchnia balkonów, tarasów lub ogrodu	
WPŁYW NA SĄSIEDZTWO	K_4	K_{41}	Emitowany hałas	K_{411}	Emitowany poziom ciśnienia akustycznego
				K_{412}	Izolacja akustyczna
		K_{42}	Emisje zanieczyszczeń na zewnątrz	K_{421}	Szkodliwe cząstki dymu i kurzu
				K_{422}	Uciążliwy zapach
				K_{423}	Uwalnianie niebezpiecznych substancji do wód gruntowych i/lub powierzchniowych
		K_{43}	Oddziaływanie wizualne na sąsiedztwo	K_{431}	Dzienny (i/lub) nocny blask/Przesłanianie
UTRZYMANIE I KONSERWACJA	K_5	K_{51}	Okresowe prace konserwacyjne	K_{511}	Częstotliwość regularnych konserwacji (np. mycie okien, elewacji, klatek schodowych, malowanie klatki, konserwacja windy, odśnieżanie...)
				K_{512}	Bezpieczeństwo użytkowników podczas prowadzenia prac
				K_{513}	Łatwość konserwacji
		K_{52}	Prace remontowo-modernizacyjne	K_{521}	Częstotliwość/konieczność prowadzenia prac remontowo-modernizacyjnych
				K_{522}	Możliwość użytkowania budynku podczas wykonywania prac remontowo-modernizacyjnych

OCHRONA I BEZPIECZEŃSTWO	K_6	K_{61}	Odporność na zmiany klimatu	K_{611}	Odporność na deszcz i powódzie
				K_{612}	Odporność na wiatr (szczelność, trwałość elewacji)
				K_{613}	Odporność na ciężar i intensywne opady śniegu (np. okapy, drenaż, konstrukcja dachu, szczelność)
	K_{62}	Odporność na oddziaływania losowe		K_{621}	Odporność na trzęsienia ziemi (tąpnięcia)
				K_{622}	Odporność na wybuchy
				K_{623}	Bezpieczeństwo pożarowe obiektów budowlanych
				K_{624}	Odporność na oddziaływania dynamiczne zewnętrzne
	K_{63}	Bezpieczeństwo i ochrona użytkowników przed intruzami i wandalizmem		K_{631}	Oświetlenie dróg dojazdowych
				K_{632}	Bezpieczne składowanie odpadów
				K_{633}	Bariery przed wtargnięciem ruchu celowego
				K_{634}	Zastosowane systemy alarmowe i monitoring
	K_{64}	Ochrona przed przerwami w dostawach		K_{641}	Obecność urządzeń zapasowych do ogrzewania i produkcji energii elektrycznej
				K_{642}	Możliwość bezpiecznego przemieszczania się mieszkańców wewnątrz budynku i ewakuacji w przypadku awarii energii elektrycznej

12.3.4. DEFINIOWANIE STRUKTURY SYSTEMU I JEGO MODELU

W proponowanej metodzie budynek oceniany jest ze względu na kryteria pogrupowane w podkategorie, które przyporządkowane są do sześciu głównych kategorii (tab. 12.1). Ocenę socjalną wyrażono wskaźnikiem jakości socjalnej analizowanego obiektu. Zbiór wyrażonych w liczbach ocen częściowych budynku nazwano jego charakterystyką użyteczności socjalnej lub oceną socjalną (społeczną).

W metodzie założono tę samą skalę zmiany cechy i przyjęto dyskretną, schodkową ocenę cech: pięciostopniową, gdzie 5 – oznacza ocenę najwyższą, a 1 – najniższą. Stosując oceny kwalifikowane O^i , dla $i = 1, \dots, m$, otrzymuje się macierz blokową oceny aspektu socjalnego $\mathbf{O}$ oraz przyporządkowaną dla niej macierz blokową wag Λ :

$$O = [O^1, O^2, \dots, O^m] \quad (12.6)$$

$$\Lambda = [L^1, L^2, \dots, L^m] \quad (12.7)$$

Stosując oceny kwalifikowane o_{jk} , dla $j = 1, \dots, n_j$, dla $k = 1, \dots, n_{ij}$, otrzymuje się macierz oceny każdej z uwzględnianych kategorii O^i oraz przyporządkowaną dla niej macierz wag Λ^i :

$$O^i = \begin{bmatrix} o_{1,1}^i & \cdots & o_{1,n_{ij}}^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{n_i,1}^i & \cdots & o_{n_i,n_{ij}}^i \end{bmatrix} \quad (12.8)$$

$$\Lambda^i = \begin{bmatrix} \lambda_{1,1}^i & \cdots & \lambda_{1,n_{ij}}^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{n_i,1}^i & \cdots & \lambda_{n_i,n_{ij}}^i \end{bmatrix} \quad (12.9)$$

W celu uzyskania jednolitego wskaźnika oceny w procesie analizy wielokryterialnej stosować można jedną z wielu procedur agregacji. W pracy do zrealizowania celu analizy użyto metody wskaźników syntetycznych, a dokładniej wskaźnika sumacyjnego skorygowanego.

Proces optymalizacji polega więc na znalezieniu wartości (oceny, jakości) analizowanego budynku ze względu na aspekt socjalny zrównoważonego budownictwa i porównanie go z równoległe wykonaną oceną dla budynku referencyjnego. Uzyskana wartość oceny socjalnej badanego budynku, przy jednoczesnej ocenie budynku referencyjnego, pozwala wskazać najsłabsze strony analizowanego obiektu z punktu widzenia użytkownika, co pozwoli w przyszłości podejmować właściwe decyzje dotyczące poprawy komfortu jego użytkowania. Ocenę można przeprowadzać zarówno dla całego budynku, jak i pojedynczych lokali w nim się znajdujących, np. podczas chęci oszacowania ich wartości rynkowej w aspekcie udogodnień dla użytkowników.

12.3.5. USTALENIE WAG KRYTERIÓW OCENY NA PODSTAWIE BADAŃ ANKIETOWYCH

Badania przeprowadzono przez realizację bezpośrednich badań ankietowych wśród użytkowników mieszkań w dwóch województwach oraz badania ankietowe wśród ekspertów z dziedziny budownictwa.

Zakres badań obejmował:

1. W badaniach ankietowych przeprowadzonych wśród użytkowników:
 - a) przygotowanie formularzy do przeprowadzenia ankiet,

- b) przeprowadzenie bezpośrednich badań ankietowych wśród użytkowników mieszkań,
 - c) sprawdzenie zróżnicowania wartości współczynnika zmienności uzyskanych wyników ankiet, czego wynikiem było odrzucenie wyników odstających,
 - d) przetworzenie uzyskanych wyników przy zastosowaniu miary centralnej tendencji, tj. średnią arytmetyczną.
2. W badaniach ankietowych przeprowadzonych wśród ekspertów:
- a) dobranie odpowiedniej grupy eksperckiej,
 - b) przygotowanie formularzy do przeprowadzenia ankiet,
 - c) przeprowadzenie badań ankietowych wśród ekspertów,
 - d) sprawdzenie zgodności opinii sędziowskich (eksperskich),
 - e) przetworzenie uzyskanych wyników przy zastosowaniu miar statystycznych.

W modelu zdecydowano się na pozostawienie stałych wartości wag ocenianych cech. Decyzja ta podyktowana była umożliwieniem późniejszego porównywania różnych budynków oraz wprowadzeniem klasyfikacji gwiazdkowej dla obiektów mieszkalnych (podobnej do klasyfikacji udogodnień hotelowych).

12.3.6. WSKAŹNIK JAKOŚCI SOCJALNEJ BUDYNKU

Obliczenie oceny agregacyjnej przeprowadza się równoległe dla dwóch obiektów:

- dla analizowanego budynku ocenę w czasie t :

$$\mathbf{O}_D(t) = \sum_{i=1}^6 \mathbf{O}_C^i \cdot \mathbf{L}_C^i \quad (12.10)$$

- i analogicznie dla obiektu referencyjnego:

$$\mathbf{O}_R(t) = \sum_{i=1}^6 \mathbf{O}_C^{iR} \cdot \mathbf{L}_C^i \quad (12.11)$$

Następnie obie wielkości skalarnie są ze sobą porównywane przez obliczenie różnicy $\Delta_{R+D}(t)$ pomiędzy socjalną wartością użytkową budynku referencyjnego a socjalną wartością użytkową (rzeczywistą) budynku w badanym czasie t . Różnica, a następnie iloraz różnicy oceny socjalnej obiektu badanego do socjalnej wartości użytkowej obiektu referencyjnego wynoszą:

$$\Delta_{R+D}(t) = \mathbf{O}_R(t) - \mathbf{O}_D(t) \quad (12.12)$$

$$\delta = \frac{\Delta_{R+D}(t)}{\mathbf{O}_R(t)} \cdot 100\% \quad (12.13)$$

gdzie:

$O_R(t)$ – socjalna wartość użytkowa budynku referencyjnego w czasie t ,

$O_D(t)$ – socjalna wartość użytkowa analizowanego budynku w czasie t .

Rozbieżność pomiędzy oceną rozpatrywanego obiektu mieszkalnego a obiektem referencyjnym ostatecznie przedstawiana jest w skali procentowej. Rozbieżność przedstawiona wzorem (12.13) świadczy o stopniu socjalnej przystosowalności analizowanego obiektu (o stopniu spełniania przez obiekt właściwości socjalnych szczególnie opisanych w poprzednich rozdziałach), nazywanej w pracy **wskaźnikiem jakości socjalnej**.

Wynik interpretowany jest przez graniczne stopnie spełnienia socjalnych właściwości użytkowych analizowanego budynku (lub lokalu mieszkalnego). Po przekroczeniu wartości granicznych przyznawane są kolejne gwiazdki (świadczące o standardzie i udogodnieniach), tak jak w systemie oceny usług hotelowych, co pozwala na klasyfikację budynków (lokali) mieszkalnych ze względu na ich standard socjalny (tab. 12.2). Autorka uważa, że taki sposób oceny mógłby w przyszłości wspomagać proces szacowania wartości nieruchomości podczas jej sprzedaży lub wynajmu.

Tabela 12.2

Proponowana klasyfikacja budynku/mieszkania ze względu na stopień spełnienia właściwości socjalnych

Ocena budynku (liczba gwiazdek)	Stopień spełnienia socjalnych właściwości użytkowych $\delta = \frac{\Delta_{R+D}(t)}{O_R(t)} \cdot 100\%$
5	$\delta < 0$
4	$0,0\% \leq \delta < 20\%$
3	$20\% \leq \delta < 40\%$
2	$40\% \leq \delta < 60\%$
1	$\delta \geq 60\%$

Dodatkowo, niski stopień spełnienia właściwości socjalnych (1 lub 2 gwiazdki) może być również wskazaniem do wykonania remontu lub modernizacji w celu podniesienia wartości nieruchomości. Szczegółowa ocena socjalna pozwala na proste wskazanie najsłabiej ocenionych cech budynku, co umożliwi podjęcie właściwych kroków w celu ich zniwelowania.

12.4. IMPLEMENTACJA MODELU DO APLIKACJI KOMPUTEROWEJ WRAZ Z PREZENTACJĄ PRZYKŁADU

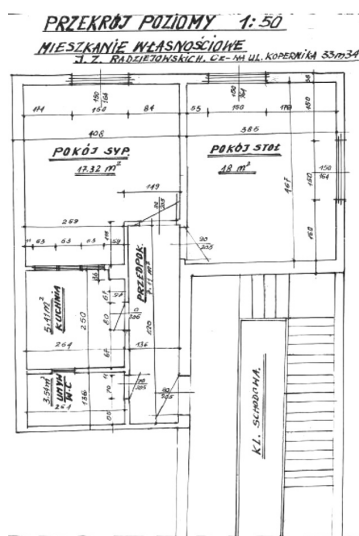
W celu prezentacji oraz weryfikacji sposobu działania metody oceny socjalnych właściwości użytkowych budynków mieszkalnych (wskaźnika jakości socjalnej) opracowano aplikację komputerową o nazwie **SocBuilding**, dostępną na stronie internetowej (<https://socbud-8b0b6.firebaseio.com/dashboard>), pozwalającą przeprowadzać ocenę zarówno budynków, jak i pojedynczych lokali mieszkalnych.

Program został opracowany w językach Typescript – framework Angular i Firebase. Typescript jest rozszerzeniem języka JavaScript, opartym na projektowaniu obiektowym. Tworzenie aplikacji w językach obiektowych jest obecnie jednym z najbardziej wydajnych sposobów rozwijania aplikacji dostępnych online. Dzięki Typescript – Angular można z łatwością uruchamiać program za pomocą przeglądarki internetowej również na platformach mobilnych. Firebase jest natomiast narzędziem analitycznym również służącym aplikacjom mobilnym i umożliwiającym zarządzanie aplikacją. W programie zostało ono użyte jako hosting oraz posłużyło do tworzenia bazy danych.

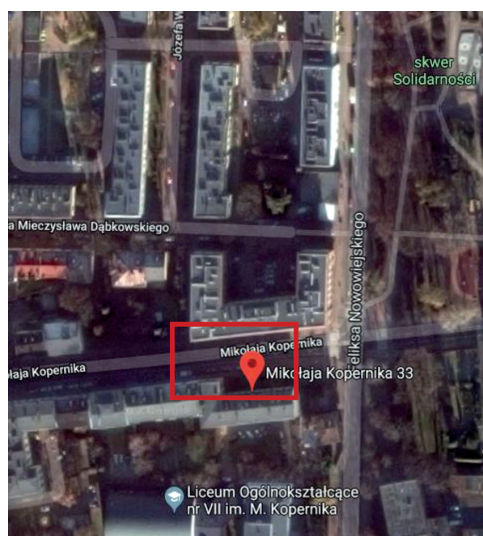
Program wyświetla podsumowanie oceny zarówno w formie liczbowej w odniesieniu do obiektu referencyjnego, jak i idealnego (ocena maksymalna 5,0), ale także w formie graficznej w postaci sieci pajęczej (rys. 12.8), przedstawiającej stopień spełnienia poszczególnych sześciu kategorii. Dodatkowo w programie zawarto również częściowe wykresy sieci pajęczej dla każdej z kategorii (rys. 12.7), co dokładnie pozwala zaobserwować najsłabiej ocenione cechy w badanym obiekcie. Może być to pomocne podczas poszukiwania działań, mających na celu podniesienie oceny wskaźnika jakości socjalnej budynku.

W procesie weryfikacji opracowanej metody przeprowadzona została m.in. ocena socjalna wybranego lokalu w budynku mieszkalnym. Wielorodzinny budynek mieszkalny, w którym znajduje się badany lokal, zlokalizowany jest w jednym z miast w województwie śląskim. Wskazany lokal jest mieszkaniem dwupokojowym, znajdującym się na trzecim piętrze, z wejściem przez dwie klatki schodowe budynku (od ulicy i od podwórka). Dokumentacja projektowa budynku jest dostępna w urzędzie miasta. Rozkład i lokalizacja mieszkania przedstawione zostały na rys. 12.5 i 12.6. Budynek został wybudowany w latach 50. XX wieku w technologii tradycyjnej, nie posiada windy, zlokalizowany jest w ścisłym centrum miasta. Budynek zasilany jest we wszystkie media z sieci miejskiej.

W celu dokonania oceny socjalnych (społecznych) właściwości użytkowych należy przeprowadzić wizję lokalną, zebrać niezbędne informacje od mieszkańców o lokalu mieszkalnym i jego otoczeniu. Uzyskane dane stanowią podstawę dokonania ocen cząstkowych z wykorzystaniem skal ocen przedstawionych w poprzednich rozdziałach.



Rys. 12.5. Rozkład mieszkania



Rys. 12.6. Lokalizacja budynku mieszkalnego w centrum miasta

Po przeprowadzeniu wizji lokalnej danego obiektu oraz zebraniu informacji od lokatorów o mieszkaniu i otoczeniu budynku ustalono wartości kryteriów charakteryzujących każdą z sześciu kategorii (tab. 12.3–12.8).

Tabela 12.3

Uzyskane oceny lokalu według podkryteriów kategorii K_1 Dostępność

Podkategorie		Kryteria		Ocena o_{jk}^1
K_{11}	Dojazd, dojście do obiektu i poruszanie się wewnątrz budynku, z uwzględnieniem osób o specjalnych potrzebach	K_{111}	Podejście (dotarcie) do budynku, możliwość korzystania z obsługi komunikacji miejskiej	4
		K_{112}	Wejście do budynku i poruszanie się wewnątrz obiektu	2
K_{12}	Dostępność do usług infrastruktury wewnętrznej (mediów) oraz urządzeń technicznych, z uwzględnieniem osób o specjalnych potrzebach	K_{121}	Wyposażenie w urządzenia sanitarne, funkcjonalność tych urządzeń	2
		K_{122}	Wyposażenie w przełączniki i systemy sterujące – łatwość obsługi	2
		K_{123}	Dostępność systemów elektronicznych lub mechanicznych w użytkowaniu mieszkania przez osoby o specjalnych potrzebach	1
		K_{124}	Wyposażenie budynku w systemy komunikacji, np. telefony, systemy informatyczne	4

K₁₃	Kompozycja układu urbanistycznego otoczenia	K₁₃₁	Dostęp do usług podstawowych	5
		K₁₃₂	Dostępność (lokalizacja) obiektów użyteczności publicznej	5
		K₁₃₃	Bliskość terenów zielonych i rekreacyjnych	5
		K₁₃₄	Intensywność zabudowy i higiena przewietrzania	4

Tabela 12.4

Uzyskane oceny lokalu według podkryteriów kategorii **K₂ Adaptacyjność**

Subkategorie		Kryteria		Ocena o_{jk}^2
K₂₁	Zdolność dostosowania budynku do wymagań użytkowników	K₂₁₁	Łatwość zmiany usytuowania ścian działowych (możliwość zmiany układu pomieszczeń)	4
		K₂₁₂	Możliwość montażu dodatkowych urządzeń do transportu osób, w tym osób niepełnosprawnych (np. windy)	4
K₂₂	Przystosowalność budynku do zmian infrastruktury technicznej budynku	K₂₂₁	Łatwość dostępu i możliwość wymiany rur i kabli	4
		K₂₂₂	Zapas miejsca (powierzchni) dla montowania dodatkowych rur i kabli do wprowadzenia zmian technicznych	4
K₂₃	Możliwość dostosowania budynku do zmian sposobu użytkowania	K₂₃₁	Zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego	2
		K₂₃₂	Zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji obiektu budowlanego	3
		K₂₃₃	Zapewnienie warunków higieniczno-sanitarnych oraz ochrony środowiska	2

Tabela 12.5

Uzyskane oceny lokalu według podkryteriów kategorii **K₃ Komfort i zdrowie**

Subkategorie		Kryteria		Ocena o_{jk}^3
K₃₁	Komfort termiczny	K₃₁₁	Możliwość regulacji temperatury w pomieszczeniu/budynku	2
		K₃₁₂	Możliwość regulacji wilgotności powietrza	
		K₃₁₃	Możliwość sterowania wentylacją	
		K₃₁₄	Sterowalność klimatyzacją	
K₃₂	Jakość powietrza w pomieszczeniach	K₃₂₁	Stopień stężeń substancji stosowanych w materiałach konstrukcyjnych i wykończeniowych	5

	K_{322}	Stężenie CO ₂ , szkodliwych tlenków i pyłów	5
	K_{323}	Ryzyko rozwoju pleśni i grzybów	4
K_{33} Komfort akustyczny	K_{331}	Izolacja akustyczna od dźwięków wewnątrz budynków	4
	K_{332}	Izolacja akustyczna od dźwięków z zewnątrz	
K_{34} Komfort wizualny	K_{341}	Dostęp do (udział) światła dziennego	4
	K_{342}	Występowanie zjawiska olśnienia i wizualne połączenie ze światem zewnętrznym	4
	K_{343}	Jakość oświetlenia sztucznego i możliwość sterowania intensywnością światła	3
K_{35} Cechy przestrzenne mieszkań	K_{351}	Liczba i powierzchnia wszystkich pokoi/osobę	5
	K_{352}	Liczba i powierzchnia WC, łazienek, kuchni/osobę	3
	K_{353}	Wysokość pomieszczeń	5
	K_{354}	Liczba i wymiary (długość, szerokość, wysokość) komunikacji wewnętrznej mieszkań (hole, podesty, schody, korytarze)	5
	K_{355}	Pomieszczenia przynależne i pomieszczenia wspólne	4
	K_{356}	Liczba i powierzchnia balkonów, tarasów lub ogrodu	1

Tabela 12.6

Uzyskane oceny lokalu według podkryteriów kategorii K_4 *Wpływ na sąsiedztwo*

Subkategorie		Kryteria		Ocena o_{jk}^4
K_{41} Emitowany hałas	K_{411}	Emitowany poziom ciśnienia akustycznego		4
	K_{412}	Izolacja akustyczna		4
K_{42} Emisje zanieczyszczeń na zewnątrz	K_{421}	Szkodliwe cząstki dymu i kurzu		3
	K_{422}	Uciążliwy zapach		4
	K_{423}	Uwalnianie niebezpiecznych substancji do wód gruntowych i/lub powierzchniowych		3
K_{43} Oddziaływanie wizualne na sąsiedztwo	K_{431}	Dzienny (i/lub) nocny blask/Przesłanianie		3

Tabela 12.7

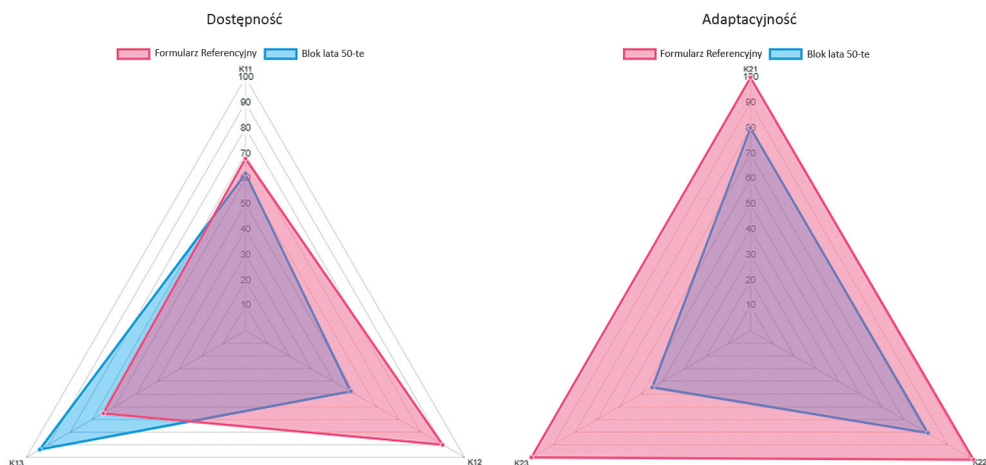
Uzyskane oceny lokalu według podkryteriów kategorii K_5 *Utrzymanie i konserwacja*

Subkategorie	Kryteria		Ocena o_{jk}^5
K_{51} Okresowe prace konserwacyjne	K_{511}	Częstotliwość i czas trwania regularnej konserwacji	3
	K_{512}	Bezpieczeństwo użytkowników i zakłócenia podczas prowadzenia prac	3
	K_{513}	Łatwość konserwacji	3
K_{52} Prace remontowo-modernizacyjne	K_{521}	Częstotliwość prac remontowo-modernizacyjnych	3
	K_{522}	Możliwość użytkowania budynku podczas wykonywania prac remontowo-modernizacyjnych	3

Tabela 12.8

Uzyskane oceny lokalu według podkryteriów kategorii K_6 *Bezpieczeństwo i ochrona*

Subkategorie	Kryteria		Ocena o_{jk}^6
K_{61} Odporność na zmiany klimatu	K_{611}	Odporność na deszcz i odporność przeciwpowodziowa	3
	K_{612}	Odporność na wiatr	3
	K_{613}	Odporność na ciężar i intensywne opady śniegu	5
K_{62} Odporność na oddziaływania losowe	K_{621}	Odporność na trzęsienia ziemi (tąpnięcia)	5
	K_{622}	Odporność na wybuchy	4
	K_{623}	Bezpieczeństwo pożarowe obiektów budowlanych	3
	K_{624}	Odporność na oddziaływania dynamiczne zewnętrzne	4
K_{63} Bezpieczeństwo i ochrona użytkowników przed intruzami i wandalizmem	K_{631}	Oświetlenie dróg dojazdowych	3
	K_{632}	Bezpieczne składowanie odpadów	3
	K_{633}	Bariery przed wtargnięciem ruchu	4
	K_{634}	Zastosowane systemy alarmowe i monitoring	2
K_{64} Ochrona przed przerwami w dostawach	K_{641}	Obecność urządzeń zapasowych	1
	K_{642}	Możliwość bezpiecznego przemieszczania się mieszkańców wewnątrz budynku i ewakuacji w przypadku awarii energii elektrycznej	1



Rys. 12.7. Przykładowy arkusz wyników oceny w aplikacji SocBuilding w zakresie wybranych kategorii

Analizowany lokal oceniono według poszczególnych kryteriów przy zastosowaniu odpowiednio dobranych wcześniej skal ocen. Następnie, uwzględniając wagę poszczególnych kryteriów, podkategorii i kategorii, obliczono wskaźniki ocen dla każdej podkategorii i kategorii. Ostatnim etapem pełnej agregacji ocen było wyznaczenie wskaźnika sumacyjnego skorygowanego (O_D) dla otrzymanych w poprzednich obliczeniach wartości wektora ocen.

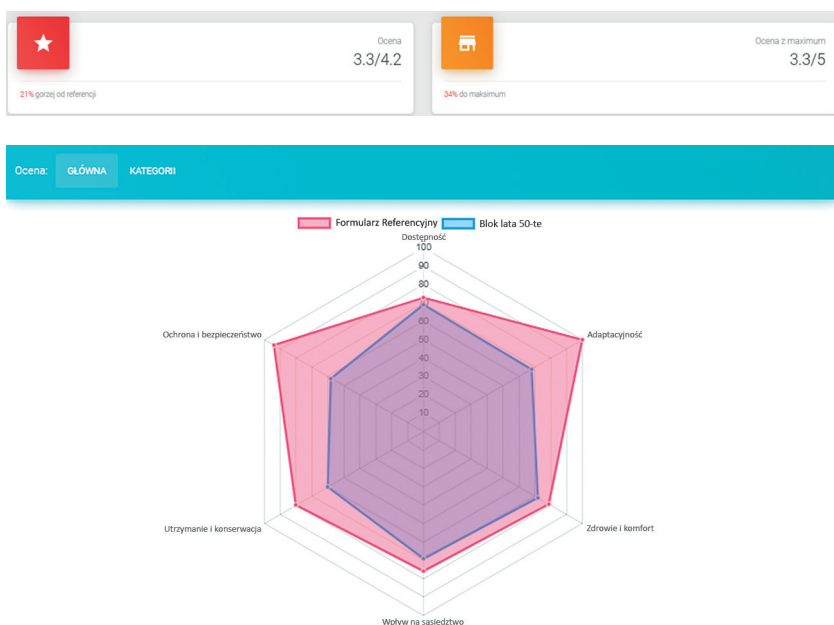
$$O_D = 3,484 \cdot 0,155 + 3,40 \cdot 0,194 + 3,635 \cdot 0,215 + 3,463 \cdot 0,136 + 3,00 \cdot 0,136 + 2,90 \cdot 0,163 = 3,333$$

Wynik ten należy przyrównać do oceny obiektu referencyjnego, dla którego obliczenia dały wartość O_R równą 4,2. Otrzymane wielkości skalarne wstawiono do wzorów (12.3) i (12.4), uzyskując poniższy wynik:

$$\Delta_{R+D}(t) = 4,200 - 3,333 = 0,867$$

$$\delta = \frac{0,867}{4,200} \cdot 100\% = 20,65\%$$

Stosując opracowany program komputerowy (rys. 12.8), przedstawiono wyniki oceny badanego lokalu mieszkalnego, w którym uzyskano ocenę $O_c = 3,333$, co w porównaniu do lokalu referencyjnego z oceną: $O_R = 4,2$ daje wartość wskaźnika jakości socjalnej równą $\delta = 20,65\%$. Taki wynik pozwala przydzielić jedynie ocenę końcową (liczbę gwiazdek) 3 w klasyfikacji przedstawionej w tabeli 12.2. W oknach programu widoczne są również dla wszystkich kategorii i podkategorii wyniki ocen cząstkowych, co w przejrzysty sposób informuje użytkownika o stopniu spełnienia szczegółowych wymagań w nich zawartych.



Rys. 12.8. Arkusz wyników oceny w aplikacji SocBuilding dla badanego lokalu

12.5. PODSUMOWANIE

Przedstawiony model oceny oraz przeprowadzona analiza wykazały, jak złożony jest proces określania socjalnych właściwości użytkowych budynku. Postępująca różnica pomiędzy stopniami spełnienia preferowanych przez użytkowników właściwości użytkowych budynku a wymaganiami prawnymi, normowymi jest procesem trwałym i naturalnym. Brak modeli teoretycznych, pozwalających na określanie wartości użytkowej aspektu socjalnego oraz prognozy zachowania się obiektu w przyszłości, sprawia, że stan budynków oceniany jest przede wszystkim na podstawie doznań wizualnych, a także wniosków z okresowych przeglądów technicznych. Ponadto, z powodu braku pogłębionej analizy socjalnych właściwości użytkowych budynku, często podejmowane są działania, które nie wpływają na poprawę komfortu jego użytkowania.

Proponowana metoda oceny socjalnych właściwości użytkowych budynków mieszkalnych miała na celu usystematyzowanie wiedzy związanej z cechami charakteryzującymi ten aspekt. Zakres zastosowania metody oceny jest bardzo szeroki i w zależności od celu może być wykorzystany w różny sposób.

Może służyć do porównywania zarówno funkcjonalności socjalnych różnych opcji projektowych, jak też funkcjonalności socjalnej planowanego remontu, modernizacji, przebudowy lub budowy nowych obiektów. Może również pomagać

w zidentyfikowaniu potencjału obiektu budowlanego w zakresie poprawy jego efektywności społecznej, jak również stanowić część oceny zrównoważenia budynków w metodach LCA (Life Cycle Assessment).

W ramach wsparcia dokumentowania wyników oceny funkcjonalności socjalnej budynku zaproponowana metoda oceny może być wykorzystywana w celach certyfikacji (oparta na formie „gwiazdek hotelowych”, przedstawionej w niniejszym opracowaniu), tworzenia oświadczeń o funkcjonalności socjalnej, wprowadzania danej nieruchomości na rynek oraz wspierania rozwoju polityki zrównoważonego rozwoju.

Przedstawiona metoda ma wiele praktycznych zastosowań i może wspomagać działania podczas zarządzania nieruchomościami budynkowymi m.in. w zakresie: określania decyzji dotyczących dalszej eksploatacji obiektu; wspomagania zarządcy (właściciela) w podejmowaniu decyzji, czy dany obiekt kwalifikuje się do remontu, modernizacji lub wyjścia z użytkowania; właściwego dysponowania środkami z funduszy remontowych dla zarządców nieruchomości; ustalenia kolejności i zakresu remontów poszczególnych budynków; wspomagania procesu ustalania wartości rynkowej budynku. Utworzona aplikacja komputerowa może stanowić narzędzie wspomagające pracę biur nieruchomości podczas wyceny budynków czy klasyfikacji obiektów (skala pięciogwiazdkowa) ze względu na stopień spełnienia socjalnych właściwości użytkowych, co w przyszłości może stanowić jedno z kryteriów decydujących o wyborze zakupu mieszkania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamus Ł. (2014), *Środki wspierania zrównoważonego budownictwa*, Materiały Budowlane, 1, 44–45.
- [2] Arendalski J. (1978), *Trwałość i niezawodność budynków mieszkalnych*, Arkady, Warszawa.
- [3] Błaszczyński T., Ksit B., Dyzman B. (2012), *Budownictwo zrównoważone z elementami certyfikacji energetycznej*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
- [4] Boczek Z. (2013), *Budownictwo zrównoważone*, Konferencja Infrastrukturalna MSZ – Stadion Narodowy, 20 maja, Warszawa.
- [5] BREEAM, <https://www.breeam.com/>.
- [6] Bryx M. (2009), *Podstawy zarządzania nieruchomościami*, Poltext, Warszawa.
- [7] Bunge M. (1974), *The relations of logic and semantic to ontology*, Journal of Philosophical Logic, 3.
- [8] Caccavelli D., Gugerli H. (2002), *TOBUS – an European diagnosis and decision-making tool for office building upgrading*, Energy and Buildings, 34(2), 113–119.

- [9] CASBEE, <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/>.
- [10] Commission of The European Communities (2007), *Action Plan for sustainable construction*, A Lead market Initiative for Europe, Brussels.
- [11] Czarnecki L., Kaproń M. (2010), *Definiowanie zrównoważonego budownictwa*, Materiały Budowlane, 1, 69–71.
- [12] Daly H. (1996), *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*, Random House.
- [13] DGNB, <http://www.dgnb.de/en/>.
- [14] Firek K., Dębowski J. (2007), *Wpływ oddziaływań górniczych na stan techniczny budynków o konstrukcji wielkopłytowej*, Czasopismo Techniczne, 4-A, 275–280.
- [15] ITB (2010), *Zrównoważone budownictwo*, Dokumenty Unii Europejskiej dotyczące budownictwa, 21.
- [16] Kaklauskas A., Zavadskas E., Raslanas S. (2005), *Multivariant design and multiple criteria analysis of building refurbishment*, Energy and Buildings, 37(4), 361–372.
- [17] Kasprowicz T. (2005), *Analiza identyfikacyjna eksploatacji obiektów budowlanych. Budownictwo polskie w rok po wejściu do Unii Europejskiej. Wybrane problemy technologiczne i organizacyjne*, Gdańsk, 18(87), 99–105.
- [18] Konior J. (1997), *Wpływ utrzymania budynków mieszkalnych na stopień zużycia elementów*, rozprawa doktorska, Wrocław.
- [19] Koźniewski E., Orłowski Z. (2015), *Propozycja metody oceny rozwiązań logistycznych budynku mieszkalnego wielorodzinnego*, Logistyka, 4, 4236–4240.
- [20] Langevine R., Allouche M. (2006), *Decision support tool for the maintenance management of buildings*, Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, 2292–2301.
- [21] LEED, <https://new.usgbc.org/leed>.
- [22] Marcinkowska E., Urbański P. (1998), *Ocena stopnia technicznego zużycia budynków mieszkalnych przy zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych*, Konferencja naukowa: Ekologia w inżynierii procesów budowlanych, Lublin–Kazimierz Dolny, 319–325.
- [23] Miks L. (2004), *Assessment of the technical condition of older urban buildings as a base for reconstruction proposals*, Slovak, 3, 30–34.
- [24] Nowogońska B. (2003), *Wybrane czynniki determinujące programowanie działalności remontowej budynków wykonanych w technologii tradycyjnej*, rozprawa doktorska, Zielona Góra.
- [25] Orłowski Z., Owczarek S., Szklennik N. (2006), *Koncepcja systemowej oceny zużycia budynków*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, 87(18), 341–346.
- [26] Orłowski Z., Radziejowska A. (2014), *Model for assessing the utility properties of a building*, Conference: People, Buildings and Environment, Kromeriz, 356–366.

- [27] Orłowski Z., Radziejowska A. (2016), *Socjalne właściwości użytkowe budynków mieszkalnych w świetle badań ankietowych*, Budownictwo i Architektura, 15(2), 73–78.
- [28] Orłowski Z., Radziejowska A. (2017), *Model for assessing „accessibility” – the basic category in the evaluation of social performance of buildings according to standards PN-EN 16309+A1:2014-12*, Czasopismo Techniczne, 8, 119–127.
- [29] PN-EN 15643-1 (2011), Zrównoważoność obiektów budowlanych – Ocena zrównoważoności budynków – Część 1: Zasady ogólne.
- [30] PN-EN 15643-3 (2012), Zrównoważoność obiektów budowlanych – Ocena budynków – Część 3: Postanowienia dotyczące oceny socjalnych właściwości użytkowych.
- [31] PN-EN 16309 (2014), Zrównoważoność obiektów budowlanych – Ocena socjalnych właściwości użytkowych budynków – Metodyka obliczania.
- [32] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002, nr 75, poz. 6).
- [33] Starzec M. (2008), *Programowanie eksploatacji budynków mieszkalnych. Problemy przygotowania i realizacji inwestycji budowlanych*, Warsztaty Inżynierów Budownictwa, Puławy.
- [34] Truchanowicz T. (2006), *Koncepcja metod identyfikacji stanu użytkowania obiektu budowlanego*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, 87(18), 353–360.
- [35] Wodyński A. (2007), *Zużycie techniczne budynków na terenach górniczych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- [36] Wójtowicz M. (2012), *Trwałość budynków w świetle Rozporządzenia nr 305/2011*, Materiały Budowlane, 12, 28–29.

13. WSPOMAGANIE DECYZJI W LOGISTYCE ODZYSKU ODPADÓW BETONOWYCH

Joanna Sagan¹, Anna Sobotka²

13.1. WSTĘP

Obecne megatrendy rozwojowe ukierunkowane są na odnajdywanie równowagi pomiędzy ekonomią, aspektami społecznymi oraz środowiskowymi. Efektem wspomnianej równowagi powinno być zaspokajanie potrzeb społecznych przy jednoczesnej dbałości o środowisko, zwłaszcza ograniczaniu emisji dwutlenku węgla. Komisja Europejska dąży do osiągnięcia w Europie do 2050 roku gospodarki neutralnej pod względem emisji dwutlenku węgla, zrównoważonej, nietoksycznej i w pełni cyrkularnej. W przypadku sektora budowlanego plan działania na rzecz gospodarki cyrkularnej przewiduje, że począwszy od 2020 roku 70% wszystkich odpadów musi być poddawanych recyklingowi. W praktyce gospodarczej sprowadza się to do poszukiwania nowych rozwiązań technicznych, technologicznych, a także logistycznych, racjonalizujących gospodarkę odpadami, surowcami i energią.

Ciągły wzrost ilości generowanych odpadów budowlanych w Europie [18] stał się źródłem zainteresowania naukowego, zmian legislacyjnych oraz dynamicznego rozwoju gospodarki cyrkulacyjnej w obszarze gospodarki odpadami budowlanymi.

Udział sektora budowlanego w emisji odpadów w UE wynosi ok. 36% łącznej ilości odpadów rocznie do zagospodarowania [8, 44]. Struktura odpadów generowanych podczas rozbiórki obiektu budowlanego jest uzależniona od technologii, w jakiej obiekt budowlany został wykonany. Dlatego też w krajach UE udział materiałów w strukturze odpadów budowlanych jest zróżnicowany i zależy od lokalnych, tradycyjnych technologii budowy. Udział odpadów betonowych w strukturze odpadów budowlanych w krajach UE mieści się w zakresie 12–40%, dla porównania cegły 8–54%, asfaltu 4–26%, a drewna 2–4%.

¹ AGH Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, e-mail: czajaj@agh.edu.pl.

² AGH Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, e-mail: sobotka@agh.edu.pl.

W Polsce ilość rocznie składowanych odpadów budowlanych stale rośnie [35]. Drugą największą grupę odpadów budowlanych (po glebie i ziemi) stanowią odpady materiałów i elementów budowlanych oraz infrastruktury drogowej, w tym odpady betonowe. Udział gruzu betonowego w strukturze odpadów będzie prawdopodobnie wzrastał z uwagi na powszechność stosowania technologii monolitycznej. Ze wzrostem produkcji mieszanki betonowej związany jest wzrost światowego zapotrzebowania rynku na kruszywa. Szacunkowe dane mówią o światowym zapotrzebowaniu na kruszywo w wysokości ok. 40 mld ton rocznie [44]. Według Resak i inni [37] krajowe zapotrzebowanie na kruszywa wzrośnie do wartości 1900 mln ton/rok w latach 2021–2030 (prognoza obejmowała zarówno budownictwo liniowe, jak i kubaturowe). Zasoby naturalne się kurczą, potrzebne jest zatem kruszywo z recyklingu.

Widoczna jest zatem konieczność racjonalizacji gospodarki zasobami naturalnymi przez upowszechnianie wzorców produkcyjnych, opartych na zwrotnych łańcuchach logistycznych (zwanych też łańcuchami dostaw, ang. *supply chains*) odpadów betonowych, które mogą stanowić substytut dla kruszyw naturalnych. Przegląd literatury wskazuje, że kruszywo z recyklingu betonu jest wykorzystywane:

- jako kruszywo w mieszance betonowej,
- w budownictwie drogowym do podbudowy dróg, budowy skarp i nasypów, niwelacji terenu, budowy dróg tymczasowych,
- do mieszanek asfaltowych, wzmocnienia ścian oporowych, wzmocnienia gruntów, w tym wykonywania pali.

Obecnie w praktyce obserwujemy odzysk odpadów betonowych, jednak aktualne trendy społeczno-gospodarcze wymagają, aby podnosić efektywność istniejących systemów odzysku. Wyzwanie to wymaga oceny systemów, uwzględniającej zasady zrównoważonego rozwoju w trzech jego aspektach: ekonomicznym, środowiskowym i socjalnym. Jest to zagadnienie interdyscyplinarne i złożone, wymagające analizy zysków i strat, wynikłych z przyjętych scenariuszy gospodarowania odpadami, w tym procesów należących do logistyki odzysku.

Wychodząc naprzeciw tym potrzebom, podjęto badania zakończone rozprawą doktorską Joanny Sagan [40], efektem której było opracowanie systemu informatycznego typu DSS (ang. *Decision Support System*). Założenia systemu i jego opis zawierają kolejne rozdziały artykułu, opracowanego na podstawie niepublikowanej rozprawy. Zaproponowany model systemu uwzględnia charakter losowy i dynamikę procesów oraz uwarunkowań logistyki odzysku i zagospodarowania odpadów z rozbiórki obiektów budowlanych, wykorzystując modelowanie symulacyjne i analizę wielokryterialną. System ten w dalszym ciągu jest rozwijany w ramach serwisu rynekodpadow.pl.

13.2. ANALIZA STANU WIEDZY W ZAKRESIE LOGISTYKI ODZYSKU ODPADÓW BUDOWLANYCH

Rosnące w praktyce zainteresowanie zwrotnymi łańcuchami dostaw ma swoje odzwierciedlenie w potrzebie rozwoju badań naukowych w tym zakresie, co potwierdza znacząca liczba oraz różnorodność publikacji naukowych na temat logistyki odzysku i zwrotnych łańcuchów dostaw [6, 24, 28].

Założenia gospodarki cyrkulacyjnej są przeciwstawne paradygmatom gospodarki linearnej przez traktowanie odpadów jako surowiec. Tym samym prowadzą do głębokiego przekształcenia łańcuchów produkcji i standardów konsumpcji oraz umożliwiają zerwanie powiązań pomiędzy rozwojem społecznym a zużyciem zasobów naturalnych [21]. Przebudowę klasycznego łańcucha dostaw do systemu domkniętego (cyrkulacyjnego) (*Closed-Loop Supply Chain*, CLSC) uznaje się za efektywne podejście, zapewniające redukcję kosztów, przy jednoczesnym uwzględnieniu aspektów ochrony środowiska i wymogów konsumenckich [50].

Domknięcie klasycznego łańcucha dostaw jest realizowane za pośrednictwem logistyki odzysku (ang. *Reverse Logistics*, RL) i może odbywać się na różnych etapach cyklu życia produktu, ekstrahując przy tym zróżnicowaną wartość produktu [25, 52].

Najstarszy opis logistyki odzysku został opracowany przez Lamberta i Stoccka [34] i jest tożsamy z definicją podaną przez Murphy'ego i Poista [36], ujmującą RL jako wsteczny przepływ towarów. W 1998 roku Stock [47] użył terminu RL w odniesieniu do roli logistyki w zakresie zwrotów produktów, ochrony złóż naturalnych, recyklingu, substytucji materiałów, ponownego użycia, usuwania odpadów i ich odnowienia, naprawy i fabrycznego przetwarzania. W tym samym roku Carter i Ellram [9] zdefiniowali RL jako proces, przez który przedsiębiorstwo może stać się bardziej efektywnie środowiskowo dzięki recyklingowi, ponownemu użyciu oraz ograniczeniu zużycia surowców naturalnych. Na tym etapie granica pomiędzy RL i ekologią zaczęła się zacierać. Według Rogersa i Tibben-Lembke [39] działania motywowane przede wszystkim względami ochrony środowiska lepiej odzwierciedla pojęcie „ekologia”. Dostrzegają oni jednocześnie zbiór działań (procesów), dla których użycie obu pojęć może być adekwatne – jednakowe stanowisko reprezentuje Hoek i Remko [26]. Z kolei Rodrigue i inni [38] za orientację ekologią uważają „zazielenienie” klasycznego łańcucha dostaw.

Logistykę odzysku uważa się za nierozdzielny element CLSC [13], będący jednocześnie kluczem do budowy wysoce wydajnego łańcucha dostaw [4].

Fahimnia i inni [19] podsumowują przepływy zwrotne jako procesy domykające klasyczny łańcuch dostaw, umożliwiające jednocześnie redukcję kosztów, a także spełnienie rosnących wymagań legislacyjnych, dotyczących ograniczenia wpływu procesów przemysłowych na środowisko, jak i oczekiwań klienta.

Wśród korzyści płynących z implementacji RL wymienia się:

- element przewagi konkurencyjnej [11, 22],
- łagodzenie negatywnego oddziaływania procesów przemysłowych na środowisko [48],
- korzyści finansowe [1, 10].

Adamczyk [2] oraz Schultmann i Snuke [42] wskazują na przydatność opracowanych dla przemysłu produkcyjnego zasad zarządzania łańcuchami zwrotnymi do implementacji w innych gałęziach gospodarki, w tym w budownictwie. Do stimulant rozwoju RL w budownictwie (podobnie jak w przemyśle produkcyjnym) zalicza się aspekty: ekonomiczny [12, 43], środowiskowy i społeczny (dotyczące korporacji) [11].

Mimo doświadczeń branży produkcyjnej osiągnięcie korzyści z domykania łańcuchów dostaw w budownictwie, jak wykazują [43, 45], jest jednak obarczone dużo większymi trudnościami. Wśród barier podkreśla się interdyscyplinarny charakter czynności związanych z odzyskiem, szeroki zakres zmiennych warunkujących przepływ strumieni zwrotnych [9] oraz ograniczoną w tej dziedzinie wiedzę i praktykę [3, 10, 41, 42]. Autorzy zwracają również uwagę na szczególnie długi okres życia obiektu budowlanego w odróżnieniu od produktów przemysłowych.

Symonds [17] przeanalizował istniejące systemy gospodarki odpadami w krajach UE, a także ich wpływ na stopień i jakość odzysku odpadów budowlanych. Z jego badań wynika, że jedynie zakaz lub bardzo wysokie koszty składowania zmieszanych odpadów budowlanych czyni procesy recyklingu konkurencyjną alternatywą – tę samą prawidłowość potwierdził Idris, Inanc i Hassan [29]. Studium przypadku wdrożenia RL w obszar robót remontowych, przeprowadzone przez Sobotkę i Sagan [46], potwierdza jednak możliwość redukcji kosztów gospodarowania odpadami w analizowanym przedsięwzięciu o 95%. Zdaniem Gorgolewskiego [23] z kolei, w skali kosztów budowy RL pozwala na ich redukcję w zakresie 30–50%.

Brandão i inni [6] wnikliwie analizowali rozwój zainteresowania problematyką logistyki zwrotnej i zagospodarowania odpadów w wielu krajach świata i w różnych aspektach (środowiskowych, ekonomicznych, logistyki zwrotnej i innych). Podkreślają oni konieczność zaangażowania się decydentów rządowych w proces ograniczania szkodliwego wpływu odpadów budowlanych, a także podejścia holistycznego do problemu. Zaprezentowali ponadto model koncepcyjny odwróconego łańcucha dostaw dla odpadów budowlanych i rozbiórkowych.

Systemy wspomagania decyzji niezbędne są na różnych poziomach zarządzania. Znajdują szerokie zastosowanie praktyczne w sterowaniu różnego rodzaju procesami, w projektowaniu obiektów, w diagnostyce (technicznej, medycznej, ryzyka) oraz w planowaniu działań i procesów w wielu dziedzinach życia, tj. bankowości, przemyśle, handlu i innych [30]. Wskazuje się również na ich przydatność w budownictwie [15] z uwagi na realizację coraz to bardziej skomplikowanych przedsięwzięć, w odpowiedzi na niepewność rynku, dużą wrażliwość robót budowlanych

na czynniki zewnętrzne (środowiskowe, społeczne, ekonomiczne), a także wewnętrzne [14], związane z organizacją procesu inwestycyjnego, tj. mechanizacja, dobór kadr, harmonogramowanie. W procesie inwestycyjnym istnieje wiele źródeł ryzyka, w tym opóźnienia w procesie podejmowania decyzji [31]. Powstaje zatem konieczność rozwoju badań w kierunku tworzenia narzędzi, będących odpowiedzią na wskazane potrzeby rynku, w tym systemów decyzyjnych.

13.3. METODYKA BADAŃ

Celem pracy było opracowanie systemu wspomagającego decyzję w organizacji zagospodarowania odpadów betonowych na budowie, przy uwzględnieniu kryteriów zrównoważonego rozwoju. System oparto na modelach symulacyjnych logistyki odzysku, założono również możliwość definiowania wag kryteriów przez decydenta. Zadaniem systemu jest obliczenie wskaźników kosztów, oddziaływania na środowisko oraz opisanie uciążliwości społecznej wariantów organizacyjnych zagospodarowania odpadów, przy uwzględnieniu parametrów przedsięwzięcia budowlanego. Na podstawie ocen kryteriów warianty podlegają wielokryterialnej ocenie, która sprowadza się do syntetycznego wskaźnika, umożliwiającego sporządzenie rankingu rozwiązań.

Przyjęta metodyka badań obejmuje następujące etapy:

- I. Definiowanie i opis systemów gospodarowania odpadami betonowymi, w tym systemów logistyki odzysku – wyznaczenie granic systemu, jego struktury i elementów. Analizy objęły:
 - metody robót rozbiórkowych z uwzględnieniem różnych technologii i metod pracy,
 - systemy gospodarowania odpadami na budowie,
 - czynniki warunkujące realizację założonych procesów gospodarki odpadami na budowie, w tym odzysku kruszywa,
 - strukturę podaży i popytu na kruszywa z recyklingu betonu.
- II. Opis matematyczny systemów logistyki odzysku:
 - wydajności systemów,
 - kosztów: usług związanych z gospodarką odpadami, pracy maszyn, ze sprzedaży kruszywa i innych (zyski),
 - oddziaływań procesów gospodarowania odpadami na środowisko, w tym dobór wskaźników oceny oddziaływań środowiskowych, metod ich normowania i ważenia,
 - jednostkowych wskaźników środowiskowych dla wszystkich procesów elementarnych,
 - oddziaływań społecznych, w tym dobór wskaźników reprezentujących aspekt socjalny oraz opracowanie metod ich wyznaczania.

- III. Dobór metody analizy wielokryterialnej.
- IV. Budowa modelu symulacyjnego i jego realizacja komputerowa (symulator).
- V. Weryfikacja i walidacja opracowanych modeli.
- VI. Przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych.
- VII. Analiza i interpretacja wyników.
- VIII. Przekształcenie symulatora do postaci informatycznego systemu wspomagania decyzji (DSS), zwanego dalej OptiC&DWaste.

W procesie modelowania matematycznego oraz budowy symulatora zastosowano wiele metod badawczych i naukowych, w tym: badanie ankietowe, wywiady, metody obserwacji, pomiary terenowe – chronometrażowe, pomiary ciśnienia akustycznego oraz poziomu zapylenia, metody statystyczne (statystyka opisowa, wnioskowanie statystyczne, analiza współzależności zjawisk), rachunek prawdopodobieństwa, teorię masowej obsługi, metodę Monte Carlo, metodę oceny środowiskowej LCA, analizę wielokryterialną.

13.4. MODELOWANIE SYSTEMÓW GOSPODARKI ODPADAMI

13.4.1. OPIS BADANYCH SYSTEMÓW

Opracowany system decyzyjny (DSS) ma na celu dostarczenie informacji o wybranych systemach gospodarowania odpadami spośród różnych występujących w praktyce. W systemie decyzyjnym akcentuje się kwestie logistyczne – odległości transportowe, wielkości załadunku, organizację przepływów oraz w niewielkim stopniu technologię recyklingu (jedynie w zakresie wariantowania „wielkości” wydajności maszyn), co również zostało motywowane względami głównie logistycznymi, w tym kwestią możliwości utworzenia placu technologicznego do recyklingu odpadów betonowych na terenie budowy. Modele systemów mają pewne założenia i ograniczenia, wśród których wymienia się: powierzchnię placu budowy, czas na realizację procesów gospodarki odpadami, jakość odpadów betonowych, rodzaj produktu z recyklingu betonu (w pracy niesort 0–63 mm), ciągły popyt na kruszywo z recyklingu betonu. System wspomagania decyzji jest dedykowany przedsiębiorstwom specjalizującym się w robotach rozbiórkowych, które są zobowiązane przepisami do zagospodarowania odpadów. Zakłada się, że wykonawca posiada własny plac technologiczno-magazynowy, na którym może zarówno zorganizować proces kruszenia, jak i magazynować odpady oraz kruszywo z recyklingu. Posiada on zezwolenie w zakresie wytwarzania, zbierania, transportu i przetwarzania odpadów grupy 17 01 01 (zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów). Jest to najczęściej spotykana forma organizacji przedsiębiorstw budowlanych prowadzących roboty rozbiórkowe [40]. W modelu zakłada się, że przedsiębiorca posiada własny park maszyn.

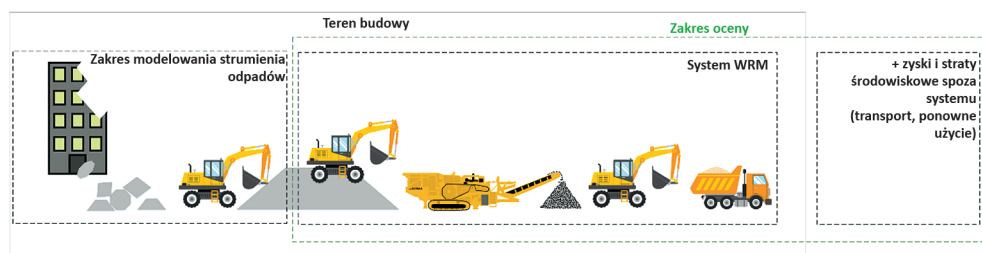
Badaniom poddano trzy podstawowe systemy gospodarowania odpadami: **WRM (System Recyklingu Mobilnego)**, **WRS (System Recyklingu Stacjonarnego)** i **WPO (System Przekazania Odpadów)**.

Ze względu na istotną zależność efektywności procesów gospodarki odpadami betonowymi od organizacji pracy oraz zestawów maszyn w obrębie każdego z wymienionych trzech systemów, rozważono zbiór wariantów ich realizacji. Każdy z wariantów poszczególnego systemu, stanowi jednocześnie szczególny, odrębny system realizacji gospodarki odpadami betonowymi, oznaczony odpowiednim akronimem.

System WRM – poddanie odpadów procesom recyklingu na placu budowy

System WRM zakłada organizację procesu recyklingu bezpośrednio na budowie. Do procesów objętych modelowaniem zalicza się w tym systemie: składowanie odpadów na placu budowy, transport maszyn do recyklingu (kruszątki), załadunek gruzu do kruszątki, kruszenie gruzu, załadunek kruszywa na środek transportowy, transport kruszywa (po stronie odbiorcy), wywóz maszyn.

W systemie recyklingu na placu budowy można stosować zróżnicowane metody organizacji pracy oraz zestawy maszyn o różnych wydajnościach. Organizacja pracy będzie determinować koszty procesów recyklingu na budowie, ich wpływ na środowisko oraz oddziaływania społeczne. Dlatego też w systemie WRM wariantowaniu poddano typy maszyn stosowanych w wybranym, przykładowym systemie organizacyjnym, przedstawionym na rys. 13.1.



Rys. 13.1. Schemat organizacyjny systemu WRM oraz zakres jego oceny. Źródło: [40]

W pracy rozważono możliwość realizacji systemu WRM z zastosowaniem czterech różnych kruszarek i czterech koparek o różnych wydajnościach (tab. 13.1 i 13.2), zestawionych razem w ciąg technologiczny. Tworzy to łącznie dziesięć wariantów systemu WRM (tab. 13.3). Maszyny zestawiano względem ich zgodności technologicznej. Każdy z wariantów jest swoistą realizacją systemu recyklingu na placu budowy, stąd każdy z nich z osobna podlega ocenie.

Przedsiębiorca nie ma wpływu na wielkość środka transportowego odbiorcy kruszywa, dlatego też w modelu przyjęto jego stałą ładowność. W ocenie środowiskowej, zgodnie z praktyką oceny LCA, dodano zyski i straty spoza systemu, tj. zyski

środowiskowe z recyklingu betonu oraz straty związane z transportem kruszywa przez odbiorcę. W systemie zakłada się, że procesy zostaną rozpoczęte po zgromadzeniu takiej ilości gruzu, dla której system pracuje nieprzerwanie.

Tabela 13.1

Typy kruszarek rozważanych w systemie (maszyna główna)

Oznaczenie	Masa kruszarki [kg]	Średnia wydajność techniczna [Mg/h]	Moc silnika [kW]
K1	1400	10	10,8
K2	2900	17,5	29,6
K3	10 000	40	52,0
K4	27 800	125	168

Źródło: oprac. własne

Tabela 13.2

Warianty koparek rozważanych w systemie

Oznaczenie	Model koparki	Moc silnika [kW]	Maksymalna objętość łyżki [m³]
E1	Minikoparka Komatsu PC45/55MR-5	29,6 kW	0,18
E2	Komatsu PC118MR-8	72 kW	0,4
E3	HB215LC-2 HYBRID	110 kW	1,5
E4	HB215LC-2 HYBRID	159 kW	2,00

Źródło: oprac. własne

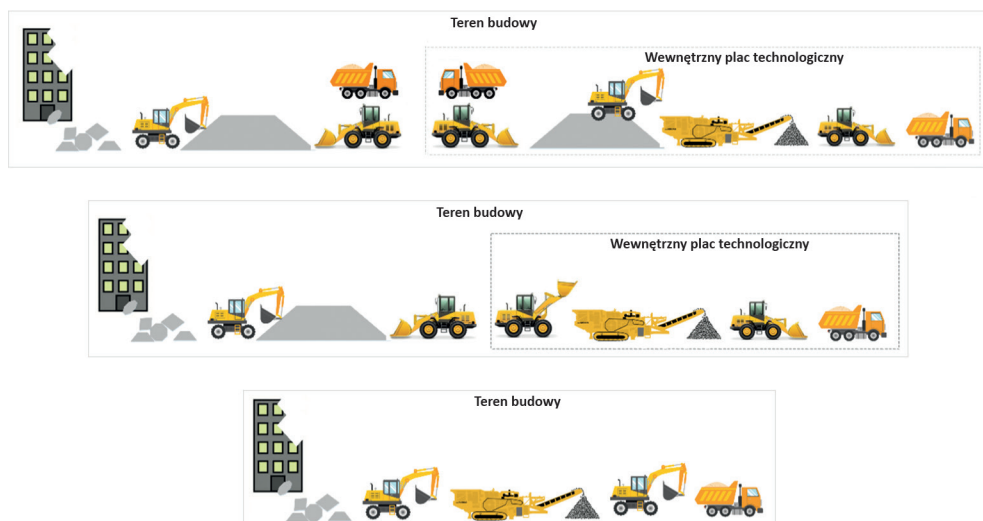
Tabela 13.3

Warianty systemu WRM

System główny	Kruszarka	Koparka	Akronim wariantu/systemu
WRM	K1	E1	WRMK1E1
	K2	E1	WRMK2E1
		E2	WRMK2E2
	K3	E1	WRMK3E1
		E2	WRMK3E2
		E3	WRMK3E3
	K4	E1	WRMK4E1
		E2	WRMK4E2
		E3	WRMK4E3
		E4	WRMK4E4

Źródło: oprac. własne

Dostrzega się możliwość budowy i realizacji systemu WRM o innych strukturach organizacyjnych, które przedstawiono na rys. 13.2. W systemie decyzyjnym nie podlegają one ocenie.

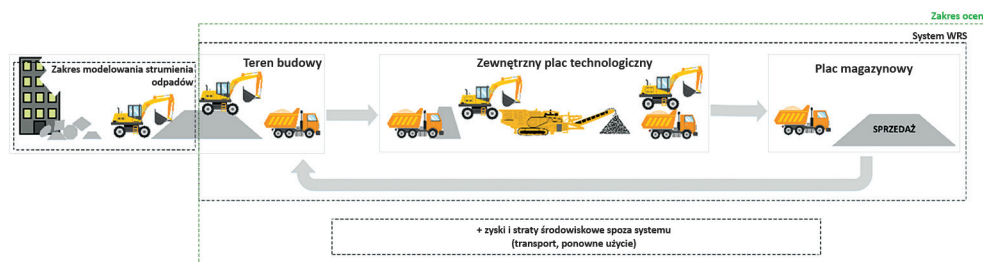


Rys. 13.2. Inne możliwe struktury organizacyjne systemu WRM

System WRS

Kolejnym systemem rozważanym w pracy jest system WRS, zakładający realizację procesów recyklingu na zewnętrznym placu technologicznym w drodze usługi zewnętrznej. W systemie tym odpady betonowe są załadowywane na środki transportowe za pomocą koparki, a następnie transportowane na zewnętrzny plac technologiczny, gdzie zostają rozładowane i poddane procesom recyklingu. Otrzymane kruszywo jest ładowane na oczekujący środek transportowy i transportowane na plac składowy przedsiębiorstwa jako towar do sprzedaży.

W przyjętej strukturze systemu wykonawczego (rys. 13.3) pojedynczy samochód samowyladowczy obsługuje wszystkie ogniwa transportowe w łańcuchu logistyki



Rys. 13.3. Schemat struktury organizacyjnej systemu WRS oraz zakres jego oceny.

Źródło: oprac. własne

Tabela 13.4

Zestaw samochodów samowyładowczych objętych modelowaniem

Typ samochodu	Oznaczenie	Reprezentant	Ładowność [t] (model)
Wywrotka (w liczbie od 1 do 10)	S1	K2030 1W (5365)	Do 10 t
	S2	B2130 1W (43118)	10–15 t
	S3	T3130 1W (6540)	15–20 t
	S4	K4140 1W (6520)	Powyżej 20 t

Tabela 13.5

Warianty koparek rozważanych w systemie

Oznaczenie	Model koparki	Moc silnika [kW]	Maksymalna objętość łyżki [m ³]
E1	Minikoparka Komatsu PC45/55MR-5	29,6 kW	0,18
E2	Komatsu PC118MR-8	72 kW	0,4
E3	HB215LC-2 HYBRID	110 kW	1,5
E4	HB215LC-2 HYBRID	159 kW	2,00

Tabela 13.6

Zestaw wariantów systemu WRS

System	Koparka	Samochód	Akronim wariantu/systemu
WRS	E1	S1 w liczbie $n = 1, 2, \dots, 10$	WRSE1S1.1, WRSE1S1.2, ..., WRSE1S1.10
		S2	WRSE1S2.n
		S3	WRSE1S3.n
		S4	WRSE1S4.n
	E2	S1	WRSE2S1.n
		S2	WRSE2S2.n
		S3	WRSE2S3.n
		S4	WRSE2S4.n
	E3	S1	WRSE3S1.n
		S2	WRSE3S2.n
		S3	WRSE3S3.n
		S4	WRSE3S4.n
	E4	S1	WRSE4S1.n
		S2	WRSE4S2.n
		S3	WRSE4S3.n
		S4	WRSE4S4.n

odzysku betonu. Oznacza to, że jego cykl pracy uwzględnia: transport odpadów na plac stacjonarny, wyładunek gruzu, oczekiwanie na skruszenie, odbiór kruszywa i jego transport na plac składowy, wyładunek, powrót na plac budowy do stanowiska obsługi załadunku. W omawianym systemie wariantowaniu poddano zestawy maszyn – ładowność i liczbę środków transportowych (tab. 13.4) oraz rodzaj koparki na stanowisku obsługi (tab. 13.4 i 13.5).

Ostatecznie w systemie dla każdej koparki (E1–E4) będącej stanowiskiem obsługi rozważono użycie czterech wywrotek (S1÷S4) w liczbie od 1÷10, co łącznie skutkuje liczbą 160 wariantów (tab. 13.6).

W systemie WRS również zakłada się, że procesy zostaną rozpoczęte po zgromadzeniu takiej ilości gruzu, przy której system pracuje nieprzerwanie. Do oceny systemu przyjęto też, że w obrębie placu technologicznego pracują maszyny o stałych i dużych wydajnościach (E3 i K4). W ocenie systemu uwzględniono zyski i straty środowiskowe spoza systemu, uwzględniające użycie kruszywa z recyklingu oraz stratę wynikłą z transportu kruszywa przez odbiorcę.

System WPO

Ostatnim systemem, będącym jednocześnie punktem odniesienia dla zbioru rozważanych systemów logistyki odzysku (WRS i WRM), jest system przekazania odpadów podmiotom gospodarczym (WPO). W systemie WPO (rys. 13.4) wykonawca robót musi dokonać jedynie załadunku odpadów do podstawionych kontenerów, gdyż pozostałe procesy gospodarki odpadami są realizowane przez odbiorcę odpadów.



Rys. 13.4. System WPO oraz zakres jego oceny. Źródło: oprac. własne

W tym systemie wariantowane są objętość kontenera (12 wariantów – kontenery o objętości od 3 m³ do 25 m³ z interwałem co dwa m²) oraz wielkość koparki (cztery warianty), co łącznie generuje 48 wariantów w systemie (tab. 13.7). Wymagana liczba kontenerów w każdym wariantcie zostaje obliczana na podstawie informacji o ilości odpadów.

Tabela 13.7

Zestaw wariantów w systemie WPO

System	Objętość kontenera	Koparka	Akronim wariantu/systemu
WPO	VK3	E1	WPOVK3E1
		E2	WPOVK3E2
		E3	WPOVK3E3
		E4	WPOVK5E4
	VK 5	E1	WPOVK5E1
		E2	WPOVK5E2
		E3	WPOVK5E3
		E4	WPOVK5E4
	VK 7	E1	WPOVK7E1
		E2	WPOVK7E2
		E3	WPOVK7E3
		E4	WPOVK7E4
	VKi	E1	WPOVKiE1
		E2	WPOVKiE2
		E3	WPOVKiE3
		E4	WPOVKiE4

13.4.2. MODELOWANIE STRUMIENIA ODPADÓW

Modelowaniem objęto również procesy rozbiórki, które nie podlegają ocenie, stanowią jednak informację o wielkości strumienia odpadów, co determinuje przebieg procesu gospodarki odpadami w czasie. W systemie rozważono trzy podstawowe metody rozbiórki: ręczną oraz przy użyciu młotów pneumatycznych, z uwzględnieniem wielkości brygad roboczych, oraz rozbiórkę przy użyciu młotów hydraulicznych z podziałem na młot o małej, średniej i dużej wydajności. Do modelowania wydajności robót ręcznych oraz przy użyciu młotów pneumatycznych wykorzystano istniejące katalogi nakładów rzeczowych, na podstawie których określono średnie wartości wydajności robót. W przypadku rozbiórki przy użyciu młotów hydraulicznych, montowanych jako osprzęt koparki, w modelowaniu strumienia odpadów zastosowano parametryczną metodę normowania pracy, uzależniając wydajność robót od grubości elementu poddanego rozbiórce. Zależność funkcyjną między wydajnością teoretyczną młota a grubością elementu wyznaczono w drodze aproksymacji danych otrzymanych od producenta młotów. W celu wyznaczenia procesów pomocniczych i biegu jałowego oraz czasów ich trwania, zastosowano metodę obserwacji migawkowej w ramach przedsięwzięcia modernizacji budynku pieca oraz wanny szklarskiej w zakładzie Saint-Gobain w Dąbrowie Górniczej, realizowanego w dniach 21–23 lutego 2018 roku.

Z uwagi jednak na dostrzeżoną w czasie zmienność strumienia na wejściu do systemu oraz na podstawie danych literaturowych do odwzorowania zmienności strumienia odpadów wykorzystano rozkład trójkątny. Wartość średnią rozkładu przyjęto na podstawie norm pracochłonności, z kolei jego zakres zmienności uzależniono od przewidywanego zakresu zakłóceń robót na podstawie zależności określonej w drodze wywiadu z ekspertami.

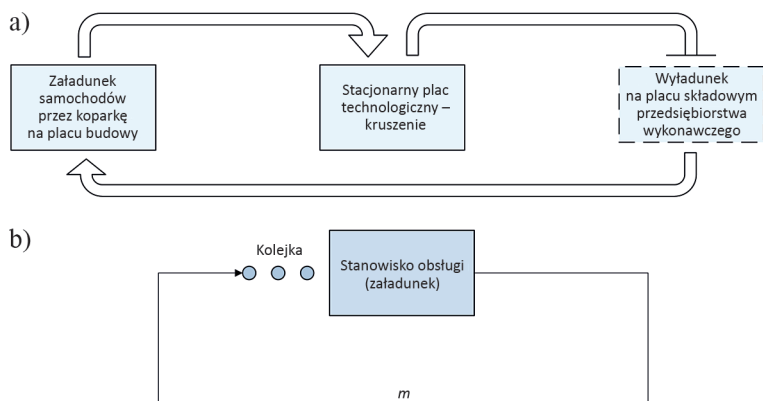
Z uwagi na zmianę struktury betonu z materiału litego na luźny, strumień odpadów wyrażono na jednostkę czasu [Mg/h], przyjmując gęstość objętościową betonu o wartości zalecanej przez EN 1991-1-1:2002 Załącznik A – 2400 kg/m³, z kolei w przypadku gęstości nasypowej przyjęto rozkład jednostajny w granicach 1700–2000 kg/m³.

13.4.3. WYDAJNOŚĆ SYSTEMÓW GOSPODAROWANIA ODPADAMI ORAZ ICH ELEMENTÓW

W celu wyznaczenia ilościowych wskaźników ocen aspektów ekonomicznego, ekologicznego i socjalnego konieczne było wyznaczenie czasu pracy poszczególnych elementów systemów, co zrealizowano w drodze symulacji komputerowej. Model wymagał określenia wydajności eksploatacyjnej maszyn wykorzystywanych w procesach zagospodarowania odpadów. W tym celu wykonano badania terenowe. Otrzymane wyniki wskazywały na jej losowy charakter i stanowiły podstawę do określenia: typu rozkładów prawdopodobieństwa czasów cykli roboczych koparek (otrzymany charakter rozkładu zmiennej jest zgodny z danymi literaturowymi) [27, 32], współczynnika napełnienia naczynia roboczego, składowych czasu procesów pomocniczych, a także biegu jałowego kruszarki i koparki. Czasy przejazdu środków transportu obliczono z uwzględnieniem charakterystyki ruchu samochodów ciężarowych w Polsce. Czas operacyjny na placu stacjonarnym oraz czas załadunku są wynikiem symulacji, a łączna odległość transportowa stanowi parametr modelu.

Dane te zostały zastosowane do modelowania symulacyjnego działania (pracy) poszczególnych elementów badanych systemów i relacji między nimi (dokładny opis w: [40]).

Rysunek 13.5a przedstawia uproszczony model graficzny systemów recyklingu (WRS). Składa się z trzech podstawowych elementów/procesów: załadunku, kruszenia, wyładunku na składowisku. Każdy z nich funkcjonuje jak model masowej obsługi typu X/Y/1 ze sprzężeniem zwrotnym (rys. 13.5b). Opis analityczny takiego złożonego systemu jest bardzo skomplikowany, dlatego do odwzorowania jego pracy zastosowano metodę symulacji komputerowej z użyciem metody Monte Carlo.

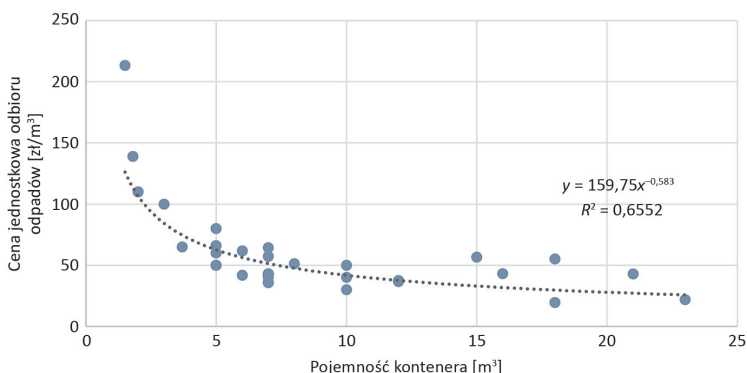


Rys. 13.5. a) Schemat organizacji pracy w systemie WRS; b) uproszczony model masowej obsługi systemu WRS. Źródło: oprac. własne

13.4.4. KALKULACJA KOSZTÓW

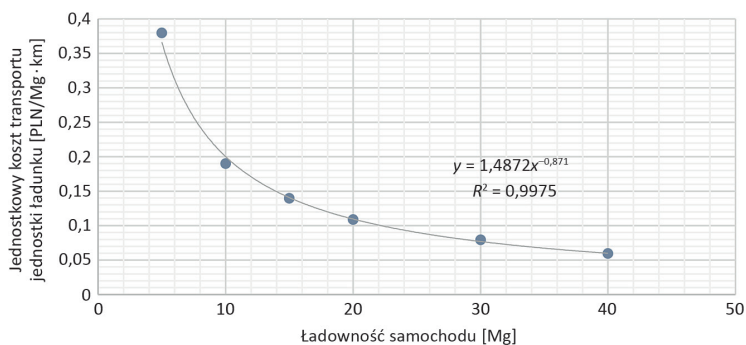
Analizę kosztów pracy systemów sporządzono w układzie kalkulacyjnym, inwentaryzując składowe koszty bezpośrednie pracy poszczególnych ich elementów. Ceny za usługi zewnętrzne w modelu przyjęto jako ceny netto.

Koszt usługi odbioru odpadów zbadano w toku analiz cen rynkowych. Cena jednostkowa usługi odbioru odpadów w drodze aproksymacji danych przyjęła postać funkcji wykładniczej (rys. 13.6).

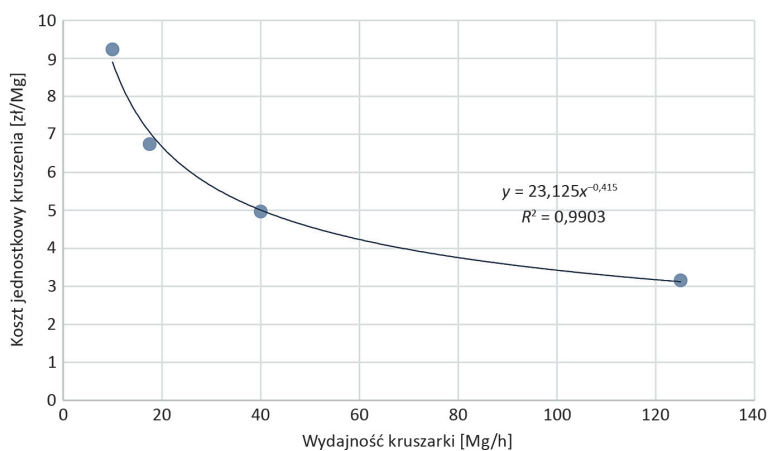


Rys. 13.6. Cena jednostkowa usługi odbioru odpadów w funkcji objętości kontenera. Źródło: oprac. własne

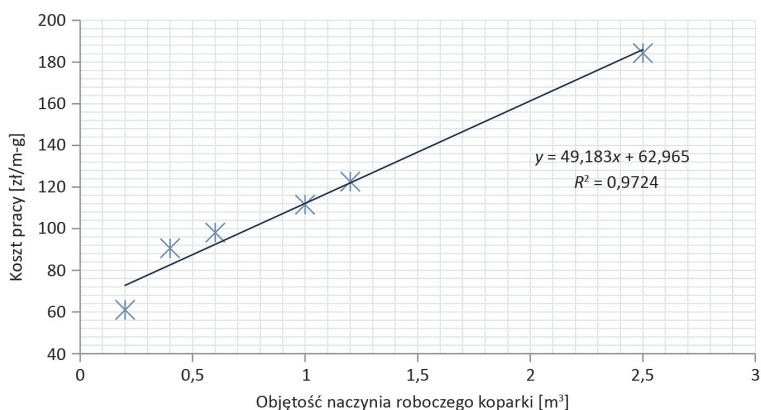
W ramach pracy zinwentaryzowano koszty transportu (rys. 13.7) oraz koszty pracy kruszarek (rys. 13.8). Koszty jednostkowe pracy koparki przyjęto na podstawie cennika Sekocenbud IRS 2017, wykorzystując metodę interpolacji (rys. 13.9). Stratę związaną z niewykorzystaniem czasu roboczego koparki w systemie WPO obliczono jako przeciwieństwo potencjalnego zysku z najmu koparki.



Rys. 13.7. Koszt jednostkowy transportu tony gruzu betonowego w funkcji ładowności samochodu. Źródło: oprac. własne



Rys. 13.8. Koszt jednostkowy kruszenia gruzu. Źródło: oprac. własne

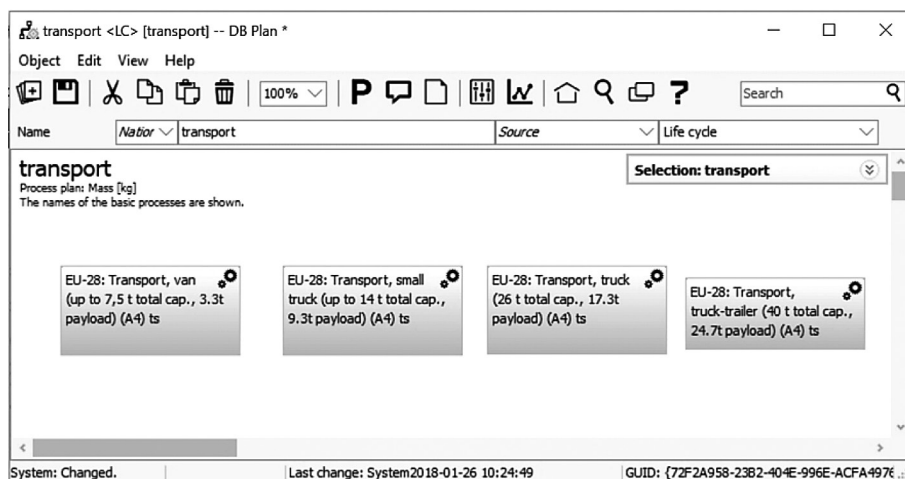


Rys. 13.9. Koszty pracy koparki w funkcji objętości naczynia roboczego. Źródło: oprac. własne

13.4.5. ODDZIAŁYWANIE PROCESÓW GOSPODARKI ODPADAMI BETONOWYMI NA ŚRODOWISKO

Do opisu oddziaływania procesów gospodarki odpadami na środowisko wykorzystano klasyczną metodę LCA. Do oceny aspektów środowiskowych przyjęto siedem głównych wskaźników środowiskowych, zalecanych przez normę EN 15643-2:2011: globalne ocieplenie (GWP), uszczuplenie ozonu (ODP), zakwaszenie gleby i wody (AP), eutrofizacja (EP), fotochemiczne tworzenie ozonu (POCP), uszczuplenie zasobów abiotycznych – pierwiastki (ADPE), uszczuplenie zasobów abiotycznych – paliwa kopalne (ADPF). Uzyskane wskaźniki poddano normalizacji i ważeniu w celu uzyskania syntetycznej oceny – Ecopoint.

Do inwentaryzacji strumieni wejściowych i wyjściowych procesów jednostkowych oraz wyznaczenia wartości wskaźników środowiskowych wykorzystano oprogramowanie GaBi [49] wraz z bazą danych, udostępnioną w ramach licencji GaBi Professional (rys. 13.10).



Rys. 13.10. Zrzut ekranu programu GaBi. Źródło: oprac. własne

Z uwagi na niekompletność baz danych do wyznaczenia wskaźników środowiskowych zastosowano również modele emisji spalin z silników spalinowych maszyn budowlanych. Z uwagi na dostęp, powszechność stosowania oraz klarowność metody, w pracy do obliczeń wykorzystano model emisji spalin NONROAD [51]. Jednym z głównych parametrów decydujących o konsumpcji paliwa oraz emisji z silnika spalinowego Diesla jest współczynnik obciążenia silnika podczas wykonywania robót budowlanych. Jest on uzależniony od wielu zmiennych, zwłaszcza od warunków pracy. W opracowanym symulatorze współczynnik obciążenia silnika koparki modeluje się jako zmienną losową o rozkładzie jednostajnym, w granicach

klasyfikacji podanej przez Caterpillar dla przeciętnych warunków pracy koparki, tj. od 0,38 do 0,56.

W pracy uwzględniono oddziaływania środowiskowe związane z łańcuchem dostaw paliwa, wykorzystując model EU-28 Diesel mix at filling station ts programu GaBi. Do wyznaczenia wskaźników środowiskowych dla procesu składowania odpadów budowlanych zastosowano model EU-28: Construction waste dumping (EN15804 C4) ts. Wartości wskaźników środowiskowych dla produktu z odzysku przyjęto na podstawie [7].

13.4.6. WPŁYW PROCESÓW GOSPODARKI ODPADAMI BETONOWYMI NA SPOŁECZEŃSTWO

Do oceny aspektów socjalnych zastosowano model ilościowy, mający zaletę pełnego obiektywizmu. Proponowane podejście ma również wadę, którą jest duży stopień uogólnień. Wśród normowego zbioru kategorii oceny socjalnej wyjątkowego znaczenia dla procesów budowlanych nabiera kategoria „wpływ na sąsiedztwo”, charakteryzowana przez wskaźniki:

- hałas,
- emisje substancji (w tym zapylenie),
- efekt olśnienia i zacinienia,
- wibracje.

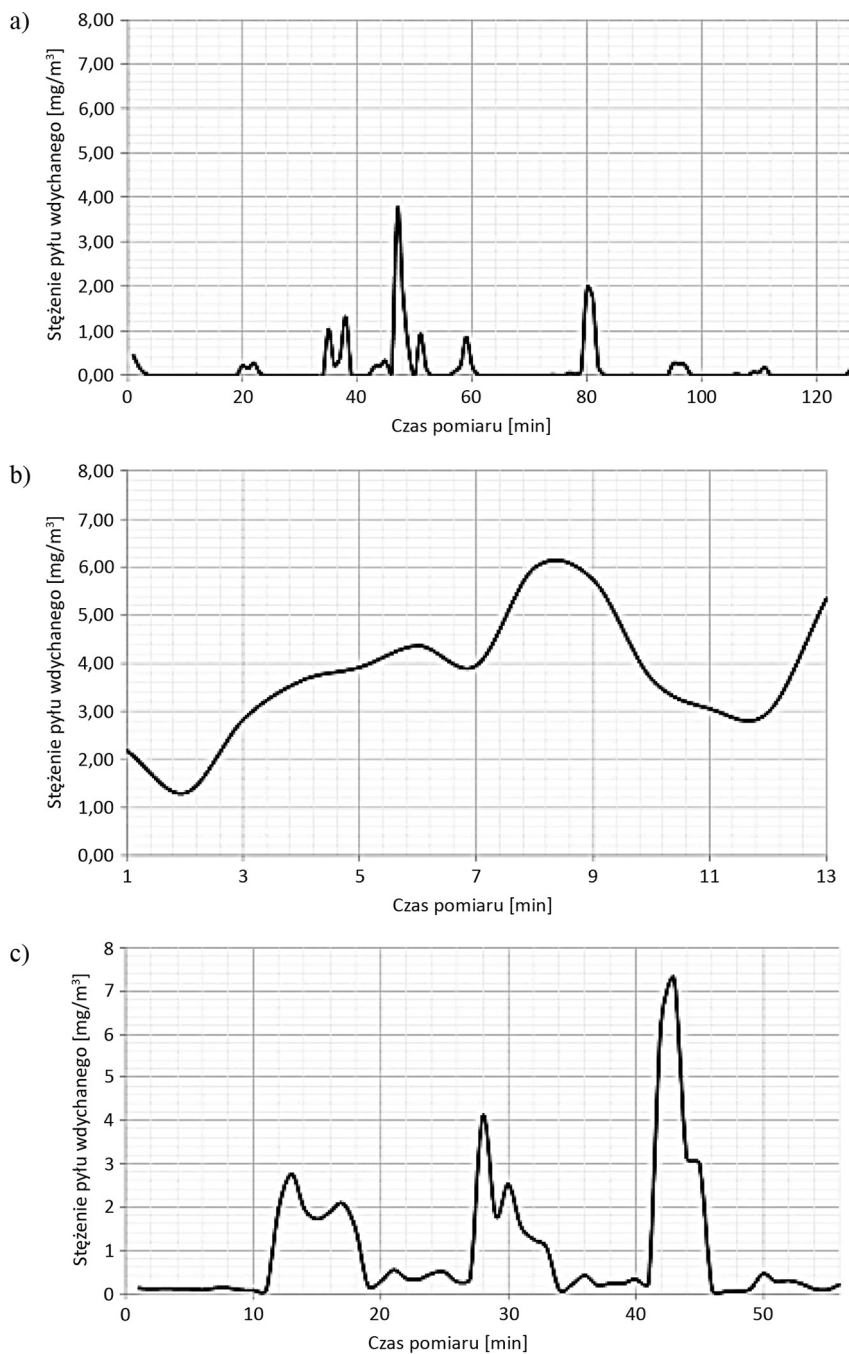
Efekt olśnienia i zacinienia oraz wibracje zostały wykluczone z rozważań z uwagi na brak zaobserwowanego ich istotnego oddziaływania w procesach gospodarki odpadami budowlanymi. Dlatego też do oceny aspektu socjalnego systemów wstępnie zakwalifikowano wskaźniki hałasu i zapylenia.

Zapylenie

Z uwagi na obserwację istotnego zapylenia podczas procesu kruszenia gruzu (rys. 13.11) podjęto próbę modelowania oddziaływań związanych z zapyleniem w ramach aspektu socjalnego.



Rys. 13.11. Zaobserwowane zapylenie w otoczeniu kruszarki. Źródło: oprac. własne



Rys. 13.12. Wykres średniego (minutowego) stężenia pyłu wdychanego: a) na stanowisku operatora koparki; b) w otoczeniu zmechanizowanych robót rozbiórkowych; c) podczas załadunku gruzu. Źródło: oprac. własne

W literaturze przedmiotu można spotkać opracowania [5, 20, 33] zawierające oznaczenia stężeń pyłów przy wykonywaniu robót budowlanych, w tym w niewielkim zakresie podczas robót rozbiórkowych i procesów gospodarki odpadami. Ze względu na rozbieżność i niekompletność danych literaturowych przeprowadzono własne pomiary terenowe. Takie podejście dało możliwość zarówno zaznajomienia się z mechanizmem powstawania zapylenia, jak i dokonania oznaczeń stężeń pyłu wdychanego w obszarze robót rozbiórkowych oraz procesów związanych z odzyskiem betonu. Badania prowadzono podczas robót budowlanych realizowanych przez przedsiębiorstwo Mega-Pol w dniach 21–24 lutego 2018 roku w zakładzie przemysłowym Saint-Gobain. Pomiary wykonano w obszarze:

- zmechanizowanych robót rozbiórkowych,
- procesu kruszenia,
- procesów załadunku gruzu.

Uzyskane wyniki (rys. 13.12) są rozbieżne w stosunku do danych literaturowych. W opinii autorek pracy jest to spowodowane znaczącą liczbą i istotnością zmiennych znajdujących się w obszarze cech materiałowych betonu oraz warunków lokalnych budowy, wpływających na poziom zapylenia w otoczeniu procesów gospodarki odpadami.

Modelowanie oddziaływań związanych z zapyleniem, zarówno na stanowiskach pracy, jak i (tym bardziej) w otoczeniu budowy, wymaga pogłębienia analiz oraz opracowania złożonych, wieloparametrycznych modeli. Z tego powodu w modelu decyzyjnym nie ujęto wskaźnika zapylenia jako reprezentanta aspektu socjalnego. Istniejący problem badawczy wykazano w kierunkach dalszych badań.

Hałas

Do wyznaczenia poziomu oddziaływania hałasu na osoby postronne proponuje się adaptację modeli propagacji fal dźwiękowych:

$$L_A = L_{WA} + 10 \lg \Phi - 10 \lg \Omega - 20 \lg \frac{r}{r_0} \quad (13.1)$$

gdzie:

- L_{WA} – równoważny poziom mocy akustycznej źródła dźwięku, skorygowany charakterystyką A [dB] (charakterystyka sprzętu),
- Φ – współczynnik kierunkowości źródła, w tym przypadku $\Phi = 1$,
- Ω – kąt bryłowy, w którym zachodzi propagacja dźwięku, dla rozpatrywanego modelu 2π ,
- r_0 – promień odniesienia, 1 m.

Poziom ciśnienia akustycznego przy pracy sprzętu wyznaczono na podstawie katalogowej wartości poziomu mocy akustycznej sprzętu. Odległość r od źródła jest parametrem modelu, mierzonym jako najmniejsza odległość pomiędzy źródłem dźwięku a strefą ochrony przed hałasem. Wyznaczony w ten sposób poziom

hałasu nie odzwierciedla jednak poziomu jego szkodliwości, dlatego wskaźnik hałasu proponuje się reprezentować w ocenie za pośrednictwem krotności normy poziomu ekspozycji na hałas ($k_{L_{Aeq}}$).

$$k_{L_{Aeq}} = 10^{(L_{Aeq,T} - L_{Aeq,D})/0,1} \quad (13.2)$$

gdzie:

- $L_{Aeq,T}$ – dopuszczalny poziom ekspozycji na hałas,
- $L_{Aeq,D}$ – wyznaczony poziom ekspozycji na hałas.

13.4.7. SYMULACYJNY SYSTEM WSPOMAGAJĄCY DECYZJĘ OptiC&DWaste

Model systemu DSS został oprogramowany w środowisku MATLAB samodzielnie przez Joannę Sagan w ramach rozprawy doktorskiej [40] (rys. 13.13). Podstawowe moduły systemu to:

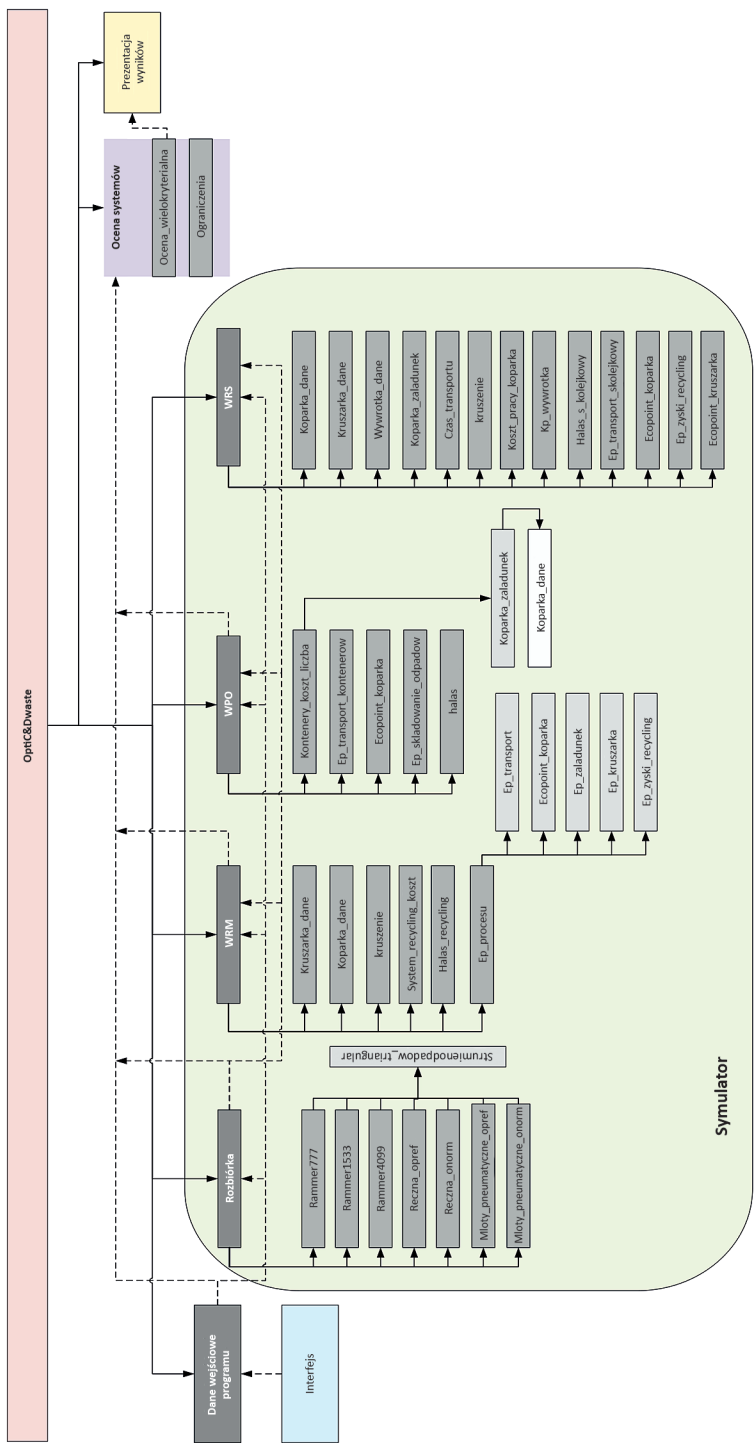
- a) **interfejs użytkownika** – moduł umożliwiający decydentowi wprowadzenie danych wejściowych, niezbędnych do przeprowadzenia symulacji;
- b) **symulator** – moduł odzwierciedlający funkcjonowanie systemu DSS. W tej części programu obliczone zostają wskaźniki ocen analizowanych systemów zagospodarowania odpadów;
- c) **moduł ocen systemów** – dokonujący analizy wielokryterialnej wariantów i wyznaczający ograniczenia systemów zagospodarowania odpadów;
- d) **moduł objaśniający** – prezentujący wyniki ocen wariantów systemów w formie listy rankingowej i wykresów oraz podający informacje o ograniczeniach.

Opracowany system ma regularną strukturę, składającą się z hierarchicznie zbudowanych modułów, powiązanych i komunikujących się między sobą w drodze przekazywania parametrów według ściśle określonych zasad.

Podkreśla się, że w pojedynczym przebiegu symulacyjnym program wyznacza wskaźniki ocen dla wszystkich analizowanych w systemie DSS wariantów systemów zagospodarowania odpadów, czyli WRS, WRM oraz WPO, umożliwiając tworzenie listy rankingowej dla zbioru danych wejściowych.

Weryfikację i walidację systemu DSS zapewniono przez:

- a) badanie składowych systemu i jego reakcji na zmianę wartości zmiennych i parametrów,
- b) porównanie wyników z obliczeniami analitycznymi,
- c) test warunków ekstremalnych, polegający na przyjęciu obmiaru elementów budynku bliskich zeru i weryfikacji, czy przy tak zadanych zmiennych wejściowych model zwraca zerową wartość strumienia odpadów,
- d) obserwację zachowania się modelu.

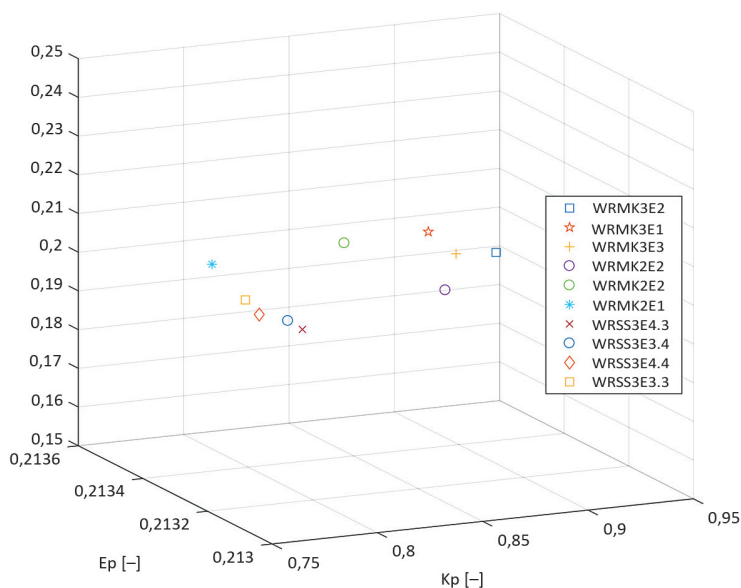


Rys. 13.13. Poglądowy schemat programu OptiC&DWaste

13.5. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA PROGRAMU OptiC&DWaste

Poniżej przedstawiono przykład zastosowania opracowanego systemu DSS. Analizę przeprowadzono dla budynku IPN w Lublinie. Dane wejściowe do programu określono na podstawie dokumentacji technicznej obiektu, projektu zagospodarowania terenu oraz w oparciu o przeprowadzone rozpoznanie otoczenia (rynek usług, lokalne ceny ofertowe sprzedaży kruszywa).

Na podstawie przedstawionych i omówionych wskaźników ocen oraz przy uwzględnieniu wag kryteriów, będących odzwierciedleniem preferencji decydenta, systemy zostały ocenione i zestawione w kolejności od najlepszego do najgorszego rozwiązania. Graficzną interpretację znormalizowanych wskaźników ocen dla dziesięciu najkorzystniejszych rozwiązań przedstawiono na rys. 13.14.



Rys. 13.14. Wykres znormalizowanych wskaźników ocen dziesięciu najkorzystniejszych rozwiązań. Źródło: oprac. własne

System generuje również informacje o ograniczeniach występujących w realizacji systemów gospodarki odpadami w obrębie analizowanego przedsięwzięcia, które ostatecznie rzutują (oprócz istotności kryteriów) na wybór wariantu końcowej realizacji procesów gospodarki odpadami. Wspomniane ograniczenia to: czas rozpoczęcia procesów gospodarki odpadami, wydłużenie czasu realizacji przedsięwzięcia oraz wymagana powierzchnia placu składowego i technologicznego, które decydent może uwzględnić w wyborze ostatecznego wariantu systemu zagospodarowania odpadów.

13.6. PODSUMOWANIE, WNIOSKI ORAZ KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Podejmowanie decyzji w zakresie efektywnego gospodarowania odpadami betonowymi jest procesem złożonym, zależnym od wielu zmiennych i parametrów systemu oraz ograniczeń związanych z realizacją procesów na placu budowy. Dlatego też, bez wsparcia narzędziem dostarczającym informacji o systemach odzysku, trudno jest podjąć najlepszą decyzję w zakresie organizacji przepływów zwrotnych oraz doboru maszyn w ciągach technologicznych.

Opracowany system wspomagania decyzji, oparty na symulacyjnych modelach gospodarki odpadami, ułatwia wybór efektywnych działań w tym zakresie, a uwzględnienie aspektów środowiskowych i społecznych w ocenie systemów (w tym logistyki odzysku) jest elementem zastosowania zasad zrównoważonego rozwoju w praktyce inżynierskiej. Wspomniany wzrost efektywności wiąże się zarówno z zyskiem przedsiębiorcy, jak i oszczędnością zasobów naturalnych oraz zmniejszeniem oddziaływań procesów zagospodarowania odpadów betonowych na społeczeństwo – opracowany system wspomaga realizację unijnego dwunastego celu zrównoważonego rozwoju, wyznaczonego na rok 2030. Cele unijne zostały również uwzględnione w procesie ważenia, tj. oceny istotności wpływu oddziaływań środowiskowych. Jednocześnie opracowany system informatyczny, przez dostarczenie informacji o systemach logistyki odzysku, likwiduje jedną z głównych barier związanych z wdrożeniem nietypowych, a korzystnych rozwiązań odzysku w gospodarce odpadami.

Przeprowadzone badania prowadzą do następujących **wniosków i wynikających z nich propozycji kierunków dalszych badań**:

- Opracowane narzędzie ma tę specyfikę (zaletę), że pozwala na rozpatrywanie indywidualnych uwarunkowań przyjętych systemów gospodarowania odpadami. Przeprowadzone analizy wyraźnie pokazują, że wskaźniki ocen systemów, a w konsekwencji wyniki oceny, istotnie zależą od zmiennych wejściowych modelu.
- Wskaźnik oceny jest uzależniony również od wag kryteriów. Aktualnie w systemie decydent ma pełną możliwość akcentowania aspektów oceny. Pozostawienie wag bez ograniczeń jest jednak kwestią dyskusyjną.
- Nie należy uogólniać uzyskanych w pracy wyników i wniosków na temat systemów logistyki odzysku. Wyniki ocen są zależne od wielu zmiennych i parametrów, co wymaga przeprowadzenia kompleksowych badań systemów odzysku. Na podstawie badań przeprowadzonych w pracy można jednak wskazać pewne ogólne trendy.
- Poznanie elementów składowych systemów gospodarki odpadami oraz sposobu ich funkcjonowania, a także jednoczesna analiza wyników przepro-

wadzonych eksperymentów, pozwalają dostrzec wysoką efektywność (ekonomiczną i środowiskową) wszelkich systemów odzysku w porównaniu do wariantu przekazania odpadów podmiotom gospodarczym, które kierują je na składowisko odpadów. Zaletą systemu WPO pozostaje jedynie niska uciążliwość społeczna i niewielkie ograniczenia realizacyjne.

- Analiza przedstawionego w pracy przypadku pokazuje, że warunki budowy mogą wykluczyć możliwość realizacji niektórych systemów logistyki odzysku kosztem spadku efektywności rozwiązań.
- Poprawę wskaźników socjalnych i minimalizację ograniczeń logistycznych, związanych z wygospodarowaniem placu technologiczno-magazynowego do recyklingu w obrębie budowy, można zapewnić przez stosowanie dostępnych na rynku maszyn budowlanych o mniejszych gabarytach. Warunki ograniczające można w pewnym stopniu również stymulować przez zmianę intensywności strumienia odpadów, tj. zmianę technologii robót rozbiórkowych.
- Z uwagi na zaobserwowaną istotną współzależność systemów logistyki odzysku od strumienia odpadów, zwłaszcza w obszarze warunków ograniczających, ocenę systemu planuje się poszerzyć również o procesy rozbiórki, aby zapewnić ich kompleksową i jednoczesną ocenę. Poszerzenie zakresu oceny jest zasadne także w kierunku technologii odzysku oraz jakości produktu z recyklingu.
- W aktualnej wersji programu wspomagającego decyzję uwzględniono dwa podstawowe ograniczenia logistyczne – czas na realizację procesów gospodarki odpadami oraz miejsce na placu budowy. W toku dalszych badań planuje się poszerzyć zbiór ograniczeń, w tym dotyczących ruchu samochodów ciężarowych po drogach publicznych.
- Opracowane narzędzie obejmuje zbiór przykładowych systemów gospodarki odpadami (najczęściej występujących w praktyce), natomiast istnieje możliwość uzupełnienia zestawu zawartych w programie struktur systemów o inne nietypowe rozwiązania.
- Symulator w toku dalszych badań umożliwi kompleksową analizę systemów gospodarki odpadami. Możliwe będzie wyszczególnienie kluczowych parametrów modelu i pogłębienie analiz procesów.
- W obecnej postaci opracowanego systemu wskaźnik hałasu uwzględniono w rankingowaniu rozwiązań, bez narzuconego warunku ograniczającego. Przekroczenie poziomu hałasu wiąże się jednak z potencjalnym dodatkowym kosztem, związanym z karami finansowymi.
- Zastosowane modele hałasu mają wysoki stopień uogólnień i nie uwzględniają przeszkód fizycznych w propagacji fal dźwiękowych. W związku z powyższym, w dalszym toku badań planuje się uszczegółowienie modelu propagacji fal dźwiękowych z wykorzystaniem parametrycznego modelu 3D w technologii BIM.

- W ocenie oddziaływań socjalnych powinno zostać uwzględnione zapylenie (o czym świadczą wstępne badania przeprowadzone na budowie), a w toku dalszych badań planuje się opracowanie modeli zapylenia w obszarze procesów gospodarki odpadami betonowymi.
- Przeprowadzona analiza cen kruszywa z recyklingu świadczy o braku spójnej polityki cenowej w zakresie produktów z recyklingu.
- W toku badań dostrzeżono, że stosowanie bardziej wydajnych maszyn korzystnie oddziałuje na wskaźnik kosztów i środowiska oraz negatywnie na hałas w otoczeniu.

W pracy analiza obejmowała siedem wskaźników środowiskowych, w tym ślad węglowy. Dlatego też opracowany system informatyczny może posłużyć jako narzędzie wskazujące kierunek optymalizacji procesów w zagospodarowaniu odpadów betonowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abdulrahman M., Gunasekaran A., Subramanian N. (2014), *Critical barriers in implementing reverse logistics in the Chinese manufacturing sectors*, International Journal of Production Economics, 147 (Part B), 460–471.
- [2] Adamczyk W. (2004), *Ekologia wyrobów: jakość, cykl życia, projektowanie*, PWE.
- [3] Addis B. (2006), *Building with Reclaimed Components and Materials*, Earthscan, London.
- [4] Bai C., Sarkis J. (2013), *Flexibility in reverse logistics: a framework and evaluation approach*, Journal of Cleaner Production, 47, 306–318.
- [5] BGIA (2008), *Report 8/2006e*, Central Division of the BGIA, Ed.
- [6] Brandão R., Edwards D.J., Hosseini M.R., Silva Melo A.C., Macêdo A.N. (2021), *A reverse supply chain conceptual model for construction and demolition waste*, Waste Management and Research, 39(11), 1341–1355.
- [7] BRE (2016), *Environmental Product Declaration nr 000104*, Readymix Concrete.
- [8] Bukowski H., Fabrycka W. (2019), *Budownictwo w obiegu zamkniętym w praktyce*, Innowo, Warszawa, <https://pccnl.nl/wp-content/uploads/2016/02/Raport-Budownictwo-2019.pdf>.
- [9] Carter C., Ellram L. (1998), *A review of the literature and framework for future investigation*, Journal of Business Logistics, 19(1), 85–102.
- [10] Chini A., Bruening S. (2003), *Deconstruction and materials reuse in the US*, [in:] *The Future of Sustainable Construction – 2003*, 1–22.
- [11] De Brito M.P., Dekker R. (2004), *A Framework for Reverse Logistics*, [in:] *Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*,

- R. Dekker, M. Fleischmann, K. Inderfurth, L.N. Van Wassenhove (eds), Springer, Berlin – Heidelberg, 3–27.
- [12] Denhart H. (2010), *Deconstructing disaster: Economic and environmental impacts of deconstruction in post-Katarina New Orleans*, Resources, Conservation and Recycling, 54(3), 194–204.
 - [13] Dowlatshahi S. (2010), *A cost-benefit analysis for the design and implementation of reverse logistics systems: case studies approach*, International Journal of Production Research, 48(5), 1361–1380.
 - [14] Drzewiecka J., Paślawski J. (2011), *Analiza zakłóceń procesów budowlanych*, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2, 475–479.
 - [15] Dziadosz A., Konczak A. (2016), *Decision-making process in the construction industry*, Archives of Civil Engineering, 62(1), 111–126.
 - [16] EN 15643-2:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of buildings – Part 2: Framework for the assessment of environmental performance.
 - [17] European Commission by Symonds, in association with ARGUS, COWI and PRC Bouwcentrum (1999), *Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts*, Symonds Group Ltd., February.
 - [18] Eurostat (2016), *Waste statistics*, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics.
 - [19] Fahimnia B., Sarkis J., Dehghanian F., Banihashemi N., Rahman S. (2013), *The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study*, Journal of Cleaner Production, 59 (Supp. C), 210–225.
 - [20] Flanagan M.E., Seixas N., Majar M., Camp J., Morgan M. (2003), *Silica Dust Exposures During Selected Construction Activities*, AIHA Journal, 64, 319–328.
 - [21] Frérot A. (2013), *Gospodarka cyrkulacyjna i efektywność wykorzystania zasobów: motorem wzrostu gospodarczego w Europie*, Kwestie Europejskie, <https://www.robert-schuman.eu/pl/doc/questions-d-europe/qe-331-pl.pdf>.
 - [22] Genchev S.E., Richey R.G., Gabler C.B. (2011), *Evaluating reverse logistics programs: a suggested process formalization*, The International Journal of Logistics Management, 22(2), 242–263.
 - [23] Gorgolewski M. (2008), *Designing with reused building components: some challenges*, Building Research & Information, 36(2), 175–188.
 - [24] Govindan K., Soleimani H. (2017), *A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus*, Journal of Cleaner Production, 142(April), 371–384.
 - [25] Guide V.D.R., Harrison T.P., Van Wassenhove L.N. (2003), *The challenge of closed-loop supply chains*, Interfaces, 33(6), 3–6.
 - [26] Hoek V., Remko I. (1999), *From reversed logistics to green supply chains*, Supply Chain Management: An International Journal, 4(3), 129–135.
 - [27] Hoła B., Mrozowicz J. (2003), *Modelowanie procesów budowlanych o charakterze losowym*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.

- [28] Hosseini R., Chileshe N., Rameezdeen R., Lehmann S. (2013), *The Crucial Role of Design for Reverse Logistics (DfRL) and Harvesting of Information (HoI) in Reverse Logistics Systems*, Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management, 586–599.
- [29] Idris A., Inanc B., Hassan M.N. (2004), *Overview of waste disposal and landfills/dumps in Asian countries*, Journal of Material Cycles and Waste Management, 6(2), 104–110.
- [30] Irani Z., Kamal M.M. (2014), *Intelligent Systems Research in the Construction Industry*, Expert Systems with Applications, 41(4), 934–950.
- [31] Jaśkowski P., Biruk S. (2010), *Analiza czynników ryzyka czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych*, Czasopismo Techniczne, 1-B, 157–166.
- [32] Kapliński O., Skarżyński A. (1973), *Wybrane metody matematyczne w organizacji i planowaniu budowy*, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [33] Kirkeskov L., Hanskov D.J.A., Brauer C. (2016), *Total and respirable dust exposures among carpenters and demolition workers during indoor work in Denmark*, Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 11(1), 1–8.
- [34] Lambert D., Stock J. (1982), *Strategic Physical Distribution Management*, Richard D. Irwin Inc.
- [35] Ministerstwo Środowiska (2017), *Monitor Polski. Dziennik Urzędowy Rzeczypospolitej Polskiej*.
- [36] Murphy P., Poist R. (1988), *Management of logistical retromovements: an empirical analysis of literature suggestions*, Journal of the Transportation Research Forum, 29(1), 177–184.
- [37] Resak M., Nowacka A., Tomaszewska H. (2012), *Prognoza zużycia kruszyw w Polsce do 2030 roku w nawiązaniu do możliwych scenariuszy rozwoju kraju*, Górnictwo Odkrywkowe, 53, 4–12.
- [38] Rodrigue J., Slack B., Comtois C. (2001), *Green Logistics (The Paradoxes of)*, [in:] *The Handbook of Logistics and Supply-Chain Management*, A.M. Brewer, K.J. Button, D.A. Hensher (eds), Emerald, London, 1–11.
- [39] Rogers D.S., Tibben-Lembke R. (2001), *An Examination of Reverse Logistics Practices*, Journal of Business Logistics, 22(2), 129–148.
- [40] Sagan J. (2018), *Wspomaganie decyzji w logistyce odzysku odpadów betonowych*, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków (niepublikowana).
- [41] Sassi P. (2004), *Designing buildings to close the material resource loop*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability, 157(3), 163–171.
- [42] Schultmann F., Snuke N. (2008), *Organisation of reverse logistics tasks in the construction industry*, [in:] *SB07 Portugal: Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millenium*.

- [43] Shakantu W.M., Emuze F.A. (2012), *Assessing reverse logistics in South African construction*, Proceedings for the 20th annual conference of the international group for lean construction, 18–20.
- [44] Silva R.V., De Brito J., Dhir R.K. (2014), *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*, Construction and Building Materials, 65, 201–217.
- [45] Sinha S., Shankar R., Taneerananon P. (2010), *Modelling and case study of reverse logistics for construction aggregates*, International Journal of Logistics Systems and Management, Inderscience, Olney.
- [46] Sobotka A., Sagan J. (2016), *Cost-saving Environmental Activities on Construction Site – Cost Efficiency of Waste Management: Case Study*, Procedia Engineering, 161(Supp. C), 388–393.
- [47] Stock J. (1998), *Development and Implementation of Reverse Logistics Programs*, Publisher Council of Logistics Management.
- [48] Thierry M., Salomon M., Van Nunen J. (1995), *Strategic Issues in Product Recovery Management*, California Management Review, 37(2), 114–136.
- [49] Thinkstep (2018), *Oprogramowanie GaBi*, <http://www.gabi-software.com>.
- [50] Tundys B. (2015), *Zielony łańcuch dostaw w gospodarce o określonym obiegu – założenia, relacje, implikacje*, <https://doi.org/10.15611/pn.2015.383.21>.
- [51] US EPA (2010), *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Compression-Ignition*, U.S. Environmental Protection Agency, 009, 1–141.
- [52] Van Wassenhove L.N. (2009), *The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research*, Operations Research, 57(1), 10–18.

14. ANALIZA ŚŁADU WĘGLOWEGO W OCENIE MATERIAŁÓW I TECHNOLOGII BUDOWANIA

Grzegorz Śledź¹, Anna Sobotka²

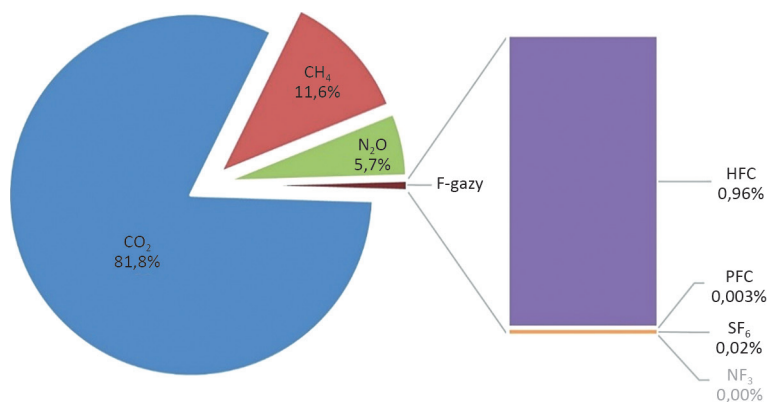
14.1. WSTĘP

Budownictwo, jako sektor gospodarki zaspokajający potrzeby społeczeństwa (pierwszego i wyższych rzędów), przyczynia się w dużym stopniu do globalnego ocieplenia klimatu. Szacuje się, że sektor budowlany odpowiada za 38% światowej emisji gazów cieplarnianych: 28% emisji wynika z zapotrzebowania budynków na energię, produkowaną bezpośrednio na miejscu lub pochodzącą z sieci – to tzw. operacyjny ślad węglowy, za pozostałe 10% emisji odpowiada zaś „wbudowany” ślad węglowy. Efektywność energetyczna budynków jest systematycznie poprawiana, jednak ze względu na stale rosnący popyt na powierzchnię użytkową budynków wielkość emisji będzie rosła w sektorze budowlanym [18]. Z drugiej strony obserwuje się brak istotnych działań w polskich przedsiębiorstwach budowlanych, zmierzających do redukcji śladu węglowego. Problem ten jest złożony, ponieważ np. w procesie monitorowania i obniżania śladu węglowego uwzględnić należy się nie tylko bezpośrednie emisje przedsiębiorstwa, ale również ilość uwalnianego CO₂ w łańcuchu dostaw.

Ślad węglowy to suma emisji wszystkich gazów cieplarnianych, powodowanych przez dany proces, system lub populację, z uwzględnieniem ich absorpcji i przechowywania w określonych granicach. Dwutlenek węgla ma największy udział objętościowy w ich emisji (rys. 14.1). Ślad węglowy wyraża się jako GWP (ang. *Global Warming Potential* – potencjał do ocieplania klimatu), mierzony w tonach ekwiwalentu dwutlenku węgla eCO₂ [5, 18]. Jest to miara metryczna, określana dla danego gazu w wyniku przemnożenia masy tego gazu przez odpowiedni dla niego wskaźnik potencjału tworzenia efektu cieplarnianego. Przykładowo, dla podtlenku azotu N₂O GWP wynosi 310, więc emisja 1 mln ton N₂O odpowiada 310 mln ton CO₂ [4, 5].

¹ Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: gsledz@student.agh.edu.pl.

² Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: sobotka@agh.edu.pl.



Rys. 14.1. Udział gazów cieplarnianych w emisjach całkowitych na świecie. Źródło: [13]

Głównym źródłem emisji gazów cieplarnianych z ludzkiej aktywności jest spalanie paliw kopalnych w celu pozyskiwania energii elektrycznej, ogrzewania mieszkań i do wykorzystania w transporcie. Największym śladem węglowym cechują się produkty, których wytworzenie jest procesem wysokoenergetycznym. Znacznie niższym poziomem emisji cechuje się energia pozyskana ze źródeł odnawialnych, takich jak: promieniowanie słoneczne, wiatr, geotermia. Ważnym czynnikiem jest transport surowców do zakładów produkcyjnych, gdyż zużycie litra benzyny uwalnia do atmosfery ok. 2,3 kg CO₂, natomiast litra diesla 2,7 kg CO₂ [5].

Ślad węglowy operacyjny stanowi ok. 60–70% całego śladu węglowego budynku, **który wynika z jego użytkowania. Związany jest z eksploatacją budynku i uzależniony** od sposobu zaprojektowania oraz emisyjności źródeł energii, czyli wynika z popytu na energię, służącą do zapewnienia komfortu termicznego oraz zasilania wbudowanych urządzeń.

Ślad węglowy wbudowany jest związany z materiałami budowlanymi, wykorzystanymi w trakcie budowy budynku, i rozwiązaniami technologiczno-organizacyjnymi. Wlicza się do niego produkcję materiałów budowlanych, ich transport na plac budowy i cały proces budowlany obiektu budowlanego, co stanowi ok. 30–40% śladu węglowego budynku.

Dzięki zaostrzaniu wymogów w zakresie efektywności energetycznej budynków i obowiązku ich certyfikacji, ślad węglowy operacyjny budynków sukcesywnie ulega redukcji. Skutkiem ubocznym wprowadzonych regulacji jest zwiększenie udziału śladu węglowego budowanego. Wpływają na to stosowane coraz grubsze izolacje termiczne, stolarka o zmniejszonym współczynniku przenikania ciepła czy zaawansowane urządzenia do ogrzewania i wentylacji, których produkcja wymaga dużej ilości surowców, metali szlachetnych oraz znacznego zaangażowania sił produkcyjnych.

Udział wbudowanego śladu węglowego poszczególnych elementów typowego budynku biurowego wynosi przeciętnie [18]:

- konstrukcja naziemna o największym wkładzie w ślad węglowy – 40%,
- fundamenty i konstrukcja podziemna – 15%,
- wykończenie zewnętrzne, fasada – 15%,
- wykończenie wewnętrzne i wyposażenie – 10%,
- instalacje budynkowe – 10%,
- transport i budowa – 10%.

Europejski Zielony Ład, wdrażany przez Unię Europejską, zakłada ograniczenie do 2030 roku emisji gazów cieplarnianych o 55% względem poziomu z 1999 roku, a do 2050 roku całkowitą neutralność klimatyczną. Przed budownictwem stoi poważne wyzwanie znacznego ograniczenia wpływu na środowisko oraz dekarbonizacji i spełniania wymogów w zakresie emisyjności budynków. Oznacza to również, że wykorzystywane obecnie, nieformalnie przyjęte sposoby obliczania śladu węglowego będą wymagały opracowania jednolitej metody obliczeń, stworzenia bazy materiałów budowlanych z uwzględnieniem śladu węglowego, ale również ustanowienia nowego prawodawstwa. O ile z określeniem śladu węglowego operacyjnego na podstawie wskaźników nie powinno być problemów, to proces określania śladu węglowego wbudowanego stanowi większe wyzwanie dla producentów i projektantów, choćby z konieczności wyznaczenia go indywidualnie dla każdego materiału budowlanego [15].

W rozdziale tym, na podstawie doświadczeń opisanych w literaturze przedmiotu, dokonano analizy problematyki śladu węglowego w budownictwie, zwłaszcza przy doborze rozwiązań materiałowych i technologiczno-organizacyjnych. Przedstawiono też wyniki obliczeń śladu węglowego dla wybranego budynku.

14.2. PROBLEMATYKA ŚŁADU WĘGLOWEGO W PRAKTYCE BUDOWLANEJ

Mimo że obliczanie śladu węglowego nie jest jeszcze obowiązkowe, powoli zyskuje popularność wraz z upowszechnianiem założeń gospodarki niskoemisyjnej oraz strategii społecznej odpowiedzialności biznesu. Coraz więcej podmiotów gospodarczych decyduje się na obliczanie śladu węglowego i raportowanie osiągniętych redukcji emisji w przedsiębiorstwie do bazy CDP – *Carbon Disclosure Project*. Jest to międzynarodowa organizacja non-profit, która opracowała system umożliwiający obliczenie, ujawnienie, zarządzanie i dzielenie się informacją dotyczącą ochrony środowiska. Organizacja ta motywuje przedsiębiorców wszystkich sektorów do działań prośrodowiskowych i dzielenia się osiągnięciami w zakresie redukcji emisji gazów cieplarnianych. Najszybciej jednak przedsiębiorców do zmian motywuje rynek i potrzeba adaptacji do nowych trendów. Kontrahenci polskich przedsiębiorstw, pochodzący przede wszystkim z Europy Zachodniej, coraz częściej wymagają od producentów podania wartości śladu węglowego produktu.

Polskie spółki, które chcą wziąć udział w przetargu lub są uwzględnione w zapytaniach ofertowych, są zobligowane do obliczenia wartości śladu węglowego konkretnego produktu.

Śledząc zapowiedzi Komisji Europejskiej, można stwierdzić, że obliczanie śladu węglowego w ciągu kilku najbliższych lat stanie się obligatoryjne w wielu branżach, mających znaczący wpływ na środowisko, w tym w budownictwie.

Polski sektor budowlany czeka proces głębokiej transformacji, pozwalający osiągnąć neutralność klimatyczną. Konieczna będzie zmiana podejścia do produkcji i doboru materiałów budowlanych, projektowania budynków, doboru rozwiązań technologiczno-organizacyjnych budowy oraz wykorzystywanych źródeł energii. Ponieważ kluczowe decyzje inwestycyjne, które mają największy wpływ na ślad węglowy, zapadają w początkowej fazie opracowywania projektu, należy w miarę możliwości przyspieszyć przygotowanie odpowiedniej bazy dla projektantów, a nowo uchwalone prawodawstwo będzie podstawą powyższych działań.

Podobnie jak przed laty wprowadzono wymagania dla budynków odnoszące się do zużycia energii, kwestią czasu jest ustalenie referencyjnych progów co do śladu węglowego. Zgodnie z nowymi założeniami od 2030 roku obowiązkiem projektantów wszystkich budynków będzie obliczanie śladu węglowego, natomiast dla budynków, których powierzchnia przekracza 2000 m², obowiązek ten ma zostać wprowadzony już od 2027 roku. Po tej dacie projektanci będą zobligowani do obliczania śladu węglowego budynku w całym cyklu jego życia. Aby spełnić postawione wymagania, będą zmuszeni wybierać materiały o niskim śladzie węglowym oraz optymalizować pod tym względem cały proces budowy. Nowoczesne materiały budowlane cały czas ewoluują w kierunku dostosowania do redukcji wpływu na środowisko, a także poprawy parametrów technicznych i estetyki. Wymienione zmiany w dyrektywie dotyczącej budynków przygotowuje Komisja Europejska. Wpłynie to znacznie na skomplikowanie procesu projektowania, dobór materiałów i wygląd przyszłych budynków oraz ograniczy rozrzutność i rozmach w architekturze.

Śladu węglowego nie powinno się rozpatrywać wyłącznie w odniesieniu do poszczególnych budynków. Ustawodawcy powinni również uwzględnić rozwiązania w zakresie planowania urbanistycznego, np. przeznaczenie terenów pod farmy fotowoltaiczne. Zmieni się podejście do obiektów i ich zachowania w czasie eksploatacji oraz kiedy nadejdzie czas na wymianę zużytych elementów, przebudowę czy rozbiórkę. Konieczne będzie uwzględnienie utylizacji lub recyklingu materiałów, lecz żeby zachęcić inwestorów, koszty tych procesów nie mogą przekraczać korzyści z wykorzystania danego materiału. Optymalnym rozwiązaniem byłoby zamknięcie obiegu wyrobów budowlanych. Europejska Agencja Środowiska podaje, że ponowne wykorzystanie stali, cementu i betonu ograniczyłoby emisję o 130 mln ton (ok. 61%) do 2050 roku. Aktualnie prowadzone są w tym zakresie prace wdrożeniowe, czego przykładem jest Portugalia, w której uruchomiono projekt opracowania

platformy, pozwalającej porównać korzyści środowiskowe i ekonomiczne przez wykorzystanie materiałów budowlanych pochodzących z recyklingu [3].

Można wymienić przykłady różnych działań, już realizowanych, zmierzających do redukcji śladu i ochrony środowiska. Są to np. [24]:

- 1) sporządzanie przez producentów deklaracji środowiskowej produktu EPD (ang. *Environmental Product Declaration*). Przedstawia ona ilościowe informacje na temat wpływu produktu na środowisko w cyklu życia wyrobu (wg norm serii 14040);
- 2) wielokryterialna ocena środowiskowa budynku, np. metodą BREEAM (ang. *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) czy LEED (ang. *Leadership in Energy and Environmental Design*);
- 3) unijny mechanizm CBAM (ang. *Carbon Border Adjustment Mechanism*), którego zadaniem jest wsparcie działań, służących ograniczaniu emisji oraz ich importu z produktami wytwarzanymi w krajach, w których procesy produkcyjne generują znacznie wyższe poziomy emisji gazów cieplarnianych niż na terenie UE [1];
- 4) rozwój metod, narzędzi, baz danych, raportowania, programów do określania wielkości śladu węglowego w cyklu życia (produktu, procesu, organizacji) i wykorzystywania tej wiedzy do weryfikacji i ograniczania emisji gazów cieplarnianych.

Jednym z celów mapy drogowej dekarbonizacji budownictwa do 2050 roku jest nałożenie na projektantów obowiązku powszechnego wykonywania i upubliczniania analiz śladu węglowego dla nowych i modernizowanych budynków od 2027 roku. Oznacza to, że wykorzystywane obecnie nieformalnie przyjęte sposoby obliczania śladu węglowego będą wymagały opracowania pełnej metody obliczeń, stworzenia bazy materiałów budowlanych z uwzględnieniem śladu węglowego, a także ustanowienia nowego prawodawstwa. O ile z określeniem śladu węglowego operacyjnego na podstawie wskaźników nie powinno być problemów, o tyle proces określania śladu węglowego wbudowanego będzie większym wyzwaniem dla producentów i projektantów z uwagi na konieczność wyznaczenia go indywidualnie dla każdego materiału budowlanego [15].

Okazuje się, że obecnie opracowane metody obliczeń są niewystarczające, więc konieczne będzie opracowanie jednolitej i przejrzystej metody obliczania śladu węglowego dla budynków, również z możliwością implementacji w technologii BIM. W przyszłości architektki, projektując obiekty budowlane i modelując bryłę i wygląd elewacji, będą na bieżąco weryfikować swój projekt. Zyskujące ogromną popularność w ostatnich latach budynki pasywne staną się standardem, charakteryzując się przemyślaną formą i zoptymalizowaną konstrukcją, jak również wykorzystaniem materiałów lokalnego pochodzenia (zgodnie z regułą – lokalna produkcja i lokalna sprzedaż) o niskim stopniu przetworzenia. Weryfikacja przyjętych rozwiązań wymagać będzie oszacowania śladu węglowego.

14.3. OSZACOWANIE ŚŁADU WĘGLOWEGO DLA WYBRANEGO OBIEKTU BUDOWLANEGO

14.3.1. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Realizacja obiektu budowlanego ma charakter indywidualny zarówno w aspekcie przyjętych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, jak i sposobu realizacji, tj. technologii i organizacji robót budowlanych. Dlatego też analizę i obliczanie śladu węglowego w sposób kompleksowy należy wykonywać dla każdego obiektu budowlanego odrębnie. Przedstawione badania i kalkulacja emisji CO₂ dotyczy budowy domu mieszkalnego w zabudowie bliźniaczej (dwie części budynku z dwoma mieszkaniami, połączone klatką schodową) (rys. 14.2). Badania obejmują obliczenie śladu węglowego w trzech aspektach:

- 1) materiałowym – dobór materiałów zastosowanych do wykonania stanu surowego budynku (bez dachu i izolacji cieplnej budynku),
- 2) procesowym – projektowania realizacji procesów budowlanych, których efektem jest wykonanie budynku (w stanie surowym),
- 3) oceny zmian w powierzchni biologicznie czynnej, czyli utrata pochłaniania CO₂ w wyniku zagospodarowania terenu.



Rys. 14.2. Wizualizacja budynku bliźniaczego w 3D [23]

14.3.2. OCENA MATERIAŁÓW

Analiza śladu węglowego obejmuje wykonanie konstrukcji żelbetowej budynku, tj. wszystkich żelbetowych i betonowych elementów stanu surowego budynku. Uwzględniono zarówno wytworzenie mieszanki betonowej i jej składowych, jak również wszystkie prace związane z jej wbudowaniem, tj. wykonaniem konstrukcji budynku. W analizie uwzględniono **różne klasy betonu**, w zależności od rodzaju elementu budynku, odczytane z dokumentacji projektowej. Posadowienia budynku zaprojektowano na układzie łań fundamentowych z betonu C25/30 wykonywanego na budowie. Są one wykonane na warstwie betonu niekonstrukcyjnego C12/15. Ściany fundamentowe zaprojektowano jako żelbetowe z betonu C20/25. Strop nad parterem i płytę posadzki w parterze zaprojektowano jako płyty krzyżowo zbrojone z betonu C30/37 wykonywanego na budowie. Schody na piętro wykonano z betonu C25/30. Zestawienie składników mieszanek betonowych zawiera tabela 14.1. Obliczenia wykonano przy przyjęciu gęstości cementu portlandzkiego – 2300 kg/m³, a kruszywa – 2700 kg/m³.

Tabela 14.1

Zestawienie składu mieszanek betonowych użytych w konstrukcji na 1 m³

Klasa betonu	Spoiwo [kg/m ³]	Kruszywo [kg/m ³]	Woda [dm ³ /m ³]
C12/15	275	1967	165
C20/25	300	1540	145
C25/30	398	1827	175
C30/37	461	1764	175

Źródło: oprac. własne na podstawie [7, 19]

Wyniki obliczenia wielkości zapotrzebowania na beton i jego składników w zależności od elementu konstrukcji budynku przedstawiono w tabeli 14.2.

Tabela 14.2

Zestawienie przewidywanego zużycia betonu, cementu i kruszywa

Lp.	Element	Ilość betonu [m ³]	Ilość cementu [t]	Objętość cementu [m ³]	Ilość kruszywa [t]	Objętość kruszywa [m ³]
1	Podkłady betonowe (chudy beton) pod łąwy fundamentowe na podkładzie gruntowym	6,18	1,69	0,73	12,15	4,5
2	Ławy fundamentowe prostokątne żelbetowe	19,40	7,72	3,36	35,44	13,13
5	Ściany żelbetowe fundamentowe	12,33	3,69	1,60	18,99	7,03
6	Słupy żelbetowe prostokątne	0,89	0,36	0,16	1,63	0,60

7	Betonowanie wieńców zbrojonych	7,55	3,48	1,51	13,32	4,93
8	Belki i podciągi (nadproża żelbetowe)	2,20	1,01	0,44	3,88	1,44
9	Płyty żelbetowe stropów o grubości 15 cm płaskie + dodatek za dalsze 7 cm grubości	25,50	11,75	5,11	44,97	16,66
10	Żelbetowe płyty podestowe	1,601	0,74	0,32	2,93	1,09
11	Schody żelbetowe	0,95	0,38	0,17	1,74	0,64
Suma		76,59	30,82	13,40	135,05	50,02

Źródło: oprac. własne na podstawie przedmiaru robót

Łącznie przewiduje się zużycie 76,59 m³ mieszanki betonowej. Wartość wskaźnika emisji śladu węglowego dla betonu przyjmuje się w zakresie 313–354 CO₂ kg/m³ [11]. Wartość ta obejmuje emisje podczas następujących procesów:

- produkcji, transportu i przechowywania cementu,
- produkcji, transportu i przechowywania kruszyw,
- transportu wody, domieszek i dodatków,
- produkcji i transportu paliw,
- eksploatacji betoniarki,
- przygotowania mieszanki, transportu na plac budowy,
- układania i zagęszczania.

Ślad węglowy zastosowania betonu w budynku szacuje się na 23,9–27,1 tony CO₂.

Obliczenie ilości śladu węglowego **stali zużytej do budowy** obejmuje: produkcję, transport kolejowy i transport drogowy na budowę. Na podstawie danych z dokumentacji technicznej budynku (zestawień stali) oszacowano zapotrzebowanie na stal w ilości 8,468 tony (tab. 14.3). Przyjmując wskaźnik emisji śladu węglowego przy produkcji stali za równy 1,9 tony eCO₂ [11], całkowitą wartość śladu węglowego produkcji stali na potrzeby budowy oszacowano na 16,089 tony eCO₂.

Tabela 14.3

Zestawienie przewidywanego zużycia stali do budowy budynku

Lp.	Element	Masa stali [t]
1	Zbrojenie fundamentów	3,952
2	Zbrojenie stropu nad parterem – zbrojenie dolne	2,655
3	Zbrojenie stropu nad parterem – zbrojenie górne	1,467
4	Zbrojenie słupów i schodów	0,394
Suma		8,468

Źródło: oprac. własne na podstawie przedmiaru robót

Założono, że stal zostanie wyprodukowana w Hucie Katowice w Dąbrowie Górniczej i zostanie dowieziona do najbliższych stacji kolejowych. Za węzły kolejowe przyjęto Dąbrowę Górniczą Ząbkowice i Warszawę Zachodnia. W rezultacie odległość kolejowa liniami zelektryfikowanym wynosi 270 km. Całkowitą ilość emisji gazów cieplarnianych oblicza się, mnożąc wielkość jednostkową emisji CO₂ przez pracę eksploatacyjną wyrażoną w bruttotonokilometrach (brtkm), z odpowiednią korektą wynikającą z zastosowanych jednostek miary. Wynikiem jest całkowita ilość emisji CO₂ w tonach [26]. Według przyjętej metodyki wskaźnik emisji dla transportu towarowego linią zelektryfikowaną przyjęto zgodnie z deklaracją przewoźnika DB Cargo Polska. Średnie emisje przypadające na bruttotonokilometr przewożony taborem elektrycznym w DB Cargo Polska wynoszą ok. 21,24 g CO₂/brtkm (jednostkowa emisja CO₂ przez elektryczny pojazd trakcyjny dla poszczególnych kategorii pociągów, wyrażona w bruttotonokilometrach) [2]. Biorąc pod uwagę średnią odległość transportu, masę przewożonej stali oraz wskaźnik emisji, oszacowano ślad węglowy dla transportu kolejowego stali na 47 799,56 g CO₂ (ok. 0,048 tony CO₂).

Kolejną pozycją do obliczenia śladu węglowego dla stali jest jej transport ze stacji kolejowej na miejsce budowy. Przyjęto transport drogowy pojazdami typu Tatra Phoenix oraz przyjęto ich średnią ładowność jako 15 ton. Emisja za godzinę pracy wynosi 52 500 g CO₂. Stal na budowę będzie dostarczona jednym kursem w czasie 1 godziny, a zatem ślad węglowy dla transportu samochodowego stali wynosi 0,053 tony CO₂.

Biorąc pod uwagę produkcję, transport kolejowy i drogowy, łączny ślad węglowy dla wbudowanej stali można przyjąć jako 16,1902 tony eCO₂.

14.3.3. OCENA PROCESÓW

Na podstawie przedmiaru robót ziemnych oszacowano ich zakres i wielkość. Do wyznaczenia nakładów czasu pracy (m-g) wykorzystano katalog KNR-2-01 Budowe i roboty ziemne. Przyjęto, że wydobywanie urobku odbędzie się koparkami podsiębiernymi. Łącznie konieczne będzie wydobywanie 246,87 m³ urobku. Zgodnie z katalogiem nakładów rzeczowych wymaga to pracy koparki gąsienicowej o pojemności łyżki 0,40 m³ przez 18,614 m-g. Dodatkowo konieczny będzie transport urobku na odległość 5 km, co przekłada się na 79,7884 m-g.

Wartości nakładów czasu pracy na roboty betonowe i zbrojarskie oszacowano na podstawie przedmiarów. Przy obliczaniu nakładów na roboty betoniarskie i zbrojarskie podstawą ich oszacowania był KNR 2-02 Konstrukcje budowlane. Korzystając ze wskaźników zamieszczonych w założeniach kalkulacyjnych do katalogu, oszacowano ślad węglowy, związany z przewidywanym użytkowaniem poszczególnych urządzeń i maszyn w trakcie prac budowlanych (tab. 14.4).

Tabela 14.4

Zestawienie nakładów i śladu węglowego maszyn do robót budowlanych

Lp.	Wymagany sprzęt	Dobrene urządzenie	Nakład pracy [m-g]	Moc / zużycie paliwa	Zużycie energii [kWh] / paliwa [dm ³]	Zużycie energii [MJ]	Ślad węglowy [kg eCO ₂ / MJ]
1	Pompa spalinowa 80 m ³ /h	YATO YT-85402	12,00	1,90 [dm ³ /h]	22,8	–	53,58
2	Samochód skrzyniowy do 5 t	IVECO DAILY 35S18H	11,60	9,08 [dm ³ /100 km]	28,42	–	76,734
3	Koparka gasienicowa 0,4 m ³	Cat 323D	15,75	15,30 [dm ³ /h]	240,975	–	650,633
4	Samochód samowyładowczy	IVECO DAILY 65C17	67,49	10,49 [dm ³ /100 km]	176,99	–	477,88
5	Pompa do betonu samochodowa	CIFA K36L-5	4,90	8,20 [dm ³ /h]	40,18	–	108,49
6	Wyciąg	Yato 1050 W	182,43	1,05 [kW]	191,55 [kWh]	689,598	138,124
7	Giętarka do prętów	MAQSTOCK EST16	45,32	1,50 [kW]	67,98 [kWh]	244,73	49,019
8	Zagęszczarka wibracyjna	Wacker Neuson DPU 6555	5,98	1,90 [dm ³ /h]	11,36	–	30,67
9	Walec samojezdny 4–5 t	Walec ROU4T0	0,22	11,90 [dm ³ /h]	2,62	–	7,07
10	Miksokret 28 kW	Brinkmann Estrich Boy 450	46,36	6,90 [dm ³ /h]	319,88	–	863,69
11	Żuraw do 5 t	Żuraw KR 90 - 5	13,37	25 [kW]	334,25 [kWh]	1203,3	241,02
12	Agregat tynkarski z pompą	Kaleta 150 MAX	14,74	7,50 [kW]	110,55 [kWh]	397,98	79,715
Suma			420,16	–	843,225 [dm ³] / 704,33 [kWh]	2535,598	2776,625

Źródło: oprac. własne

Na podstawie Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 15 grudnia 2021 r. w sprawie wskaźnika emisji gazów cieplarnianych dla energii elektrycznej w 2022 r. [2], wskaźnik emisji gazów cieplarnianych energii elektrycznej w 2022 roku wynosi 200,3 g eCO₂/MJ [14]. Stosując powyższy wskaźnik oraz zużycie energii poszczególnych maszyn, obliczono wskaźnik emisji na godzinę ich pracy.

Uwzględniając czasy załadunku, jazdy, wyładunku i manewrowania, przyjęto, że samochód samowyladowczy w ciągu godziny pracy wykona 2,5 cykli na odległość do 5 km. Przeliczając to na dystans, otrzymujemy 1687,25 km. Przyjęto, że spalanie 1 dcm³ oleju napędowego generuje 2,7 kg CO₂ [17], natomiast dla benzyny przyjęto emisję 2,35 kg CO₂/dcm³. Spalanie benzyny przez pompę na godzinę pracy (dane za rok 2021) przyjęto na poziomie 8,2 dcm³ [10].

Łącznie oszacowano przewidywaną emisję na 2,777 tony CO₂.

14.3.4. UTRATA POCHŁANIA NIA CO₂ W WYNIKU ZAJĘCIA TERENU POD BUDOWĘ

Zajęcie terenu pod budowę związane jest z ograniczeniem możliwości wspomagania redukcji emisji gazów cieplarnianych np. przez stosowanie upraw sprzyjających pochłanianiu dwutlenku węgla przez glebę [12]. Poniżej przedstawiono próbę oszacowania śladu węglowego, wynikającego z utraty zdolności pochłaniania węgla przez ekosystem. Obliczenia śladu węglowego, związane z przekształceniem gruntów rolnych i leśnych na cele nierolnicze i nieleśne, z powodu budowy budynków mieszkalnych wykonano na podstawie projektu zagospodarowania terenu [11, 25].

Powierzchnia terenów biologicznie czynnych, która zostanie trwale przekształcona na cele infrastrukturalne, wynosi 257,2 m². Jest to suma powierzchni: zabudowy budynków mieszkalnych – 142,44 m², dojazdu i parkingu – 81,93 m² oraz dojeżdżalnic – 32,82 m².

Inwestycja prowadzona będzie na terenach zieleni niezorganizowanej. Występują tu przede wszystkim ekosystemy łąkowe oraz rzadkie zadrzewienia i zakrzewienia śródpolne. Przyjęto, że najbardziej właściwa przy obliczaniu śladu węglowego będzie utrata magazynowanego węgla, wynikająca z przekształcenia trwałych użytków zielonych (łąk), tj. 1245 ton eCO₂/ha. Stąd ślad węglowy, wynikający z trwałego przekształcenia gleb na cele infrastrukturalne związane z zagospodarowaniem terenu pod inwestycję, wyniesie 32,0214 tony eCO₂.

14.3.5. WYBÓR MATERIAŁÓW

Projektowany budynek, a zwłaszcza przegrody zewnętrzne, należy docieplić. Wybór materiału izolacji termicznej powinien uwzględniać ślad węglowy. Jako podstawę

jego oszacowania wykorzystano deklaracje środowiskowe producentów EPD, w których określona jest wielkość wskaźnika emisji gazów cieplarnianych GWP. Do porównania przyjęto:

1. Styropian EPS KlimaExpert ETA Air System with Keraklima ECO z GWP = 4,727 kg eCO₂/1 m²,
2. Styropian EPS Mannok EPS 150 z GWP = 3,706 kg eCO₂/1 m²,
3. Wełna mineralna Knauf TI 140 U, CLASSIC D-040, FHR 040 z GWP = 0,58 kg eCO₂/1 m².

Uwzględniając ilość materiałów potrzebnych do ocieplenia budynku, określoną na podstawie przedmiaru robót (do wykonania 384,48 m² izolacji), oszacowano wartości śladu węglowego materiałów, kolejno dla styropianów: pierwszego – 1817, drugiego – 1424 i wełny mineralnej – 223 kg eCO₂. Natomiast koszt zakupu potrzebnej ilości analizowanych materiałów wynosi odpowiednio: 37 159,99 zł, 40 877,91 zł, 44 480,49 zł. Jak widać na powyższym przykładzie, mimo znacznie mniejszego śladu węglowego dla wełny mineralnej, przeciętny inwestor bez zachęt, np. w postaci dofinansowania lub rozwiązań regulacyjnych, które będą promować rozwiązania mniej obciążające środowisko, może nie zdecydować się na wybór droższego rozwiązania (jakkolwiek chroniącego środowisko).

14.3.6. WNIOSKI

Biorąc pod uwagę produkcję i dostarczenie betonu, produkcję i dostarczenie stali, użytkowanie maszyn budowlanych oraz utratę pochłaniania CO₂, całość śladu węglowego inwestycji można oszacować na 76–79 ton eCO₂ (tab. 14.5). Część z tego to emisja jednorazowa, spowodowana produkcją surowców niezbędnych do wybudowania budynków, pracami budowlanymi oraz uwolnieniem węgla zmagazynowanego w przekształcanych glebach. Pozostała część, związana z utratą zdolności do pochłaniania CO₂, spowodowana trwałym przekształceniem terenów biologicznie

Tabela 14.5

Szacunkowy ślad węglowy wybranych składowych przy realizacji budynku

Elementy szacunku śladu węglowego	Wielkość śladu węglowego w tonach eCO ₂
Produkcja, transport i użycie betonu	23,9–27,1
Produkcja i transport stali	16,09
Praca maszyn	2,78
Utrata pochłaniania terenów biologicznie czynnych	32,02
Wełna mineralna	ok. 1,00
Suma	75,79–78,99

Źródło: na podstawie obliczeń własnych [25]

czynnych, będzie miała charakter trwały. Oznacza to, że w kolejnych latach po zakończeniu budowy tereny te nie będą pochłaniały i magazynowały dodatkowej ilości dwutlenku węgla.

Oszacowana w niniejszym opracowaniu wielkość śladu węglowego planowanej inwestycji ma charakter pogładowy, ponieważ wiele szczegółowych danych nie jest znanych. Przyjęte założenia są dość ostrożne i przyjmowane na podstawie przykładów z literatury przedmiotu badań. Można zatem przyjąć z wysokim prawdopodobieństwem, że ślad węglowy będzie większy od oszacowanego.

14.4. ANALIZA MOŻLIWOŚCI OGRANICZANIA ŚLADU WĘGLOWEGO W PRZEDSIĘWZIĘCIACH BUDOWLANYCH

Wykonywanie obiektów budowlanych, a następnie ich eksploatacja wymagają zużycia ogromnych ilości różnorodnych surowców i wyrobów, zastosowania pracy wielu maszyn i urządzeń, terenów i innych zasobów, co wiąże się, najogólniej formułując, z emitowaniem gazów cieplarnianych w dużej skali.

Realizacja przedsięwzięcia budowlanego angażuje bardzo wielu uczestników (przedsiębiorstw), biorących udział w realizacji poszczególnych etapów cyklu przedsięwzięcia i w cyklu życia obiektu budowlanego. Mają oni wpływ, w mniejszym lub większym stopniu, pośrednio lub bezpośrednio na generowanie śladu węglowego, którego źródłem jest realizowany produkt/obiekt budowlany, jak również są oni źródłem emisji śladu wskutek swojej działalności podczas wykonywania tego obiektu.

Przyczyną emisji śladu węglowego może być m.in.:

- nieefektywne energetycznie, wysokoemisyjne źródło energii elektrycznej, wykorzystywane do prowadzonej działalności,
- niska efektywność energetyczna budynków, w których działa przedsiębiorstwo,
- energochłonne rozwiązanie stosowane w procesie produkcyjnym,
- stosowanie mało przyjaznych klimatowi opakowań produktów (np. takich, które nie podlegają recyklingowi),
- polityka transportowa i logistyczna, niezgodna z wytycznymi klimatycznymi (np. stosowanie starych, emitujących duże ilości spalin pojazdów transportowych czy korzystanie z usług odległych dostawców).

Za produkcję surowców i wyrobów dla budownictwa odpowiada przemysł materiałów budowlanych. Producenci są odpowiedzialni za opracowywanie deklaracji środowiskowych produktu. Daje ona wiedzę o emisjach i stanowi podstawę do decyzji odnośnie do wyboru produktu. Na jakość, w kontekście emisji szkodliwych wytwarzanych produktów, wpływa z kolei odbiorca/klient.

Spośród wielu materiałów budowlanych zużywanych w masowych ilościach należy wyróżnić beton i stal. Produkcja mieszanki betonowej, w zależności od klasy, wiąże się z emisją 140–310 kg eCO₂/t. Jest to wprawdzie wielokrotnie mniejsza wartość w porównaniu do stali (ok. 1900 kg eCO₂/t), jednak dopiero po uwzględnieniu ilości betonu zużywanego globalnie w ciągu roku – 3,8 bln m³ – widać, jak dużym jest emitentem. Według szacunków publikowanych w [8] składnik betonu – cement – stanowi 8% rocznej globalnej emisji CO₂. Podobnie można porównywać inne materiały stosowane w budownictwie na zasadzie substytucji/wymienności [16], uwzględniając ślad węglowy.

Dlatego redukcja emisji dwutlenku węgla w produkcji betonu odgrywa istotną rolę ze względu na dobre parametry konstrukcyjne i powszechne zastosowanie [5]. W przypadku innych materiałów budowlanych stosowanie tych o mniejszym śladzie węglowym nie jest takie łatwe. Jest to jednak możliwe dzięki wykorzystaniu materiałów nieprzetworzonych, pochodzenia lokalnego lub takich, których produkcja nie pochłania dużo energii.

Przeprowadzenie kompleksowej oceny oddziaływania poszczególnego wyrobu na środowisko uprościłoby udostępnienie ogólnodostępnych baz danych o emisyjności produktów [27]. Jednak ich liczba jest jeszcze ograniczona, a ich niekompletność wpływa na znaczne wydłużenie procesu oceny, zwiększa koszty oraz prowadzi do ograniczenia zakresu analizy.

Jednym z kierunków obranych przez projektantów i konstruktorów jest redukcja udziału elementów betonowych w budynku i zastępowanie go materiałami o niskim śladzie węglowym (np. drewnem). Należy zwrócić uwagę na rozwiązania konstrukcyjne, które powinny cechować się zoptymalizowanymi wymiarami względem zapewnianej nośności. Można również rozważyć wykorzystanie materiałów pochodzących z odzysku, w części lub w całości.

Zmniejszenie śladu węglowego można uzyskać również przez wykorzystywanie materiałów budowlanych odpornych na czynniki zewnętrzne. Materiały z dłuższą żywotnością to możliwość użytkowania budynku przez dłuższy czas, z mniejszą liczbą remontów. Używając materiałów bardziej trwałych, zmniejszamy koszty i częstotliwość napraw oraz zmniejszamy ilość materiałów potrzebnych na wymiany, co przekłada się na redukcję śladu węglowego budynku.

Rachunek kosztów metodą LCC (ang. *Life Cycle Cost*) może z kolei przynieść ciekawe wnioski, podsumowując słuszność zastosowania droższych, jeśli chodzi o koszt inwestycyjny, rozwiązań, lecz mających cechy prośrodowiskowe.

Na ślad węglowy ma również wpływ transport materiałów od bram fabryki, w której nastąpiła produkcja wyrobu, do miejsca wbudowania w obiekt. Kupując materiały od lokalnych dostawców, skutecznie zmniejszamy emisję dwutlenku węgla pochodzącą z transportu. Redukcja odpadów może nastąpić w wyniku wykorzystania materiałów prefabrykowanych lub systemów modułowych. Metody zarzą-

dzania logistyką zaopatrzenia budowy w materiały mają wpływ na redukcję śladu węglowego przedsięwzięcia budowlanego.

Wytyczne projektowania budynków, prowadzące do obniżenia śladu węglowego, mogą być realizowane na wiele sposobów. Niektóre z nich to:

- staranny dobór materiałów budowlanych konstrukcyjnych, wykończeniowych, instalacyjnych i innych na podstawie możliwie najniższej wartości emisji gazów cieplarnianych,
- optymalizacja produktu przez alternatywne stosowanie materiałów lepszej jakości, np. charakteryzujących się większą nośnością lub lżejszych od konwencjonalnych,
- stosowanie wyrobów produkowanych lub pozyskiwanych w pobliżu placów budowy,
- wybór materiałów, które zapewnią maksymalną możliwą trwałość również systemom konstrukcyjnym, które tworzą, co zmniejszyłoby częstotliwość koniecznej ich wymiany i prac konserwacyjnych, a wpłynęłoby na wydłużenie cyklu życia budynków.

Czas bezawaryjnej eksploatacji obiektu budowlanego, niewymagającej napraw, remontów i w konsekwencji dodatkowego zużycia energii, zależy od:

- a) optymalnego doboru materiałów dla danej lokalizacji i klimatu,
- b) odpowiedniej wzajemnej konfiguracji materiałów i elementów budowlanych,
- c) odpowiedniej instalacji wstępnej elementów budowlanych,
- d) unikania stosowania technologii i materiałów podatnych na potencjalne uszkodzenia mechaniczne,
- e) wysokiej trwałości materiałów.

Dematerializację, będącą jedną z podstawowych strategii w zrównoważonym projektowaniu, można zatem rozpatrywać na trzy sposoby: przez zmniejszenie ilości materiałów wykorzystywanych w budownictwie, przez sugestie projektowe dla bardziej racjonalnej konserwacji elementów budowlanych oraz przez rzadsze zastępowanie zainstalowanych materiałów w budownictwie.

Dematerializację należy rozważyć na etapie projektowania, jeżeli ma być realizowana przez zmniejszenie ilości materiałów wykorzystywanych w budownictwie. W tym zakresie priorytetem powinny być technologie elewacyjne, które wymagają znacznego wkładu materiałowego podczas prac budowlanych. Ilości materiałów w budynkach można zmniejszyć na różne sposoby, np. przez:

- wymianę niektórych elementów wykonanych z materiałów tradycyjnych i konwencjonalnych na takie o mniejszej grubości, z cieńszymi strukturami, jeśli to możliwe,
- zastosowanie zmodyfikowanych technologii, pozwalających na rezygnację z niektórych warstw w ramach kombinowanych systemów elewacyjnych,

- zastosowanie niekonwencjonalnych rozwiązań, pozwalających na eliminację niektórych elementów budynku, np. kotew mocujących w systemach elewacyjnych, które stanowią mostki termiczne.

Wymiana komponentów zainstalowanych w budynku na nowe elementy i materiały zwiększa całkowity cykl życia zawartej w nim energii. Taka operacja może wystąpić z różnych przyczyn, takich jak: uszkodzenia mechaniczne, przyspieszony proces starzenia, wadliwe systemy mocowania itp. Niektóre próby przeprowadzenia prac naprawczych mogą czasami poprawić stan techniczny budynku, ale rzadko przynoszą zadowalające efekty estetyczne. W większości przypadków uszkodzony element wymaga wymiany. Jest to nieodłączny wymóg zrównoważonego projektowania: dogłębna analiza każdego zaprojektowanego elementu budynku pod kątem jego nieskomplikowanego demontażu i wymiany. Elementy wielowarstwowe powinny być produkowane tak, aby możliwe było ich rozdzielenie.

Co do zasady możemy wymienić czynniki, które wpływają na przyszłą potrzebę wymiany materiałów w budynkach i ich częściach. Są to:

- niska trwałość materiałów,
- nieodpowiedni kształt elementów i ich detali podatnych na uszkodzenia,
- lokalizacja elementów w miejscach narażonych na uszkodzenia mechaniczne celowe lub przypadkowe,
- narażenie na intensywne niszczące działanie agresywnych czynników klimatycznych,
- wadliwy system mocowania elementów do struktury budynku.

Zagadnienie śladu węglowego w materiałach i technologiach budowlanych zwykle nie jest szeroko badane, a wyniki badań nie są brane pod uwagę przez większość projektantów. Jest to raczej problem teoretyczny, a nie praktyczny. Literatura naukowa i fachowa obejmuje przede wszystkim pierwszy aspekt energii w budynkach, a jedynie marginalnie ślad węglowy. Znaczenie tego zagadnienia jest celowo ignorowane w niektórych źródłach, które twierdzą, że energia wbudowana odpowiada tylko za 10%, a w niektórych przypadkach za 2%, całkowitego zużycia energii, a więc liczba ta jest nieporównywalna z eksploatacją (energiją w użyciu) w budynkach. Podobne podejście do tego zagadnienia można znaleźć w najpopularniejszych systemach certyfikacji budynków, które zazwyczaj są wzajemnie niekompatybilne. W przeciwieństwie do tego inne źródła wskazują, że w ostatnim czasie energia operacyjna została zmniejszona (w mieszkaniach), a względny wpływ energii wbudowanej wzrósł. W wielu publikacjach podkreśla się, że to energia wbudowana reprezentuje najwyższe zużycie we wszystkich odmianach jej źródeł.

Przyglądając się analizom dotyczącym doboru technologii wykonania budynku, można zauważyć przypadki budynków z niższym śladem węglowym wbudowanym i wyższym śladem węglowym operacyjnym. Ślad węglowy wbudowany zależy między innymi od grubości warstw przegród budynku, zwłaszcza warstwy termicznej. Zmniejszając ich grubość, zmniejszamy ślad węglowy wbudowany, jednak

zwiększeniu ulega zużycie energii budynku podczas jego eksploatacji, a tym samym zwiększa się wartość wskaźnika dla śladu węglowego operacyjnego. Należy jednak pamiętać, że wiele różnych czynników wpływa na wartość wskaźnika CO_{2e} budynku w jego cyklu życia. Optymalne wartości dla budynku będą oscylowały wokół punktu równowagi między minimalizacją śladu węglowego wbudowanego oraz operacyjnego.

Podniesienie świadomości i wiedzy projektantów w tym zakresie, przez prezentację rozwiązań wadliwych, prowadzących do efektów sprzecznych z wytycznymi dematerializacji, może być pomocne i powodować wzrost świadomości interesariuszy w procesach budowlanych. Z dużym prawdopodobieństwem przyczyni się również do podniesienia jakości projektów architektonicznych i wnoszonych budynków, wydłużając ich cykl życia, zmniejszając koszty i zwiększając efektywność wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Odpowiednie kompetencje architektów i inżynierów budownictwa można by również wzmocnić przez działania organizacji zawodowych, takich jak izby architektów i inżynierów budownictwa.

Na każdym z etapów cyklu przedsięwzięcia istnieje potencjał ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. W fazie wyrobu można skupić się na dostarczeniu do produkcji surowców z recyklingu oraz zapewnieniu energii do produkcji wyrobów budowlanych pochodzących ze źródeł odnawialnych. Podobnie, rezygnując z węglowodorów do ogrzewania budynku, obniżamy jego ślad węglowy. Należy również zawczasu pomyśleć o zakończeniu eksploatacji obiektu i jego rozbiórce. Wszystkie użyte do budowy materiały budowlane powinny być niskim nakładem kosztów i energii możliwe do ponownego wykorzystania. Nie można też pominąć ważnej kwestii, jaką jest odzyskanie surowców i ich ponowne wykorzystanie w procesie produkcyjnym. Recykling, bo o nim mowa, dzięki wykorzystaniu zasobów naturalnych już będących w obiegu, również jest jedną z metod ograniczania śladu węglowego.

Sytuacją idealną byłoby budowanie z odnawialnego budulca, którego produkcja jest nieszkodliwa dla środowiska. Odpowiedzialne projektowanie w perspektywie przyszłości jest jedyną drogą i najbardziej opłacalną opcją [6].

Działania zmierzające do zmniejszania śladu węglowego na wszystkich etapach życia budynku muszą stać się obowiązkiem. Aby osiągnąć cele porozumienia paryskiego i scenariusz utrzymania globalnego wzrostu temperatury poniżej 1,5°C, sektor budowlany musi przejść całkowitą dekarbonizację do 2050 roku. Na projektantach i wykonawcach robót budowlanych spoczywa, w dużym stopniu, odpowiedzialność, żeby zwłaszcza nowe budynki w jak najmniejszym stopniu wpływały negatywnie na środowisko, ponieważ zmniejszające ślad węglowy materiały budowlane, rozwiązania projektowe, stosowane technologie budowania i organizacja pracy na budowie są już dostępne, konieczne jest tylko ich wykorzystanie na większą skalę niż obecnie.

14.5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione wyniki obliczeń śladu węglowego dla przykładowego budynku, na podstawie jego dokumentacji projektowej dla wybranych materiałów budowlanych o odmiennych parametrach, mają na celu zwrócenie uwagi na wpływ podejmowanych decyzji przez inwestorów w zakresie oddziaływania na emisję CO₂ podczas realizacji inwestycji. Dobór materiałów i technologii, a także rozwiązań organizacyjnych budowy mają wpływ na oddziaływanie realizacji przedsięwzięcia budowlanego na środowisko. Wskazują możliwość redukcji szkodliwych wpływów i ich sukcesywnie wyeliminowanie przez stosowanie rozwiązań zamiennych.

Istotnym elementem doboru wyrobów i technologii budowy jest oszacowanie wpływu na środowisko emisji szkodliwych związków, w tym gazów cieplarnianych, mierzonych wskaźnikiem CO_{2e} (ślad węglowy), podczas wytwarzania, budowy i eksploatacji obiektów budowlanych według proponowanych technologii budowania. Metodą oceny wpływu na środowisko jest ocena cyklu życia – LCA (*Life Cycle Assessment*), znana również jako analiza cyklu życia – LCA (*Life Cycle Analysis*). Szeroko rozpoznane procedury dla przeprowadzenia metody LCA opisano w serii norm dotyczących zarządzania środowiskiem: ISO 14040 i ISO 14044 [20, 21] oraz ISO 14048 [22] i ISO 14049 [9]. W ocenie cyklu życia można uwzględnić aspekty ekologiczne, społeczne, a także finansowe. Aspekty ekologiczne oceniane są za pomocą metody LCA (*Life Cycle Analysis*), aspekty społeczne za pomocą S-LCA (*Social Life Cycle Assessment*), natomiast metoda E-LCC (*Environmental Life Cycle Costing*) łączy analizę ekonomiczną ze środowiskową. W metodzie LCA jednym z ocenianych wskaźników jest GWP, dotyczący emisji gazów cieplarnianych.

Znaczącym postęпом w przypadku obliczania śladu węglowego jest unifikacja metodyki prezentowanej w normie ISO 14067. Istotne jest jednak opracowanie odpowiednich i ogólnie dostępnych (bezpłatnych) baz danych o wpływie na środowisko poszczególnych procesów i wyrobów, które można zaimplementować do tworzonych kalkulatorów. Taką inicjatywę podjęła kilka lat temu Europejska Platforma LCA, zlokalizowana w JRC Ispra (EPLCA 2014), gdzie tworzona i uaktualniana jest baza danych ILCD. Obecnie przy analizach LCA często korzysta się z drogich komercyjnych baz danych, np. Ecoinvent, i oprogramowań, które również umożliwiają obliczenie śladu węglowego. Ponadto według zaleceń Komisji Europejskiej (Zalecenie Komisji nr 2013/179/UE 2013) opracowane zostaną narzędzia pomocnicze, takie jak kryteria jakościowe dla baz danych LCA, systemy zarządzania danymi, arbitraż naukowy, systemy zapewniania zgodności i weryfikacji oraz organy koordynujące na poziomie UE i państw członkowskich, zatem można się spodziewać, że powstaną nowe spójne programy w zakresie obliczania śladu środowiskowego i węglowego.

Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty związane z emisją gazów cieplarnianych podczas realizacji przedsięwzięcia i cyklu życia obiektu budowlanego oraz możliwości działań prowadzących do jej redukcji, konieczne jest stosowanie w tym zakresie w projektowaniu i realizacji inwestycji budowlanych podejścia holistycznego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BBC news services, *Climate change: The massive CO2 emitter you may not know about*, <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [2] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej (2021), *Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 15 grudnia 2021 r. w sprawie wskaźnika emisji gazów cieplarnianych dla energii elektrycznej w 2022 r.*, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?-id=WDU20210002348>.
- [3] EEA Grants Portugal, *C+D: Close the loop by Disclosing the benefits of buildings deconstruction and materials re-use*, <https://www.eeagrants.gov.pt/en/programmes-/environment/projects/projects/cplused-close-the-loop-by-disclosing-the-benefits-of-buildings-deconstruction-and-materials-re-use/>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [4] EUR-Lex, *Porozumienie paryskie*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=celex%3A22016A1019%2801%29>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [5] Garbacz A., Urbańska P. (2021), *Ślad węglowy betonu*, Budownictwo, Technologie, Architektura, 4, 56–61.
- [6] Grupa Saint-Gobain (2021), *Ślad węglowy domu jednorodzinnego pod lupą*, https://www.saint-gobain.pl/sites/sgpl.master/files/downloads/slady_weglowy_domu.pdf.
- [7] Henan Superior Abrasives, *Conventional grade C20, C25 and C30 concrete mix ratio*, <http://www.microsilica-fume.com/conventional-grade-c20-c25-c30-concrete-mix-ratio.html>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [8] InEnergy (2010), *Cement and Concrete Institute Concrete Industry Greenhouse Gas Emissions*, <https://cemcon-sa.org.za/wp-content/uploads/2021/03/Cement-and-Concrete-Institute-Concrete-Industry-Greenhouse-Gas-Emissions.pdf>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [9] ISO (2012), ISO/TR 14049:2012, Environmental management – Life cycle assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis.
- [10] Joint Assistance to Support Projects in European Regions (2015), *Niebieska księga. Nowe wydanie 2014–2020, Sektor kolejowy, Infrastruktura kolejowa*, <https://rpo.opolskie.pl/wp-content/uploads/2015/04/Niebieska-Ksi%C4%99ga-Infrastruktura-kolejowa.pdf>.

- [11] Karaczun Z., Kassenberg A., Siwicki P. (2019), *Oszacowanie śladu węglowego rozbudowy drogi wodnej na środkowym odcinku rzeki Odry (od Brzegu Dolnego do ujścia Nisy Łużyckiej)*, Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój 2014-2020, Nr projektu: POWR.02.16.00-00-0070/17-00, Warszawa.
- [12] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego i Rady (2021), *Zrównoważony obieg węgla*, Komisja Europejska, Bruksela.
- [13] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, *Wielkość emisji – dane podstawowe*, <https://www.kobize.pl/pl/article/krajowa-inwentaryzacja-emisji/id/384/gazy-cieplarniane>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [14] Kryzia D., Kopacz M., Orzechowska M. (2015), *Szacowanie emisji ditlenku węgla i zużycia oleju napędowego w samochodach osobowych*, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 90, 79–92.
- [15] Kuczera A., Płoszaj-Mazurek M. (2021), *Zerowy ślad węglowy budynków. Mapa drogowa dekarbonizacji budownictwa do roku 2050*, <https://plgbc.org.pl/projekty/roadmap/>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [16] Linczowski K., Radziejowska A., Sobotka A. (2023), *ACE_Determinants of substitution in the environmental aspect of sustainable construction*, Archives of Civil Engineering, 1, 163–179.
- [17] LinkedIn, *„Indeksacja Paliwowa” w branży betonowej*, <https://www.linkedin.com/pulse/indeksacja-paliwowa-w-bran%C5%BCy-betonowej-dawid-mrowiec/?originalSubdomain=pl>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [18] Murator plus, *Ślad węglowy będą liczyć architekci. Obowiązek dla każdego budynku od 2030*, <https://www.muratorplus.pl/biznes/wiesci-z-ryнку/śladoweglowy-co-to-aa-o8Wc-8de3-nRo7.html>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [19] Pewny Cement, *Przepis na beton*, <https://pewnycement.pl/2015/08/przepis-na-beton/>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [20] Polski Komitet Normalizacyjny (2009a), PN-EN ISO 14040:2009 – wersja polska, Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura.
- [21] Polski Komitet Normalizacyjny (2009b), PN-EN ISO 14044:2009 – wersja polska, Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne.
- [22] Polski Komitet Normalizacyjny (2003), Tłumaczenie ISO/TS 14048:2002, Polskie tłumaczenie ISO/TS 14048 „Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Format dokumentowania danych”.
- [23] *Projekt budowlano-wykonawczy – architektura. Dwa budynki mieszkalne jednorodzinne połączone klatką schodową* (2014), „MWH-architekci”, Warszawa.
- [24] Sweco Polska Sp. z o.o., *Jak potężny jest ślad węglowy budownictwa*, <https://www.sweco.pl/aktualnosci/blog/jak-poteczny-jest-śladoweglowy-budownictwa>, dostęp: 30.06.2022 r.
- [25] Śledź G. (2022), *Projekt budynku z uwzględnieniem minimalizacji śladu węglowego przy doborze rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych*

i technologiczno-organizacyjnych, praca dyplomowa, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

- [26] Twitter, *Global Energy consumption by Source from 1800 to present*, https://twitter.com/stats_feed/status/1535646216574234624, dostęp: 30.06.2022 r.
- [27] Wałach D., Sagan J., Jaskowska-Lemańska J. (2017), *Ocena środowiskowa w zintegrowanym procesie projektowania obiektów budowlanych*, Czasopismo Techniczne, 8, 143–151.

15. MODEL SZACOWANIA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA BUDYNKÓW (WLC) UMOŻLIWIAJĄCY KWANTYFIKACJĘ DODATKU KOSZTOWEGO ZA RYZYKO

Damian Wieczorek¹

15.1. WSTĘP

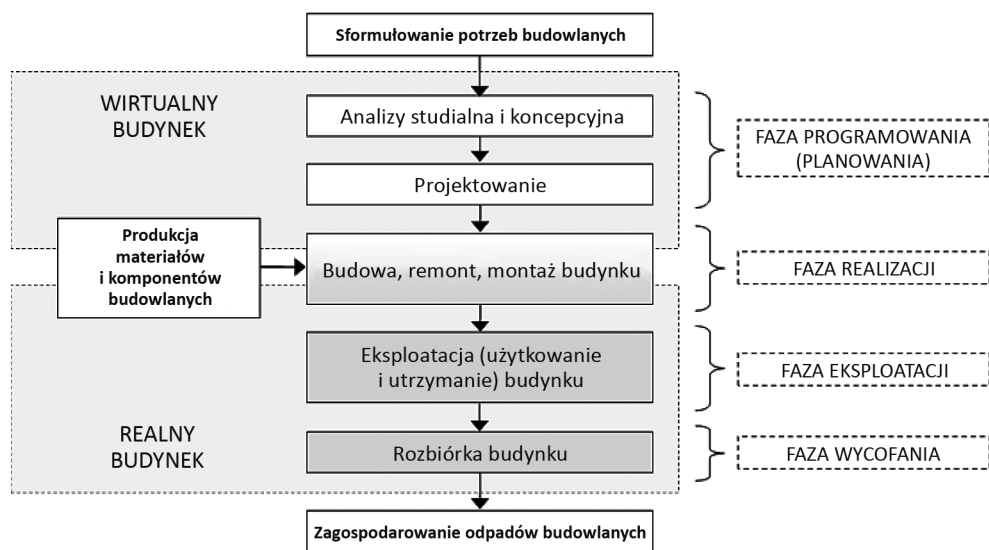
Podstawowym pojęciem charakteryzującym zagadnienie zawarte w tytule niniejszego rozdziału jest cykl życia budynku, który jest różnie definiowany w literaturze przedmiotu. Najpełniej pojęcie cyklu życia opisuje norma ISO 15686-5:2017 Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life cycle costing [10], która stanowi jedną z części pakietu międzynarodowych norm ISO 15686 do planowania okresu użytkowania budynków i budowli. W punkcie 3.3.4 normy wyróżniono definicję cyklu życia (ang. *life cycle*), który jest rozumiany jako kolejne, powiązane ze sobą okresy, obejmujące wszystkie etapy – począwszy od budowy budynku, przez eksploatację (użytkowanie i utrzymanie) aż do jego wycofania z eksploatacji, tj. likwidację, rozbiórkę wraz z utylizacją materiałów z niej pochodzących.

W projekcie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 10 listopada 2017 r. w sprawie metody kalkulacji kosztów cyklu życia budynków oraz sposobu przedstawiania informacji o tych kosztach [23] również zdefiniowano cykl życia budynku. Zgodnie z definicją zawartą w § 2 projektu, cykl życia budynku miał oznaczać wszelkie, możliwie kolejne lub powiązane fazy jego istnienia, zwłaszcza nabycie, utrzymanie, użytkowanie oraz rozbiórkę budynku. Co warto podkreślić, we właściwym Rozporządzeniu Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 11 lipca 2018 r. w sprawie metody kalkulacji kosztów cyklu życia budynków oraz sposobu przedstawiania informacji o tych kosztach [24], przygotowanym na podstawie jego projektu z listopada 2017 roku, definicji cyklu życia budynku już nie zawarto. Przedmiotowej definicji nie wyodrębniono również w aktualnym Rozporządzeniu Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 23 listopada 2021 r. [25] o tożsamym do powyższego tytule.

¹ Katedra Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, e-mail: damian.wieczorek@pk.edu.pl.

W obszarze badań Sekcji Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk cyklem życia budynku nazywany jest pewien skończony proces, obejmujący działania związane z fazami realizacji przedsięwzięcia budowlanego, polegającego na planowaniu, wykonaniu i eksploatacji budynku aż do jego wyburzenia, w których budynek znajduje się w różnych stanach istnienia, tzn. materialnie istnieje lub materialnie nie istnieje [13]. Podstawowymi fazami charakteryzującymi opisane powyżej przedsięwzięcie budowlane są kolejno fazy: (i) programowania (zwana również fazą planowania), (ii) realizacji, (iii) eksploatacji (inaczej użytkowania i utrzymania) oraz (iv) wycofania [7, 9, 13, 16].

Działania polegające na analizie potrzeb budowlanych sformułowanych przez inwestora, badaniu uwarunkowań techniczno-ekonomiczno-środowiskowych oraz opracowaniu koncepcji i projektowaniu wchodzi w zakres fazy programowania (planowania). Tę pierwszą fazę cyklu życia budynku utożsamia się z terminem tzw. wirtualnego (materialnie nieistniejącego) budynku. Eksploatację, czyli użytkowanie i utrzymanie oraz rozbiórkę budynku, przypisuje się odpowiednio fazom eksploatacji i wycofania. Obie te fazy związane są z realnie (materialnie) istniejącym budynkiem. Zanim jednak dojdzie do eksploatacji budynku, następuje proces jego stopniowego i systematycznego przekształcenia z budynku wirtualnego w realny. Realizacja budynku (np. budowa, montaż) początkuje ten etap cyklu życia, w którym budynek zaczyna materialnie istnieć. Faza ta nosi nazwę fazy realizacji i z nią bezpośrednio związane są procesy produkcji budowlanej, w tym produkcja materiałów



Rys. 15.1. Cykl życia budynku według naukowców reprezentujących specjalność Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych. Źródło: oprac. własne na podstawie [7, 13, 22]

oraz komponentów budowlanych [13]. Zagospodarowanie odpadów budowlanych następuje po rozbiórce budynku, która kończy jego cykl życia [16]. Opisany tu ciąg procesów przedstawia schematycznie rys. 15.1, który stanowi uogólniony pogląd na pojęcie cyklu życia budynku, opracowany przez polskich naukowców.

Opisana we wprowadzeniu interpretacja pojęcia cyklu życia budynku odnosi się do podstawowych kierunków działań Unii Europejskiej, dzięki którym możliwe jest ograniczenie pogarszania się szans rozwoju przyszłych pokoleń. Działania te są związane z wdrożeniem zasad zrównoważonego rozwoju [26]. Ze względu na wyczerpywanie się źródeł energii konwencjonalnej, wzrost kosztów jej nabycia oraz rosnącą świadomość ekologiczną społeczeństw na całym świecie, dąży się do ograniczania kosztów związanych m.in. z budową, użytkowaniem i wycofaniem (likwidacją) obiektów budowlanych, np. przez zasadę myślenia w kategoriach cyklu życia produktu (ang. *life cycle thinking*). Zgodnie z jego definicją, myślenie w kategoriach cyklu życia produktu oznacza ukierunkowanie na zmniejszenie całkowitego oddziaływania na środowisko, które może wystąpić w każdej fazie jego cyklu życia (projektowanie, produkcja, użytkowanie i wycofanie). Głównym aspektem całościowego ujęcia cyklu życia produktu jest identyfikacja zagrożeń środowiskowych w każdej fazie jego cyklu życia, aby możliwe było uniknięcie przenikania tych zagrożeń z jednej fazy do innej (kolejnej) [26]. Wprowadzenie myślenia w kategoriach cyklu życia produktu jest natomiast możliwe przez zastosowanie odpowiednich narzędzi lub technik, wśród których wyróżnić można:

- środowiskową ocenę cyklu życia – ang. *life cycle assessment (LCA)*,
- zarządzanie cyklem życia – ang. *life cycle management (LCM)*,
- ocenę kosztów cyklu życia – ang. *life cycle cost analysis (LCCA)*,
- projektowanie ekologiczne – ang. *design for the environment (DfE)*.

W niniejszym rozdziale zaprezentowana zostanie budowa i przykład praktyczny działania autorskiego podejścia do szacowania kosztów życia budynków z uwzględnieniem oddziaływania czynników ryzyka. Opracowany model wpisuje się w zagadnienie myślenia w kategoriach cyklu życia produktu przez nawiązanie do techniki oceny kosztów cyklu życia i dotyczy części zagadnień poruszonych przez autora w pracy doktorskiej *Modelowanie kosztów cyklu życia budynków z uwzględnieniem czynników ryzyka* [28].

15.2. POJĘCIA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA (LCC) I CAŁOŚCI KOSZTÓW ŻYCIA BUDYNKU (WLC)

W literaturze przedmiotu istnieje wiele definicji kosztów cyklu życia, które zależą od dziedziny badań oraz materiału badawczego. W przypadku budynków za najważniejsze można uznać definicje, według których koszty cyklu życia budynku (ang. *life cycle costs, LCC*) to:

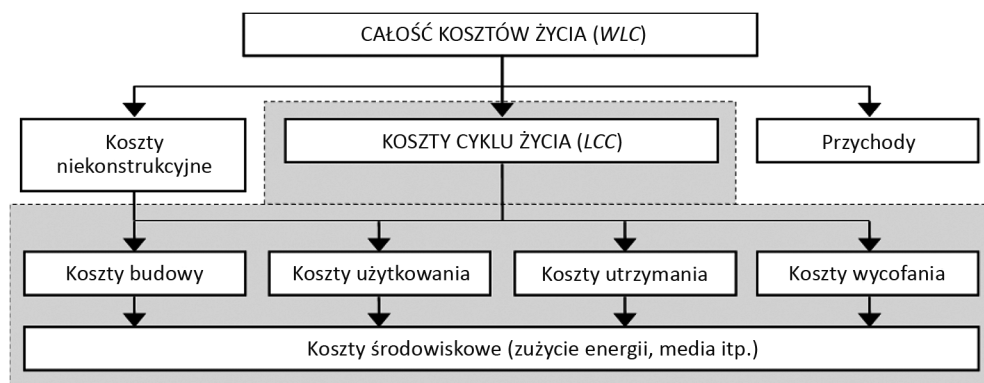
- wyrażona w jednostkach walutowych wielkość wszystkich istotnych kosztów ponoszonych w cyklu życia budynku, z uwzględnieniem kosztów wpływających na dostępność, jak również niezawodne i bezpieczne działanie budynku w okresie analizy [3],
- wyrażona w jednostkach walutowych wartość kosztów ponoszonych w cyklu życia budynku lub jego części, która uwzględnia koszty spełnienia wymagań eksploatacyjnych [10],
- suma wszystkich kosztów ponoszonych podczas cyklu życia budynku, systemu lub produktu, która zawierać powinna koszty projektu, budowy, pozyskania, działania, konserwacji oraz wartość rezydualną, jeśli takowa istnieje [27].

Odnosząc się do definicji pojęcia kosztów cyklu życia budynku, którą przedstawiono w punkcie 3.1.7 normy [10], należy wskazać na konieczność różnicowania zakresu kosztów w ekonomicznych analizach cyklu życia. Ta kwestia została doprecyzowana w punkcie 4.2 normy. Zwykle analizy *LCCA* obejmują zakres kosztów poniesionych w okresie analizy (w aspektach technicznym, funkcjonalnym i ekonomicznym), lecz norma [10] dopuszcza, aby w analizach, poza kosztami inwestycyjnymi, eksploatacyjnymi oraz kosztami wycofania, uwzględniane mogły być również tzw. koszty niekonstrukcyjne (ang. *non-construction costs*). Koszty te związane są bezpośrednio z realizacją przedsięwzięcia budowlanego i obejmują np. podatki, koszty nabycia terenu itp.

Norma [10] odnosi się ponadto do kwestii kosztów ponoszonych przez przyszłych użytkowników. Przedstawiony jest w niej przykład, gdzie podmiotem ponoszącym koszty czynszu w trakcie eksploatacji budynku jest użytkownik (najemca), a nie inwestor (właściciel). W takim przypadku po stronie inwestora (właściciela) pojawia się korzyść materialna, która dla użytkownika (najemcy) jest kosztem. W normie sytuacja ta określona jest mianem przychodu (ang. *income*), który jest kwalifikowany po stronie inwestora (właściciela). Norma [10] w punkcie 3.1.14 rozróżnia wyraźnie sytuację opisaną w powyższym przykładzie i definiuje pojęcie całości kosztów życia (ang. *whole life costs, WLC*) jako wielkość wyrażoną w jednostkach walutowych przyszłych kosztów i korzyści ponoszonych w cyklu życia budynku lub jego części, która uwzględnia koszty spełnienia wymagań eksploatacyjnych.

Na rys. 15.2 wyjaśniono podstawową zależność zachodzącą pomiędzy pojęciami całości kosztów życia budynku a kosztami cyklu życia budynku – *LCC* zawierają się w *WLC*.

Analizując informacje przedstawione na rys. 15.2, można dostrzec, że koszty cyklu życia budynku odnoszą się wyłącznie do kosztów ponoszonych w fazach jego cyklu życia. Jeśli zostaną dodane do nich koszty niekonstrukcyjne oraz przychody, to tak zsumowaną wielkość powinno się rozpatrywać przez wzgląd na normowe pojęcie całości kosztów życia budynku. Ważne staje się wtedy, aby w rachunku sumacyjnym koszty cyklu życia budynku zostały określone jako wielkości ujemne, a przychody jako wielkości dodatnie.



Rys. 15.2. Elementy całości kosztów życia (*WLC*) oraz kosztów cyklu życia (*LCC*) budynku.

Źródło: oprac. własne na podstawie normowego rys. 2 [10]

Do podstawowych kryteriów podziału kosztów cyklu życia budynku zalicza się:

- podział ze względu na fazy cyklu życia,
- podział ze względu na podmiot ponoszący dany rodzaj kosztu.

W analizach kosztów cyklu życia budynków, oprócz kosztów konwencjonalnych, związanych z realizacją, eksploatacją i wycofaniem budynku, uwzględnia się również koszty środowiskowe, które dotyczą wpływu na środowisko naturalne, np. emisji CO₂, zużycia energii, itp. [10], oraz koszty społeczne [17, 26]. W poszczególnych fazach cyklu życia budynku wyróżnić można koszty początkowe (inwestycyjne i finansowania), koszty eksploatacji (użytkowania i utrzymania budynku) oraz koszty wycofania. Podobnie jest z przychodami. Te również można zidentyfikować w każdej z faz cyklu życia budynku z wyłączeniem fazy programowania [18].

Szczegółowy podział kosztów przypisanych do faz cyklu życia budynków przedstawiono w tabeli 15.1. Tabela 15.2 obrazuje natomiast podział przychodów.

Odnosnie do kryterium podziału poszczególnych rodzajów kosztów cyklu życia budynku między podmioty ponoszące koszty, to w przypadku przedsięwzięć budowlanych, polegających na budowie budynków (mieszkalnych, niemieszkalnych, usługowych lub łączących funkcje) i późniejszej ich eksploatacji aż do wycofania, są nimi podstawowi uczestnicy przedsięwzięcia budowlanego, tj. inwestor oraz wykonawca. Dodatkowo do tych podmiotów zaliczyć można przyszłych nabywców (ewentualnie najemców) powierzchni mieszkalnych lub usługowych, czyli użytkowników. Tabela 15.3 przedstawia podział kosztów ze względu na podmiot, który może je ponosić w trakcie programowania, realizacji, eksploatacji lub wycofania budynku.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy źródeł literaturowych, część kosztów o znaczeniu społecznym i środowiskowym (np. uszczerbek na zdrowiu poszkodowanych pracowników budowlanych, wywóz odpadów czy skażenie środowiska), która może być ponoszona przez podmioty wymienione w tabeli 15.3, obciążać

w rzeczywistości będzie nie inwestora, nie wykonawcę czy użytkownika, a ogół społeczeństwa, na którego ten zakres kosztów zostanie przeniesiony [10, 15].

Tabela 15.1

Podział kosztów mogących wystąpić w poszczególnych fazach cyklu życia budynku

Rodzaj kosztów			Fazy cyklu życia			
			P	R	E	W
Początkowe	Inwestycyjne	Nabycie terenu lub jego zapewnienie	X			
		Analiza koncepcyjna i studialna	X			
		Projektowanie	X			
		Realizacja budynku	Koszty robocizny	X		
			Koszty nabycia materiałów budowlanych	X		
			Koszty pracy sprzętu	X		
		Wypożyczenie budynku		X		
		Koszty obsługi	X	X		
	KF	Podatki (np. VAT, PCC)	X	X		
		Oplaty (np. uzyskanie pozwoleń, odsetki, koszty wymuszone skutkami środowiskowymi i gospodarczymi)	X	X		
Operacyjne	Okresowe	Związane z konstrukcją	utrzymanie, konserwacja, wymiana elementów, naprawy, remonty, przeglądy okresowe			X
		Związane z wykończeniem				X
		Obsługa okresowa				X
	Roczne	Administracja			X	
		Ubezpieczenia			X	
		Koszty środowiskowe – media (energia, woda, ścieki)			X	
		Koszty środowiskowe – utrzymanie czystości (sprzątanie)			X	
		Utrzymanie i konserwacja bieżące			X	
		Podatki (np. podatek od nieruchomości, środowiskowy)			X	
	Wycofania	Likwidacja, wyburzenie				X

Źródło: oprac. własne na podstawie [2, 6, 10, 29].

Legenda: **KF** – koszty finansowania, **P** – faza programowania, **R** – faza realizacji, **E** – faza eksploatacji, **W** – faza wycofania

Tabela 15.2

Podział przychodów mogących zaistnieć w fazach cyklu życia budynków

Rodzaj przychodów		Fazy cyklu życia		
		R	E	W
Sprzedaż powierzchni mieszkalnej, usługowej i innych		X	X	
Wynajem powierzchni mieszkalnej, usługowej i innych			X	
Odsprzedaż	Wypożyczenie		X	X
	Instalacje		X	X
	Materiały z odzysku			X
Sprzedaż budynku				X
Sprzedaż terenu				X

Źródło: oprac. własne na podstawie [10].

Legenda: **R** – faza realizacji, **E** – faza eksploatacji, **W** – faza wycofania

Tabela 15.3

Podział kosztów cyklu życia budynków ze względu na podmiot je ponoszący

Podmiot	Rodzaj kosztów
Inwestor (właściciel)	Rozpoznanie rynku
	Nabycie terenu pod budynek
	Analiza koncepcyjna i studialna
	Projektowanie budynku
	Podatki i inne opłaty
	Media
	Kontrola okresowa budynku
	Koszty wycofania budynku
Wykonawca (przedsiębiorstwo budowlane)	Realizacja budynku
	Remonty i naprawy budynku
	Likwidacja usterek
	Gwarancje
Użytkownik (mieszkaniec, najemca)	Wypożyczenie
	Koszty operacyjne
	Koszty utrzymania
	Udogodnienia (np. za podwyższoną jakość wykonania)

Źródło: oprac. własne na podstawie [2, 6, 17, 29].

15.3. MODEL SZACOWANIA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA BUDYNKÓW UMOŻLIWIAJĄCY KWANTYFIKACJĘ DODATKU KOSZTOWEGO ZA RYZYKO

Celem głównym ekonomicznej analizy cyklu życia (*LCCA*) jest oszacowanie kosztów cyklu życia (*LCC*) dla materiału, komponentu lub obiektu budowlanego (w tym również budynku). W ujęciu normy [10] celem analizy może być ponadto oszacowanie całości kosztów życia (*WLC*). W tym przypadku materiałem badawczym może być wyłącznie budynek lub budowla. Istotne jest, że ekonomiczna analiza cyklu życia najczęściej służy w praktyce do dokonywania porównań pomiędzy alternatywnymi rozwiązaniami budynków w aspekcie kosztów cyklu życia lub całości kosztów życia [17–19].

Prezentowany model szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiający kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, uwzględnia dwa następujące typy zakończenia cyklu życia budynku, tj. „od kołyski po grób” (ang. *from cradle to grave*) oraz „od kołyski do kołyski” (ang. *from cradle to cradle*). Oba wymienione typy są zgodne z założeniami pakietu norm ISO 15686 do planowania okresu użytkowania budynków i budowli, przy czym podejście:

- „od kołyski po grób” oznacza zakończenie cyklu życia budynku fazą wycofania przez rozbiórkę budynku i zagospodarowanie materiałów pochodzących z rozbiórki,
- „od kołyski do kołyski” oznacza możliwość zakończenia cyklu życia budynku przez jego wtórną sprzedaż z terenem, na którym został posadowiony, lub odsprzedaż jego części (np. wyposażenia lub instalacji).

Koszty zidentyfikowane w poszczególnych fazach cyklu życia budynków dzieli się na koszty: początkowe, operacyjne oraz wycofania. Analogicznie jest z przychodami. W fazach realizacji, eksploatacji, a także wycofania inwestor planujący przedsięwzięcie budowlane, polegające na realizacji i eksploatacji budynku aż do czasu jego wycofania, może notować również korzyści (przychody) wyrażone w jednostkach walutowych (np. ze sprzedaży lub najmu powierzchni mieszkalnej lub usługowej, czy odsprzedaży wyposażenia lub nieruchomości gruntowej po wyburzeniu budynku).

Mając na uwadze opisany powyżej fakt, wyróżniono dwa następujące przypadki *LCCA*, dla których został zbudowany model szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiający kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, zgodnie z założeniami normy [10]. Są to:

- analiza kosztów cyklu życia budynku,
- analiza całości kosztów życia budynku.

Gdyby w analizie kosztowej uwzględnić wyłącznie koszty cyklu życia budynku, to (biorąc pod uwagę podział kosztów, który przedstawiono w tab. 15.1) możliwy

jest opis kosztów cyklu życia danego budynku lub jego i -tego rozwiązania alternatywnego następującym równaniem:

$$LCC_i = C_{in} + C_{op}^d + C_{wd}^d + C_{env}^d(C_{in}, C_{op}, C_{wd}) \quad (15.1)$$

Gdyby natomiast w analizie kosztowej wziąć pod uwagę całość kosztów życia budynku, czyli wyrażoną w jednostkach walutowych wielkość wszystkich istotnych kosztów oraz korzyści (przychodów) przewidywanych w cyklu życia danego budynku, to (odwołując się tym razem do podziału kosztów i przychodów, które przedstawiono w tab. 15.1 i 15.2) możliwy jest opis całości kosztów życia budynku lub jego i -tego rozwiązania alternatywnego następującym równaniem:

$$WLC_i = -[C_{in} + C_{op}^d + C_{wd}^d + C_{env}^d(C_{in}, C_{op}, C_{wd})] + I^d = -LCC_i + I^d \quad (15.2)$$

gdzie:

- C_{in} – koszty początkowe, inwestycyjne,
- C_{op}^d – zdyskontowana wielkość kosztów operacyjnych,
- C_{wd}^d – zdyskontowana wielkość kosztów wycofania,
- C_{env}^d – zdyskontowana wielkość kosztów środowiskowych,
- I^d – zdyskontowana wielkość korzyści (przychodów).

Opracowany model szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającą kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, pozwala przeprowadzić na potrzeby inwestora $LCCA$ w kontekście możliwości porównania budynków lub ich alternatywnych rozwiązań względem następujących kryteriów porównawczych:

- kosztów cyklu życia budynku (LCC) lub jego rozwiązania alternatywnego – w przypadku gdy inwestor nie będzie mógł notować korzyści (przychodów),
- ekwiwalentu rocznych kosztów cyklu życia budynku ($LCEAC$) lub jego rozwiązania alternatywnego – w przypadku gdy okresy porównawcze (długość trwania fazy eksploatacji) będą różne,
- całości kosztów życia budynku (WLC) lub jego rozwiązania alternatywnego – w przypadku gdy oprócz poniesienia kosztów w fazach cyklu życia budynku inwestor będzie mógł odnotować również korzyści (przychody),
- dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku (ΔR_{LCC}) lub jego rozwiązania alternatywnego.

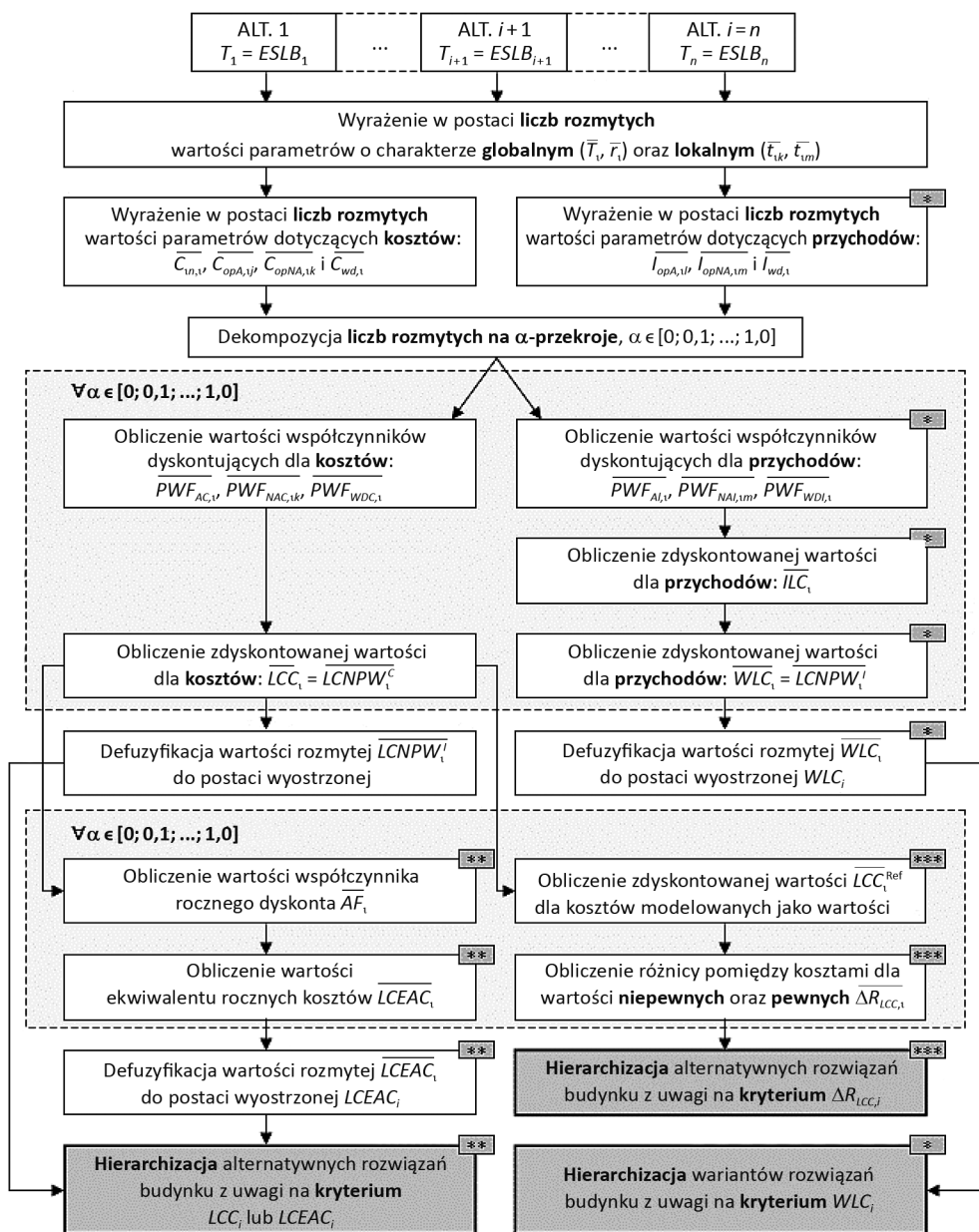
Przy czym przez dodatek kosztowy za ryzyko (ΔR_{LCC}) rozumiana jest różnica wyrażona w jednostkach walutowych pomiędzy wielkością kosztu cyklu życia budynku, która uwzględnia wpływ ryzyka na jej wielkość, a wielkością kosztu cyklu życia budynku, która nie uwzględnia tego wpływu. Definicję tę zaprezentowano w autorskiej publikacji [20].

15.3.1. STRUKTURA MODELU SZACOWANIA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA BUDYNKÓW

Struktura modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającego kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, oparta jest na pojęciu scenariusza cyklu życia produktu, oznaczającym zbiór zdefiniowanych funkcji i procesów, ułożonych w pewną logiczną kolejność, których skutki prowadzą do osiągnięcia celu zamierzenia określonego w przyjętej strategii zarządzania produktem w cyklu jego życia [7]. Każdy z i -tych scenariuszy cyklu życia budynku lub jego rozwiązań alternatywnych obejmuje wszystkie procesy towarzyszące na etapach projektowania, realizacji i eksploatacji budynku aż do jego wycofania. Procesy te ułożone są w logiczną kolejność i prowadzą do osiągnięcia celów budowlanych zamierzonych przez inwestora.

Na rys. 15.3 przedstawiono schematycznie strukturę modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającego kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko. Struktura modelu składa się z 20 czynności, które należy wykonać w przypadku porównywania budynków lub ich alternatywnych rozwiązań z uwagi na ekonomiczne kryteria porównawcze (koszty cyklu życia budynku – LCC , ekwiwalent rocznych kosztów cyklu życia budynku – $LCEAC$, całość kosztów życia budynku – WLC oraz dodatek kosztowy za ryzyko w cyklu życia budynku – ΔR_{LCC}).

Aby umożliwić rozdzielenie wartości kosztów cyklu życia na pewne oraz niepewne, zaproponowano wyróżnić spośród scenariuszy cyklu życia budynku lub rozwiązań alternatywnych budynku tzw. scenariusz referencyjny ($i = 0$), nazywany również „alternatywą zerową”. W tym scenariuszu wszystkie parametry finansowe oraz czasowe (poza stopą dyskonta) będą modelowane jako wielkości pewne. Tym samym wyznaczona zostanie wielkość kosztów cyklu życia budynku ($\overline{LCC}_i^{\text{Ref}}$), która nie będzie uwzględniać wpływu zidentyfikowanego lub wielu zidentyfikowanych czynników ryzyka. Na etapie obliczania dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku (ΔR_{LCC}) wielkość kosztów cyklu życia budynku $\overline{LCC}_i^{\text{Ref}}$ będzie odejmowana od wielkości kosztów cyklu życia budynku LCC_i dla scenariusza cyklu życia budynku, w którym wpływ ryzyka został uwzględniony.



Rys. 15.3. Struktura modelu szacowania kosztów cyklu życia budynku. Legenda: * oznacza konieczność wykonania obliczeń, gdy zidentyfikowano przychody w cyklu życia budynku; ** oznacza konieczność wykonania obliczeń, gdy cykle życia alternatywnych rozwiązań budynku są różne; *** oznacza konieczność wykonania obliczeń, gdy należy oszacować wielkość dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku. Źródło: oprac. własne

15.3.2. METODY, TWIERDZENIA I ZASADY WYKORZYSTANE DO BUDOWY MODELU

W modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającym kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, teorię zbiorów rozmytych połączono z najbardziej powszechną, dynamiczną metodą, służącą do analizy efektywności ekonomicznej przedsięwzięć budowlanych na podstawie zdyskontowanych przepływów pieniężnych (ang. *discounted cash flows, dCF*). Chodzi tu o metodę wartości bieżącej netto (ang. *net present worth, NPW*). Tym samym podstawową metodą, mającą zastosowanie przy budowie modelu, będzie wersja rozmyta metody wartości bieżącej netto, czyli „rozmyte *NPW*” (ang. *fuzzy NPW*). Tok obliczeniowy metody rozmytego *NPW* bazuje na:

- analizie zdyskontowanych przepływów pieniężnych przy określonej wartości stopy dyskonta (r),
- wskaźniku wartości bieżącej netto, który stanowi różnicę pomiędzy zdyskontowanymi przepływami pieniężnymi a nakładami początkowymi, czyli nakładami inwestycyjnymi,
- pojęciu liczby rozmytej,
- twierdzeniu o dekompozycji zbioru rozmytego na α -przekroje,
- zasadzie rozszerzenia Zadeha.

Tok obliczeniowy rozmytej wersji metody wartości bieżącej netto wymaga podporządkowania obliczeń twierdzeniu o dekompozycji zbioru rozmytego na α -przekroje oraz zasadzie rozszerzenia Zadeha, bez których wykonanie podstawowych operacji arytmetycznych na liczbach rozmytych, tj. dodawanie, odejmowanie lub mnożenie, byłoby niemożliwe. Zgodnie z publikacjami [11, 12] zasada rozszerzenia Zadeha pozwala przenieść (rozszerzyć) właściwości i operacje ze zbiorów nierozmytych na zbiory rozmyte. Dzieje się tak, ponieważ odwzorowanie funkcji f ze zbioru X w Y ($f: X \rightarrow Y$, gdzie: $X = \{x\}$ i $Y = \{y\}$) może zostać rozszerzone na zbiory terminów lingwistycznych w przestrzeni X , przy zastosowaniu twierdzenia o dekompozycji zbioru rozmytego na α -przekroje. Jeżeli A_α (gdzie: $\alpha \in [0, 1]$) są α -przekrojami zbioru rozmytego A , to według zasady rozszerzenia odwzorowanie $f: X \rightarrow Y$, gdzie: $X = \{x\}$ i $Y = \{y\}$, przyjmuje następującą formułę:

$$f(A) = f\left(\sum_{\alpha} \alpha A_{\alpha}\right) = \sum_{\alpha} \alpha f(A_{\alpha}) \quad (15.3)$$

Ponadto tok obliczeniowy zbudowanego modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającego kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, został uzupełniony przez następujące procedury wspomagające:

- 1) algorytm *DSW*, opracowany pierwotnie przez [5], a następnie zmodyfikowany w celu wprowadzenia równoważnych zależności (15.9) i (15.10) dla reguł (15.7) i (15.11) przez [8]; dzięki algorytmowi *DSW* realizacja zasady rozszerzania Zadeha [11, 12] w kontekście wykonania podstawowych operacji

arytmetycznych na dwóch liczbach rozmytych, umownie oznaczonych jako $[a, b]$ oraz $[c, d]$, w wybranym α -przekroju sprowadza się do zastosowania odpowiednich wzorów spośród następujących:

$$\lambda \cdot [a, b] = \begin{cases} [\lambda a, \lambda b], & \lambda > 0 \\ [\lambda b, \lambda a], & \lambda < 0 \end{cases} \quad (15.4)$$

$$[a, b] + [c, d] = [(a + c), (b + d)] \quad (15.5)$$

$$[a, b] - [c, d] = [(a - d), (b - c)] \quad (15.6)$$

$$[a, b] \times [c, d] = [\min(ac, ad, bc, bd), \max(ac, ad, bc, bd)] \quad (15.7)$$

$$[a, b] \div [c, d] = [a, b] \cdot \left[\frac{1}{d}, \frac{1}{c} \right], \text{ o ile } 0 \notin [c, d] \quad (15.8)$$

$$[a, b] \times [c, d] = [ac, bd] \quad (15.9)$$

$$[a, b] \div [c, d] = \left[\frac{a}{d}, \frac{b}{c} \right], \text{ o ile } 0 \notin [c, d] \quad (15.10)$$

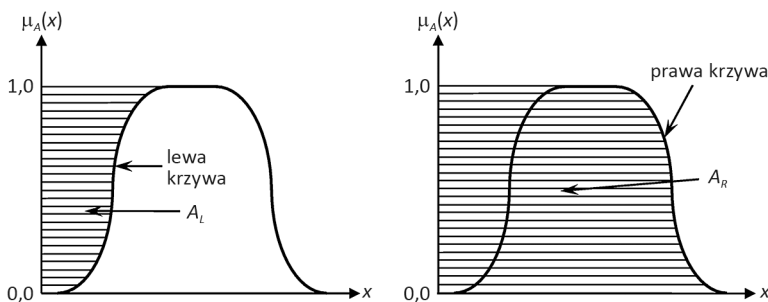
- 2) metodę wierzchołków (ang. *vertex method*), która pozwala na eliminowanie błędów, mogących wystąpić w trakcie prowadzenia działań arytmetycznych na liczbach rozmytych po ich dekompozycji na α -przekroje [4],
- 3) jedną z dwóch uniwersalnych metod defuzyfikacyjnych, które można zastosować efektywnie do wyostrenia wyniku każdej wypukłej i normalnej liczby rozmytej, czyli albo metodę środka ciężkości (ang. *centre of gravity*), której odpowiada wzór (15.11), albo metodę równoważenia obszaru (ang. *area compensation method*), dla której formuła (np. dla ostrej wartości $LCNPW_i^C$ jest zgodna z (15.12):

$$y^* = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \cdot \mu_{\text{wyn}}(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_{\text{wyn}}(y) dy} \quad (15.11)$$

$$LCNPW_i^C = \frac{1}{2}(A_L + A_R) \quad (15.12)$$

gdzie:

- y^* – ostra wartość wynikowa,
- μ_{wyn} – stopień przynależności funkcji wynikowej y ,
- A_L, A_R – powierzchnie wyznaczone odpowiednio przez oś pionową $\mu_A(x)$ oraz lewą lub prawą krzywą ograniczającą wynikowy zbiór rozmyty, co przedstawia rys. 15.4.



Rys. 15.4. Oznaczenia powierzchni w metodzie defuzyfikacji równoważenia obszaru.

Źródło: [1, s. 559]

15.3.3. PODZIAŁ I PARAMETRYZACJA DANYCH WEJŚCIOWYCH DO MODELU

Dane wejściowe do modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającego kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, dzielą się na następujące parametry:

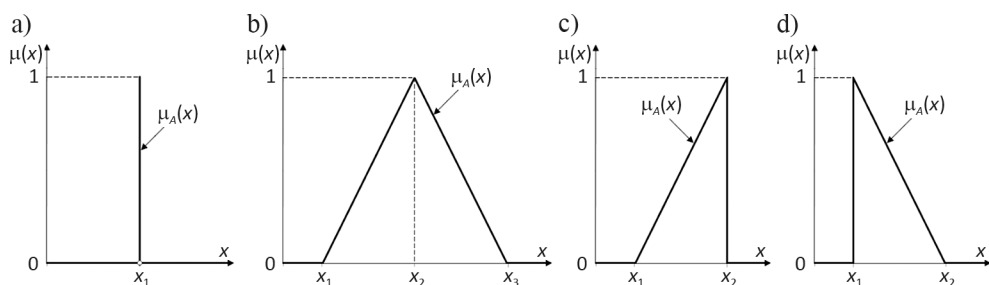
- czasowe CG (o charakterze globalnym), tj. czas trwania cyklu życia i -tego budynku T_i lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku (przy czym T_i równy jest szacowanemu czasowi eksploatacji budynku $ESLB_i$),
- czasowe CL (o charakterze lokalnym), czyli czasy t_{ik} , t_{im} , po których naliczane zostają odpowiednio k -ty okresowy koszt operacyjny lub m -ta okresowa korzyść (przychód),
- finansowe FG (o charakterze globalnym) w postaci stopy dyskonta r , która jest niezbędna do obliczenia wartości bieżącej netto danej kwoty pieniężnej na podstawie jej wartości określonej w czasie przyszłym,
- finansowe FK (rozumiane jako koszty mogące zaistnieć w cyklu życia budynku), wśród których wyróżnia się koszty o charakterze rocznym – roczne koszty operacyjne $C_{opA,ij}$ oraz okresowym – kolejno: koszty początkowe $C_{in,i}$, okresowe koszty operacyjne $C_{opNA,ik}$ i koszty wycofania $C_{wd,i}$,
- finansowe FP (rozumiane jako przychody mogące zaistnieć w cyklu życia budynku), czyli przychody o charakterze rocznym – roczne przychody $I_{opA,il}$ oraz okresowym – kolejno: okresowe przychody uzyskiwane w fazie eksploatacji budynku $I_{opNA,im}$ i przychody osiągnięte w fazie wycofania $I_{wd,i}$.

Wymieniony powyżej zestaw danych wejściowych do modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającego kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, odpowiada strukturze modelu przedstawionego na rys. 15.3. Podział poszczególnych parametrów na ich charakter globalny i lokalny wiąże się z faktem, że okres eksploatacji budynku T_i czy stopa dyskonta r są przyjmowane jako parametry stałe, warunkujące i obowiązujące w całym cyklu życia budynku. Charakter lokalny dla pozostałych parametrów czasowych i kosztowych związany jest natomiast

z koniecznością ich uwzględniania tylko i wyłącznie po tych latach (w okresie eksploatacji budynku), w których przewidywane jest ich wystąpienie.

Do parametryzacji wszelkich danych wejściowych do modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającego kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, użyto wypukłych i normalnych liczb rozmytych, przy czym rozróżniono następujące dwa przypadki:

- jeśli parametr związany ze stopą dyskonta, czasem, kosztem lub przychodem nie będzie obciążony wpływem oddziałującego ryzyka, parametr ten będzie modelowany jako wielkość pewna w postaci liczby rozmytej o singletonowej funkcji przynależności, ze stopniem przynależności wynoszącym 1,0 wyłącznie dla jednej określonej wartości argumentu x (rys. 15.5a),
- jeśli któryś z wymienionych powyżej parametrów będzie uwzględniał wpływ ryzyka, to przyjmie on postać wielkości modelowanej jako liczba rozmyta albo o kształcie funkcji przynależności jak na rys. 15.5b (dla stopy dyskonta r), albo jak na rys. 15.5c i 15.5d (dla parametrów czasowych CG i CL oraz finansowych FK i FP).



Rys. 15.5. Funkcje przynależności liczb rozmytych dla parametrów wejściowych – zestaw podstawowy. Źródło: oprac. własne

Przy czym funkcje przynależności pokazane na rys. 15.5 są funkcjami o wykresach odcinkowo liniowych i stanowią zestaw podstawowy funkcji przynależności do modelowania danych wejściowych w modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającym kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko. Zestawy alternatywne dla wspomnianych powyżej funkcji o wykresach odcinkowo liniowych stanowią zestawy [28]:

- alternatywny I, w skład którego wchodzi funkcje złożone (odcinkowo kwadratowe),
- alternatywny II, utworzony przez funkcje harmoniczne,
- alternatywny III, zbudowany z najbardziej złożonych funkcji przynależności, tj. symetrycznych i niesymetrycznych funkcji Gaussa.

15.3.4. ALGORYTM OBLICZENIOWY MODELU

Aby możliwe było oszacowanie wielkości kosztów cyklu życia i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku (LCC_i), ekwiwalentu rocznych kosztów cyklu życia ($LCEAC_i$), całości kosztów życia (WLC_i) lub dodatku kosztowego za ryzyko ($\Delta R_{LCC,i}$), niezbędne jest wyznaczenie wartości współczynników dyskontujących, dzięki którym możliwe będzie odniesienie wartości przyszłych kosztów, przychodów lub dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku do wartości obecnej, tj. do momentu, w którym wykonywana powinna być analiza $LCCA$. Wartości tych współczynników wyliczyć można z następujących wzorów:

- dla kosztów i przychodów operacyjnych naliczanych w ujęciu rocznym:

$$\overline{PWF}_{AC,t} = \overline{PWF}_{AI,t} = \frac{1}{\bar{r}} \cdot (1 - (1 + \bar{r})^{-\bar{t}_i}) \quad (15.13)$$

- dla kosztów operacyjnych naliczanych okresowo po k -tym czasie $\bar{t}_{ik}$:

$$\overline{PWF}_{NAC,tk} = \frac{1 - (1 + \bar{r})^{-\bar{t}_{ik}}}{(1 + \bar{r})^{\bar{t}_{ik}} - 1} \quad (15.14)$$

- dla przychodów operacyjnych naliczanych okresowo po m -tym czasie $\bar{t}_{im}$:

$$\overline{PWF}_{NAI,um} = \frac{1 - (1 + \bar{r})^{-\bar{t}_{im}}}{(1 + \bar{r})^{\bar{t}_{im}} - 1} \quad (15.15)$$

- dla kosztów i przychodów związanych z wycofaniem budynku po czasie jego eksploatacji, czyli po upływie $ESLB_i$:

$$\overline{PWF}_{WDC,t} = \overline{PWF}_{WDI,t} = (1 + \bar{r})^{-\bar{t}_i} \quad (15.16)$$

W celu wyznaczenia rozmytej wartości bieżącej netto dla kosztów cyklu życia LCC_i lub całości kosztów życia WLC_i i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku należy skorzystać z następujących równań:

- dla wartości rozmytej kosztów cyklu życia $LCC_i = LCNPW_i^C$:

$$\begin{aligned} \overline{LCNPW}_i^C = & \overline{C}_{in,t} + \overline{PWF}_{AC,t} \cdot \sum_{j=1}^{n_{AC,i}} \overline{C}_{opA,yj} + \sum_{k=1}^{n_{NAC,i}} \overline{C}_{opNA,tk} \cdot \overline{PWF}_{NAC,tk} + \overline{PWF}_{WD,t} \cdot \overline{C}_{wd,t} \\ & (15.17) \end{aligned}$$

- dla wartości rozmytej przychodów osiągniętych w cyklu życia ILC_i :

$$\overline{ILC}_i = \overline{PWF}_{AI,t} \cdot \sum_{l=1}^{n_{AI,i}} \overline{I}_{opA,ul} + \sum_{m=1}^{n_{NAI,i}} \overline{C}_{opNA,um} \cdot \overline{PWF}_{NAI,um} + \overline{PWF}_{WDI,t} \cdot \overline{I}_{wd,t} \quad (15.18)$$

- dla wartości rozmytej całości kosztów życia $\overline{WLC}_i = \overline{LCNPW}_i^I$:

$$\overline{LCNPW}_i^I = \overline{ILC}_i - \overline{LCNPW}_i^C \quad (15.19)$$

W przypadku porównania i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku, których cykle życia (okresy eksploatacji) są różne, należy obliczyć po pierwsze wartości współczynnika rocznego dyskonta $\overline{AF}_i$, a następnie wartości ekwiwalentne rocznych kosztów cyklu życia $\overline{LCEAC}_i$. Służą do tego następujące zależności:

- dla wartości rozmytej współczynnika rocznego dyskonta:

$$\overline{AF}_i = \frac{\bar{r} \cdot (1 + \bar{r})^{\bar{T}_i}}{(1 + \bar{r})^{\bar{T}_i} - 1} \quad (15.20)$$

- dla wartości rozmytej ekwiwalentu rocznych kosztów $\overline{LCEAC}_i$:

$$\overline{LCEAC}_i = \overline{LCNPW}_i^C \cdot \overline{AF}_i \quad (15.21)$$

W celu wyznaczenia rozmytej wielkości dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia i -tego budynku lub i -tego jego rozwiązania alternatywnego (ΔR_{LCC}) należy obliczyć:

- wartość rozmytą kosztów cyklu życia $\overline{LCC}_i^{\text{Ref}} = \overline{LCNPW}_i^C^{\text{Ref}}$ dla wartości pewnych (nieobarczonych wpływem ryzyka) z wykorzystaniem formuły (15.17),
- wartość różnicy pomiędzy wielkościami kosztów cyklu życia budynku $\overline{LCC}_i$ a $\overline{LCC}_i^{\text{Ref}}$:

$$\overline{\Delta R_{LCC,i}} = \overline{LCC}_i - \overline{LCC}_i^{\text{Ref}} \quad (15.22)$$

gdzie:

$$\overline{PWF}_{AC,i}, \overline{PWF}_{AI,i}$$

$$\bar{r}_i$$

$$\bar{T}_i$$

$$\overline{PWF}_{NAC,ik}, \overline{PWF}_{NAI,im}$$

$$\overline{t}_{ik}, \overline{t}_{im}$$

- odpowiednio, rozmyta wartość współczynnika dyskonta dla rocznych kosztów operacyjnych i przychodów (ang. *present worth factor*),
- rozmyta wielkość wskaźnika procentowego stopy dyskonta,
- rozmyta wartość trwania cyklu życia i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku (równa czasowi eksploatacji),
- odpowiednio, rozmyta wartość współczynnika dyskonta dla k -tego okresowego kosztu oraz m -tego okresowego przychodu,
- rozmyta wartość czasu, po którym naliczany zostaje odpowiednio k -ty okresowy koszt operacyjny lub m -ta okresowa korzyść (przychód),

$$\overline{PWF_{WDC,i}}, \overline{PWF_{WDI,i}}$$

$$\overline{LCC_i}, \overline{WLC_i}, \overline{ILC_i}$$

$$\overline{LCNPW_i^C}, \overline{LCNPW_i^I}$$

$$\overline{C_{in,i}}, \overline{C_{opA,j}}, \overline{C_{opNA,tk}}, \overline{C_{wd,i}}$$

$$\overline{I_{opA,l}}, \overline{I_{opNA,lm}}, \overline{I_{wd,i}}$$

$$n_{AC,i}, n_{AI,i}, n_{NAC,i}, n_{NAL,i}$$

$$\overline{AF_i}$$

$$\overline{LCEAC_i}$$

$$\overline{LCC_i}^{Ref}$$

$$\overline{\Delta R_{LCC,i}}$$

- odpowiednio, rozmyta wartość współczynnika dyskonta dla kosztów oraz przychodów osiągniętych w fazie wycofania,
- odpowiednio, rozmyta wielkość kosztów cyklu życia, całości kosztów życia oraz przychodów, osiągniętych w cyklu życia i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku,
- odpowiednio, rozmyte wartości bieżące netto dla kosztów i przychodów w cyklu życia i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku,
- odpowiednio, rozmyta wielkość kosztów początkowych, j -tego rocznego kosztu operacyjnego, k -tego okresowego kosztu operacyjnego oraz kosztów wycofania,
- odpowiednio, rozmyta wielkość l -tego rocznego przychodu, m -tego okresowego przychodu oraz przychodu osiągniętego w fazie wycofania,
- odpowiednio, liczba (krotność) kosztów i przychodów operacyjnych o charakterze rocznym lub okresowym w cyklu życia i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku,
- rozmyta wartość współczynnika rocznego dyskonta (ang. *annuity factor*),
- rozmyta wartość ekwiwalentna rocznych kosztów cyklu życia i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku,
- rozmyta wielkość kosztów cyklu życia i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku, obliczona dla wartości pewnych (nieobarczonych ryzykiem),
- rozmyta wartość dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku.

Ostatecznie proces szacowania kosztów cyklu życia (LCC_i), ekwiwalentu rocznych kosztów cyklu życia ($LCEAC_i$), całości kosztów życia (WLC_i) lub dodatku kosztowego za ryzyko ($\Delta R_{LCC,i}$) dla i -tego budynku lub i -tego rozwiązania alternatywnego budynku podzielony został na następujące etapy (opis zgodny ze strukturą prezentowaną na rys. 15.3):

- 1) Określenie zmiennych wejściowych o charakterze globalnym za pomocą liczb rozmytych – dotyczy czasu trwania cyklu życia budynku $\bar{T}_i = ESLB_i$, stopy dyskonta $\bar{r}_i$,
- 2) Określenie zmiennych wejściowych o charakterze lokalnym za pomocą liczb rozmytych – dotyczy czasów naliczania okresowych kosztów i przychodów t_{ik}, t_{um} ,
- 3) Określenie za pomocą liczb rozmytych zmiennych wejściowych związanych z kosztami ponoszonymi w cyklu życia budynku $C_{in,1}, C_{opA,ij}, C_{opNA,ik}$ i $C_{wd,1}$, które powinny w swojej strukturze uwzględniać również koszty środowiskowe C_{env} ,
- 4) Określenie za pomocą liczb rozmytych zmiennych wejściowych związanych z przychodami w cyklu życia budynku $I_{opA,1l}, I_{opNA,um}, I_{wd,1}$,
- 5) Dekompozycja zbiorów rozmytych wyrażających liczby rozmyte na α -przekroje, gdzie $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]$,
- 6) Wyznaczenie wartości współczynników dyskontujących wartości kosztów $PWF_{AC,1}, PWF_{NAC,ik}, PWF_{WDC,1}$ za pomocą wzorów (15.13), (15.14), (15.16) dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]$,
- 7) Wyznaczenie wartości współczynników dyskontujących wartości przychodów $PWF_{AI,1}, PWF_{NAI,um}, PWF_{WDL,1}$ za pomocą wzorów (15.13), (15.15), (15.16) dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]^*$,
- 8) Obliczenie zdyskontowanych wartości składników kosztów oraz ich zsumowanie do wartości rozmytej LCC_1 z wykorzystaniem wzoru (15.17) na $LCNPW_1^C$ dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]$,
- 9) Obliczenie zdyskontowanych wartości składników przychodów oraz ich zsumowanie do wartości rozmytej ILC_1 z wykorzystaniem wzoru (15.18) dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]^*$,
- 10) Obliczenie różnicy pomiędzy wartościami ILC_1 a LCC_1 , tj. rozmytej wartości całości kosztów cyklu życia WLC_1 , z wykorzystaniem wzoru (15.19) na $LCNPW_1^I$ dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]^*$,
- 11) Defuzyfikacja wartości rozmytej LCC_1 do wartości ostrej LCC_i ,
- 12) Defuzyfikacja wartości rozmytej WLC_1 do wartości ostrej WLC_i^* ,
- 13) Wyznaczenie wartości współczynnika rocznego dyskonta AF_1 za pomocą wzoru (15.20) dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]^{**}$,
- 14) Obliczenie wartości rozmytej ekwiwalentu rocznych kosztów $LCEAC_1$ z wykorzystaniem wzoru (15.21) dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]^{**}$,
- 15) Defuzyfikacja wartości rozmytej $LCEAC_1$ do wartości ostrej $LCEAC_i^{**}$,
- 16) Obliczenie zdyskontowanych wartości składników kosztów modelowanych dla wartości pewnych (nieobarczonych wpływem ryzyka) oraz ich zsumowanie do wartości rozmytej LCC_1^{Ref} z wykorzystaniem wzoru (15.17) na $LCNPW_1^C$ dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]^{***}$,

- 17) Obliczenie wartości różnicy pomiędzy wartościami $\overline{LCC}_i$ a $\overline{LCC}_i^{\text{Ref}}$ z punktów 8 i 16, tj. rozmytej wartości dodatku kosztowego za zidentyfikowane i ocenione ryzyko $\Delta R_{LCC,i}$ dla elementów x w każdym przekroju $\alpha \in [0; 0,1; \dots; 1,0]^{***}$,
- 18) Defuzyfikacja wartości rozmytej $\overline{\Delta R_{LCC,i}}$ do wartości ostrej $\Delta R_{LCC,i}^{***}$,
- 19) Powtórzenie kroków obliczeniowych od 1 do 18 dla pozostałych i -tych budynków lub i -tych rozwiązań alternatywnych budynku,
- 20) Uszeregowanie (ranking) i -tych budynków lub i -tych rozwiązań alternatywnych budynku z uwagi na kryterium kosztów cyklu życia LCC_i , całości kosztów życia budynku WLC_i , ekwiwalentu rocznych kosztów cyklu życia budynku $LCEAC_i$ lub dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku $\Delta R_{LCC,i}$,

gdzie:

- * oznacza konieczność wykonania obliczeń w przypadku zidentyfikowania przychodów w cyklu życia budynku,
- ** oznacza konieczność wykonania obliczeń w przypadku, gdy cykle życia (okresy eksploatacji) dla alternatywnych rozwiązań budynku są różne,
- *** oznacza konieczność wykonania obliczeń w przypadku, gdy należy oszacować wielkość dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku.

15.4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Działanie modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającego kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, przedstawiono na przykładzie czterokondygnacyjnego budynku mieszkalnego wielorodzinnego z wydzieloną powierzchnią gospodarczą i usługową. Inwestor – spółdzielnia mieszkaniowa – dysponuje koncepcją architektoniczno-budowlaną budynku, który ma być przedmiotem przedsięwzięcia budowlanego, polegającego na realizacji i eksploatacji budynku aż do czasu jego wycofania. Budowlaną działkę inwestycyjną o powierzchni wynoszącej ok. 2425 m² zlokalizowano w Krakowie – Podgórze Duchackie. Pełny opis programu użytkowego oraz charakterystykę budynku zawarto w pracy [28].

Ponieważ zbudowany model pozwala uwzględnić wpływ czynników ryzyka zidentyfikowanych w cyklu życia budynku, w przykładzie obliczeniowym uwzględniono następujące czynniki ryzyka:

- błędne założenie posadowienia przedmiotowego budynku na monolitycznych, żelbetowych ławach i stopach fundamentowych w przypadku występowania pod częścią budynku gruntu nienośnego – rozpoznano jako potencjalny czynnik ryzyka „błędne rozpoznanie warunków gruntowych” (Z_1),
- zaproponowany na wyprawę tynkarską tynk szlachetny, który cechuje się zawartością związków organicznych, mogących powodować skażenie mikro-

biologiczne elewacji – wskazano jako potencjalny czynnik ryzyka „błędnie przyjmowane założenia rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych” (Z_2).

Do oceny wpływu zidentyfikowanych czynników ryzyka na wielkość odpowiadających im składników kosztów cyklu życia budynku wykorzystano komputerową implementację modelu rozmytej oceny w cyklu życia budynków ROR – FLD in Matlab R2011a, którą opisano w pracy doktorskiej [28]. Wpływ czynników ryzyka został określony z wykorzystaniem wiedzy ekspertów w zakresie ustalenia prawdopodobieństwa wystąpienia i -tego czynnika ryzyka $P(Z_i)$. Dla obu zidentyfikowanych czynników ryzyka Z_1 i Z_2 poproszono trzech ekspertów, związanych z projektowaniem i wykonawstwem konstrukcji budynków oraz innych konstrukcji zwykłych, o przyporządkowanie im jednego z terminów lingwistycznych: „bardzo wysokie”, „dość wysokie”, „średnie”, „dość niskie” lub „bardzo niskie”. Wielkość skutku wystąpienia i -tego czynnika ryzyka $S(Z_i)$ przyjęto zgodnie z wynikami badań własnych nad wpływem ryzyka na wielkość kosztów cyklu życia budynków [28].

Przeprowadzona ocena czynników ryzyka Z_1 i Z_2 wskazała, że istnieje konieczność uwzględnienia ich wpływu na wielkość odpowiadających im składników kosztu cyklu życia budynku. Uznano, że wpływ ten zostanie przełożony bezpośrednio na dane finansowe w poszczególnych scenariuszach cyklu życia rozwiązań alternatywnych przedmiotowego budynku, w których zaplanowano m.in. sposoby reakcji na zidentyfikowane i ocenione czynniki ryzyka z wykorzystaniem modelu rozmytej oceny ryzyka w cyklu życia budynków.

15.4.1. DEFINICJA SCENARIUSZY CYKLU ŻYCIA DLA ROZWIĄZAŃ ALTERNATYWNYCH BUDYNKU

Po dokonaniu oceny wpływu zidentyfikowanych czynników ryzyka na wielkość odpowiadających im składników kosztu cyklu życia budynku zdefiniowano scenariusze cyklu życia dla wszystkich rozwiązań alternatywnych przedmiotowego budynku z uwzględnieniem konieczności: (i) reakcji na zidentyfikowane i ocenione czynniki ryzyka Z_1 i Z_2 oraz (ii) przyjęcia strategii zarządzania budynkiem w fazie jego eksploatacji z uwagi na typy utrzymania, zgodnie z założeniami normy [10].

W scenariuszu referencyjnym ($i = 0$, „alternatywa zerowa”) przyjęto brak odpowiedzi na zidentyfikowane ryzyko w cyklu życia budynku. Dopuszczono zatem realizację posadowienia budynku na żelbetowych, monolitycznych ławach i stopach fundamentowych, również w obszarze, na którym ma być dokonana wymiana gruntu. Ponadto założono typ utrzymania budynku, polegający na prewencyjnym zapobieganiu pogarszania się stanu konstrukcji (ang. *preventive maintenance*), przy przeciętnym angażu środków finansowych na bieżące utrzymanie i remonty okresowe budynku w fazie jego eksploatacji. Przyjęto również, że cykl życia budynku zakończy jego wyburzenie wraz z odsprzedażą działki budowlanej, na której został posadowiony (typ zakończenia cyklu życia budynku „od kołyski po grób”).

W scenariuszu $i = 1$ przyjęto odpowiedź na ryzyko zidentyfikowane w cyklu życia budynku w postaci jego absorpcji w kosztach początkowych ($C_{in,1}$). W kosztach tych przewidziano dodatkowe nakłady finansowe na realizację posadowienia bezpośredniego na żelbetowej, monolitycznej płycie fundamentowej (absorpcja ryzyka wynikającego z czynnika Z_1) oraz zmianę materiału budowlanego na wyprawę tynkarską, która będzie odporna na skażenia mikrobiologiczne (absorpcja ryzyka wynikającego z czynnika Z_2). Założono ten sam typ utrzymania budynku jak w przypadku alternatywy zerowej, czyli prewencyjne zapobieganie pogarszania się stanu konstrukcji. W przypadku przychodów, które inwestor może zanotować w cyklu życia budynku, przyjęto, że całkowita sprzedaż powierzchni mieszkalnej nastąpi w pierwszych pięciu latach eksploatacji budynku, a przychodami o charakterze rocznym będą wpływy uzyskane z tytułu czynszów za powierzchnię mieszkalną oraz za wynajem powierzchni usługowej. W kwestii wycofania budynku przyjęto analogiczne założenia jak w przypadku alternatywy zerowej.

W scenariuszu $i = 2$ podzielono odpowiedź na ryzyko zidentyfikowane w cyklu życia budynku w następujący sposób. Dla czynnika ryzyka Z_1 przyjęto absorpcję ryzyka w kosztach początkowych ($C_{in,2}$) przez zwiększenie nakładów finansowych na realizację posadowienia bezpośredniego na żelbetowej, monolitycznej płycie fundamentowej (jak w scenariuszu $i = 1$). Dla czynnika ryzyka Z_2 zaproponowano jego transfer do fazy eksploatacji budynku. Przyjęto założenie o wykonaniu remontu generalnego wyprawy tynkarskiej w trzydziestym roku eksploatacji, co uwzględniono w okresowym koszcie eksploatacyjnym ($C_{opNA,230}$). W przypadku tego scenariusza cyklu życia budynku przyjęto typ utrzymania budynku zorientowany na naprawy (ang. *corrective maintenance*), przy zwiększonym angażu środków finansowych na bieżące utrzymanie i remonty okresowe budynku w fazie jego eksploatacji. W kwestii przychodów w cyklu życia budynku oraz jego wycofania przyjęto założenia jak w przypadku alternatywy zerowej.

W scenariuszu $i = 3$ zaproponowano odpowiedź na ryzyko zidentyfikowane w cyklu życia budynku w postaci jego całkowitego transferu do fazy eksploatacji. Dla czynników ryzyka Z_1 i Z_2 przyjęto założenie o wykonaniu (odpowiednio) wzmocnienia fundamentów w obszarze wymiany gruntu nienośnego oraz remontu generalnego wyprawy tynkarskiej w czterdziestym roku eksploatacji. Założenie to uwzględnione zostało w okresowym koszcie eksploatacyjnym ($C_{opNA,340}$). W przypadku tego scenariusza cyklu życia budynku przyjęto typ utrzymania, polegający na odroczeniu napraw do czasu uznania ich jako pilne, niezbędne do wykonania (ang. *deferred maintenance*). Tym samym angaż środków finansowych na bieżące utrzymanie i remonty okresowe budynku w fazie jego eksploatacji został obniżony w stosunku do scenariusza referencyjnego, który zakłada prewencyjne zapobieganie pogarszaniu się stanu konstrukcji. W kwestii przychodów przyjęto założenie o długoterminowym wynajmie powierzchni mieszkalnej (przy wskaźniku ciągłego wynajmu na poziomie 85%). Zaproponowano zatem inwestorowi, że całkowita

sprzedaż budynku z działką, na której został posadowiony, nastąpi dopiero w fazie jego wycofania (typ zakończenia cyklu życia budynku „od kołyski do kołyski”).

W etapie kończącym definicję scenariuszy cyklu życia budynku wraz z przyjęciem strategii zarządzania i typów jego utrzymania ustalono również ranking preferencji inwestora. Inwestor uznał, że najmniej interesującym go scenariuszem cyklu życia jest wariant trzeci ($i = 3$), który zakłada wynajem długoterminowy powierzchni mieszkalnej. Zgodnie z preferencjami inwestora za kryterium krytyczne do ekonomicznej analizy cyklu życia zostało przyjęte kryterium kosztów cyklu życia budynku. Za kryteria mniej ważne inwestor wskazał kolejno: kryterium ekwiwalentu rocznych kosztów cyklu życia, kryterium całości kosztów życia oraz kryterium dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku.

15.4.2. DANE CZASOWE I FINANSOWE PRZYJĘTE DO OBLICZEŃ

Po konsultacji z ekspertami, biorącymi udział w procesie oceny czynników ryzyka Z_1 i Z_2 , przyjęto, że dla wszystkich scenariuszy cyklu życia budynku (od $i = 0$ do $i = 3$) długość czasu trwania cyklu życia rozwiązań alternatywnych budynku (T_i – parametr czasowy CG) będzie wyliczona za pomocą metody współczynników na podstawie wzorcowego okresu użytkowania (RSL) jak dla czwartej kategorii projektowego okresu użytkowania budynków według normy PN-EN 1990:2004 [21]. Wszystkim czynnikom wpływającym na trwałość budynku (kolejno czynniki: A – jakość użytych materiałów i/lub komponentów budowlanych, B – poziom projektowania, C – poziom wykonania, D – środowisko wewnętrzne, E – środowisko zewnętrzne, F – warunki użytkowania, G – poziom utrzymania) przyporządkowano wpływ na poziomie neutralnym (wartość wpływu czynników od f_A do $f_G = 1,0$). Tym samym dla wymienionych tutaj scenariuszy cyklu życia przyjęto do analizy $LCCA$ szacowany okres użytkowania budynku ($ESLB_i$) wynoszący 50 lat. Dla scenariusza $i = 2$ przyjęto z kolei, że poziom utrzymania budynku według strategii zarządzania, w której typ utrzymania zorientowany jest na naprawy, może wpłynąć korzystnie na wzorcowy okres użytkowania budynku. Na tej podstawie uznano wartość wpływu dla czynnika f_G jako równą 1,2. Wyliczono, że $ESLB_2$ dla scenariusza $i = 2$ będzie wynosić 60 lat.

Dla wszystkich scenariuszy cyklu życia budynku ustalono wielkości pozostałych danych:

- czasowych CL (o charakterze lokalnym), czyli czasów t_{ik} , t_{im} , po których naliczane zostają odpowiednio k -ty okresowy koszt operacyjny lub okresowa korzyść (przychód) m ,
- finansowych FG (o charakterze globalnym) w postaci stopy dyskonta r ,
- finansowych FK , rozumianych jako koszty mogące zaistnieć w cyklu życia budynku, wśród których wyróżnia się koszty o charakterze rocznym (roczne

koszty operacyjne $C_{opA,ij}$) oraz okresowym (kolejno: koszty początkowe $C_{in,i}$, okresowe koszty operacyjne $C_{opNA,ik}$ i koszty wycofania $C_{wd,i}$),

- finansowych FP , rozumianych jako przychody mogące zaistnieć w cyklu życia budynku, tj. przychody o charakterze rocznym (roczne przychody $I_{opA,il}$) oraz okresowym (kolejno: okresowe przychody uzyskiwane w fazie eksploatacji budynku $I_{opNA,im}$ i przychody osiągnięte w fazie wycofania $I_{wd,i}$).

Tabela 15.4 przedstawia wartości parametrów przyjętych do analizy $LCCA$ dla każdego zdefiniowanego scenariusza cyklu życia budynku.

Tabela 15.4.

Dane przyjęte do analizy $LCCA$

Parametry		Scenariusz $i = 0$	Scenariusz $i = 1$	Scenariusz $i = 2$	Scenariusz $i = 3$
Długość cyklu życia $\bar{T}_l = ESLB_i$		50 lat	50 lat	nie więcej niż 60 lat (f.p. klasy Γ , rys. 15.5c)	50 lat
Stopa dyskonta $\bar{r}_l$		około 8% (trójkątna f.p., rys. 15.5b)	około 8% (trójkątna f.p., rys. 15.5b)	około 8% (trójkątna f.p., rys. 15.5b)	około 8% (trójkątna f.p., rys. 15.5b)
Koszty początkowe $\overline{C_{in,i}}$		7 206 100 zł	nie więcej niż 7 427 400 zł (f.p. klasy Γ , rys. 15.5c)	nie więcej niż 7 333 700 zł (f.p. klasy Γ , rys. 15.5c)	7 206 100 zł
Roczne koszty operacyjne $\overline{C_{opA,y}}$		101 400 zł	101 400 zł	103 800 zł	99 000 zł
Okresowe koszty operacyjne $\overline{C_{opNA,ik}}$ po czasie $\bar{t}_{ik} = \dots$	10	227 400 zł	227 400 zł	272 500 zł	182 300 zł
	20	227 400 zł	227 400 zł	272 500 zł	182 300 zł
	30	909 700 zł	909 700 zł	nie więcej niż 1 090 000 zł (f.p. klasy Γ , rys. 15.5c)	182 300 zł
	40	227 400 zł	227 400 zł	272 500 zł	nie więcej niż 1 270 300 zł (f.p. klasy Γ , rys. 15.5c)
	50	nie dotyczy	nie dotyczy	272 500 zł	nie dotyczy
Koszty wycofania $\overline{C_{wd,i}}$ po $\bar{T}_l = ESLB_i$		521 400 zł	547 500 zł	547 500 zł	0 zł

Roczne przychody $\overline{I_{opA,u}}$ do i po czasie $\overline{t_{um}} = \dots$ (czynsze i wynajem)	30	nie dotyczy	201 800 zł	208 600 zł	nie dotyczy
		nie dotyczy	208 600 zł	215 400 zł	nie dotyczy
	40	nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy	1 037 400 zł
		nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy	1 070 100 zł
Okresowe przychody operacyjne $\overline{I_{opNA,um}}$ po czasie $\overline{t_{um}} = \dots$ (sprzedaż mieszkań)	1	nie dotyczy	8 000 300 zł	7 899 500 zł	nie dotyczy
	2	nie dotyczy	2 461 600 zł	2 430 600 zł	nie dotyczy
	3	nie dotyczy	1 230 800 zł	1 215 300 zł	nie dotyczy
	4	nie dotyczy	492 300 zł	486 100 zł	nie dotyczy
	5	nie dotyczy	123 000 zł	121 500 zł	nie dotyczy
Przychody $\overline{I_{wd,t}}$ ze sprzedaży działki po czasie $\overline{T_t} = ESLB_i$		nie dotyczy	1 940 000 zł	1 940 000 zł	nie dotyczy
Przychody $\overline{I_{wd,t}}$ ze sprzedaży działki wraz z budynkiem po czasie $\overline{T_t} = ESLB_i$		nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy	10 297 000 zł

Źródło: oprac. własne

Do modelowania parametrów czasowych i finansowych w przykładzie obliczeniowym wykorzystano singletonowe funkcje przynależności (rys. 15.5a), które zastosowano w przypadku parametrów nieobarczonych wpływem ryzyka. Wyjątek stanowią te parametry, którym dopisano w komórkach tabeli informacje o zastosowanych trójkątnych funkcjach przynależności (rys. 15.5b) lub funkcjach klasy Γ (rys. 15.5c). Te funkcje odcinkowo liniowe zostały zastosowane w przypadku parametrów finansowych, na które przełożono wpływ ryzyka Z_1 i Z_2 , a także w przypadku stopy dyskonta (w niej uwzględniono oddziaływanie ryzyka inwestycyjnego w budownictwie) oraz długości trwania cyklu życia dla scenariusza $i = 2$, dla którego czas $ESLB_2 = 60$ lat został potraktowany jako wartość najbardziej korzystna dla tego parametru.

15.4.3. REZULTATY EKONOMICZNEJ OCENY CYKLU ŻYCIA BUDYNKU

Ekonomiczną analizę cyklu życia wykonano dla wszystkich trzech zdefiniowanych scenariuszy cyklu życia budynku. Z uwagi na to, że długości trwania cyklu życia T_i są różne oraz fakt, że w cyklu życia przykładowego budynku zidentyfikowano czynniki ryzyka wpływające na wielkość LCC , wyznaczono wielkości kosztowe dla wszystkich kryteriów porównawczych, tj. kolejno:

- kosztów cyklu życia (LCC),
- ekwiwalentu rocznych kosztów cyklu życia budynku ($LCEAC$),
- całości kosztów życia budynku (WLC),
- dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku (ΔR_{LCC}).

W celu wyostrenia wartości wynikowych zastosowano metodę środka ciężkości. Tabela 15.5 przedstawia wartości wynikowe obliczone dla wszystkich scenariuszy cyklu życia przykładowego budynku (włącznie ze scenariuszem referencyjnym, $i = 0$) w wybranym przekroju $\alpha = 0,5$.

Tabela 15.5

Wartości obliczone w przekroju $\alpha = 0,5$

Obliczone wartości	Scenariusz $i = 0$		Scenariusz $i = 1$		Scenariusz $i = 2$		Scenariusz $i = 3$	
	0,5 (LB)	0,5 (PB)	0,5 (LB)	0,5 (PB)	0,5 (LB)	0,5 (PB)	0,5 (LB)	0,5 (PB)
$\overline{LCC}_i$	8 537 063	8 932 250	8 758 714	9 043 786	8 741 816	9 097 858	8 455 023	8 808 895
$\overline{LCEAC}_i$	n.d.	n.d.	621 468	842 543	615 423	839 117	599 920	820 660
$\overline{ILC}_i$	n.d.	n.d.	13 009 803	13 946 036	12 951 959	13 911 227	11 376 563	14 625 725
$\overline{WLC}_i$	n.d.	n.d.	3 966 018	5 187 322	3 854 101	5 169 411	2 567 668	6 170 701
$\overline{\Delta R_{LCC,i}}$	n.d.	n.d.	-173 536	506 723	-190 434	560 795	-477 226	271 831

Legenda: LB – lewy brzeg α -przekroju, PB – prawy brzeg α -przekroju, n.d. – nie dotyczy.

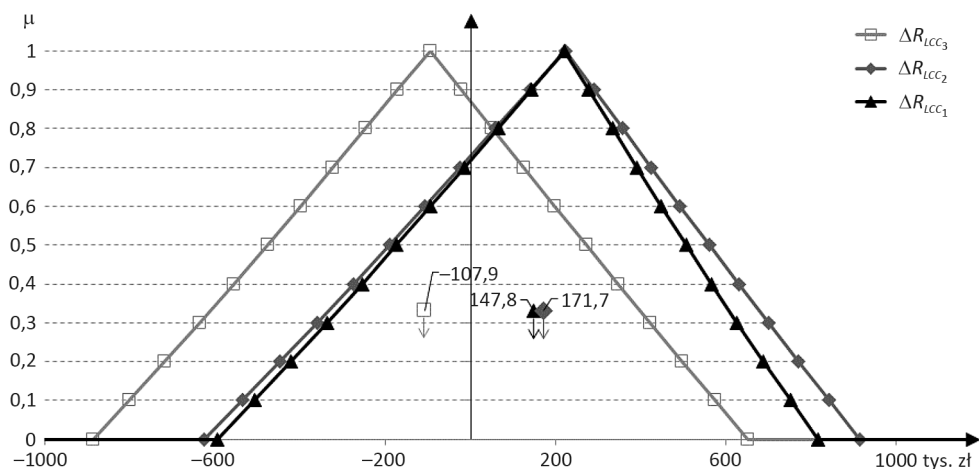
Źródło: oprac. własne

Na rys. 15.6 przedstawiono z kolei jedną z wynikowych funkcji przynależności dla kryterium dodatku kosztowego za ryzyko (ΔR_{LCC}).

Z przeprowadzonej analizy $LCCA$ wynika, że:

- najniższą wartość kryterium LCC generuje realizacja scenariusza $i = 3$ ($LCC_3 = 8\,649\,700$ zł), a najwyższą scenariusza $i = 2$ ($LCC_2 = 8\,929\,300$ zł),
- najniższą wartość $LCEAC$ otrzymano dla scenariusza $i = 3$ ($LCEAC_3 = 716\,900$ zł), a najwyższą dla scenariusza $i = 1$ ($LCEAC_1 = 737\,300$ zł),
- najwyższą wartość WLC zapewnia realizacja scenariusza $i = 1$ ($WLC_1 = 4\,611\,700$ zł), a najniższą scenariusza $i = 2$ ($WLC_2 = 4\,540\,400$ zł),

- najniższą wartość ΔR_{LCC} daje realizacja scenariusza $i = 3$ ($\Delta R_{LCC,3} = -107\,900$ zł), a najwyższą scenariusza $i = 2$ ($\Delta R_{LCC,2} = 171\,700$ zł).



Rys. 15.6. Wynikowa funkcja przynależności dla kryterium ΔR_{LCC}

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że pod względem kryteriów LCC , $LCEAC$ oraz ΔR_{LCC} najkorzystniejszym wariantem realizacji przedsięwzięcia budowlanego, polegającego na realizacji i eksploatacji budynku wielorodzinnego mieszkalnego aż do czasu jego wycofania, jest dla inwestora scenariusz $i = 3$, który zapewnia najniższe koszty cyklu życia budynku, najniższą wartość ekwiwalentu jego rocznych kosztów cyklu życia oraz najniższą wartość dodatku kosztowego za ryzyko w cyklu życia budynku. Należy jednak podkreślić, że ten scenariusz cyklu życia budynku zakłada długoterminowy wynajem powierzchni mieszkalnej, co w rankingu preferencji inwestora było dla niego rozwiązaniem najmniej interesującym.

15.5. PODSUMOWANIE

Sposób wykorzystania modelu szacowania kosztów cyklu życia budynków, umożliwiającego kwantyfikację dodatku kosztowego za ryzyko, został przedstawiony na przykładzie analizy ekonomicznej cyklu życia ($LCCA$) budynku mieszkalnego wielorodzinnego z wydzieloną powierzchnią gospodarczą i usługową. Analiza $LCCA$ została przeprowadzona na etapie programowania przez inwestora przedsięwzięcia budowlanego, w wyniku którego powstanie budynek, który będzie eksploatowany aż do czasu jego wycofania.

W przykładzie obliczeniowym pokazano m.in. w jaki sposób zidentyfikowane w cyklu życia budynku ryzyko może przełożyć się na wielkość kosztów w jego

cyklu życia w zależności od wybranego sposobu reakcji na ryzyko. Zdefiniowane scenariusze cyklu życia rozwiązań alternatywnych przedmiotowego budynku uwzględniały całkowitą absorpcję ryzyka w kosztach początkowych przedsięwzięcia budowlanego (scenariusz $i = 1$), kombinację absorpcji ryzyka w kosztach początkowych z częściowym transferem ryzyka do fazy eksploatacji (scenariusz $i = 2$) lub całkowity transfer ryzyka do fazy eksploatacji budynku (scenariusz $i = 3$). Uzyskane rezultaty pozwoliły m.in. wyciągnąć wniosek, że w cyklu życia budynku mogą zaistnieć okoliczności, które z uwagi na zaistniałe ryzyko nie obciążą inwestora dodatkowym kosztem, a wytworzą dla niego ponadplanowy zysk. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, całkowity transfer ryzyka do fazy eksploatacji budynku (scenariusz $i = 3$) może powodować redukcję wielkości kosztów cyklu życia alternatywnego rozwiązania budynku ($LCC_3 = 8\,649\,700$ zł, przy najwyższej wielkości $LCC_2 = 8\,929\,300$ zł dla scenariusza $i = 2$).

W rozprawie doktorskiej [28], po wykonaniu licznych badań weryfikacyjnych (m.in. po badaniu wrażliwości modelu na ewentualność zmiany parametrów wpływających na wyniki obliczeń), zarekomendowano, aby w celu wykonania ekonomicznej analizy cyklu życia budynku lub jego alternatywnych rozwiązań, stosowano jeden z dwóch zestawów funkcji przynależności: (i) zestaw podstawowy – utworzony przez funkcje o wykresach odcinkowo-liniowych, czyli funkcje trójkątne oraz klas Γ i L , lub (ii) zestaw alternatywny III – zbudowany z najbardziej złożonych funkcji przynależności, tj. symetrycznych i niesymetrycznych funkcji Gaussa, przy jednoczesnym wykorzystaniu metody środka ciężkości przy defuzyfikacji. Dla tego typu kombinacji zestawów funkcji przynależności i metody wyostrenia wyniku model szacowania kosztów cyklu życia budynków generuje największe wartości dla kryterium LCC .

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ammar M., Zayed T., Moselhi O. (2013), *Fuzzy-based life-cycle cost model for decision making under subjectivity*, Journal of Construction Engineering and Management, 139(5), 556–563.
- [2] Asiedu Y., Gu P. (1998), *Product life cycle cost analysis: state of the art review*, International Journal of Production Research, 36(4), 883–908.
- [3] Boussabaine A., Kirkham R. (2008), *Whole life-cycle costing: risk and risk responses*, John Wiley & Sons.
- [4] Dong W., Shah H.C. (1987), *Vertex method for computing functions of fuzzy variables*, Fuzzy Sets and Systems, 24(1), 65–78.
- [5] Dong W.M., Shah H.C., Wongt F.S. (1985), *Fuzzy computations in risk and decision analysis*, Civil Engineering Systems, 2(4), 201–208.

- [6] Fabrycky W.J., Blanchard B.S. (1991), *Life-cycle cost and economic analysis*, Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- [7] Fojud A. (2007), *Modelowanie cyklu życia produktu realizowanego w ramach przedsięwzięcia budowlanego*, [w:] *Metody i modele badań w inżynierii przedsięwzięć budowlanych*, O. Kapliński (red.), PAN KILiW, IPPT, Warszawa.
- [8] Givens J.A., Tahani H. (1988), *An improved method of performing fuzzy arithmetic for computer vision*, *International Journal of Approximate Reasoning*, 2(2), 100–101.
- [9] Górzyński J. (2007), *Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [10] ISO 15686-5:2017(en), *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life cycle costing*.
- [11] Kacprzyk J. (1986), *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*, PWN, Warszawa.
- [12] Kacprzyk J. (2001), *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [13] Kasprowicz T. (2010), *Proces analizy koncepcyjnej, projektowania, organizacji i realizacji przedsięwzięć budowlanych*, *Czasopismo Techniczne*, 1-B, 177–189.
- [14] Komunikat Komisji dla Rady i Parlamentu Europejskiego z dnia 18 czerwca 2003 r. *Zintegrowana Polityka Produktowa. Wykorzystywanie podejścia środowiskowego opartego na analizie cyklu życia produktu* (COM 2003, 302, wersja ostateczna).
- [15] Korytarova J., Hromadka V. (2010), *Building life cycle economic impacts*, 2010 International Conference on Management and Service Science, August 2010, 1–4.
- [16] Lewandowska A., Noskowiak A., Pajchrowski G., Strykowski W., Witczak A. (2012), *Środowiskowa ocena cyklu życia modelowych budynków drewnianych i murowanych jako przykład zastosowania techniki LCA*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Drewna, Poznań.
- [17] Plebankiewicz E. (2014), *Kierunki działań zmierzających do obniżania kosztów w cyklu życia budynków miejskich*, [w:] *Budownictwo na obszarach zurbanizowanych: nauka, praktyka, perspektywy*, A. Halicka (red.), Politechnika Lubelska, Lublin.
- [18] Plebankiewicz E., Biadała K., Wieczorek D. (2015), *Life cycle costs of built structures*, [in:] *Recent advances in Civil Engineering: Construction Management*, E. Plebankiewicz (ed.), Politechnika Krakowska, Kraków, 83–96.
- [19] Plebankiewicz E., Zima K., Wieczorek D. (2015), *Review of methods of determining the life cycle cost of buildings*, [in:] M. Hajdu, *CC 2015: Creative Construction Conference, 21–24 June 2015 – Kraków, Poland. Proceedings*, 309–316.
- [20] Plebankiewicz E., Zima K., Wieczorek D. (2017), *Quantification of the risk addition in life cycle cost of a building object*, *Czasopismo Techniczne*, 5, 35–45.

- [21] PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [22] Połowski M. (2009), *Podstawowe pojęcia dotyczące procesu inwestycyjnego w budownictwie*, [w:] *Kierowanie budowlanym procesem inwestycyjnym*, M. Połowski (red.), SGGW, Warszawa.
- [23] Projekt Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 10 listopada 2017 r. w sprawie metody kalkulacji kosztów cyklu życia budynków oraz sposobu przedstawiania informacji o tych kosztach.
- [24] Rozporządzenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 11 lipca 2018 r. w sprawie metody kalkulacji kosztów cyklu życia budynków oraz sposobu przedstawiania informacji o tych kosztach.
- [25] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 23 listopada 2021 r. w sprawie metody kalkulacji kosztów cyklu życia budynków oraz sposobu przedstawiania informacji o tych kosztach.
- [26] Urząd Zamówień Publicznych (2009, 2012), *Zielone zamówienia publiczne*, Warszawa.
- [27] US Federal Acquisition Institute (1998), *A Glossary of Acquisition Terms*, Washington.
- [28] Wieczorek D. (2018), *Modelowanie kosztów cyklu życia budynków z uwzględnieniem czynników ryzyka*, rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [29] Wong I.L., Perera S., Eames P.C. (2010), *Goal directed life cycle costing as a method to evaluate the economic feasibility of office buildings with conventional and TI-façades*, *Construction Management and Economics*, 28(7), 715–735.

16. BADANIA ANKIETOWE W BUDOWNICTWIE

Elżbieta Radziszewska-Zielina¹

16.1. WSTĘP

Metoda badawcza powinna być właściwie dobrana, adekwatnie do postawionego problemu badawczego oraz tematu badań. W badaniach ankietowych podmiotem badań jest człowiek, badamy jego opinie, poglądy, potrzeby, preferencje. Na budowie mamy przede wszystkim do czynienia z pracą ludzi (wykonawstwo, usługa budowlana) dla ludzi (inwestor, zamawiający, użytkownik). Pomiędzy uczestnikami przedsięwzięcia budowlanego występują zależności, relacje i powiązania, na które wpływ ma też wiele czynników zewnętrznych [47]. Kwestie techniczne, inżynierskie oraz ekonomiczne, rynkowe czy społeczne wzajemnie się przenikają i uzupełniają. Podstawową drogą do zbadania postaw i preferencji odbiorców bądź uzyskania specjalistycznych opinii ekspertów są badania ankietowe, realizowane w formie badań jakościowych lub ilościowych. Ważny jest zarówno proces projektowania, realizacji badań, jak i weryfikacji pozyskanych danych. Badania ankietowe najczęściej stanowią punkt wyjścia do dalszych badań i analiz w kontekście podjętych problemów badawczych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, co dotyczyło np. badań [38, 44, 52].

Inżynieria przedsięwzięć budowlanych dostarcza zarówno specjalistycznej wiedzy, jak i umiejętności oraz kompetencji niezbędnych do podejmowania decyzji, zarówno co do zarządzania przedsiębiorstwem budowlanym, jak i decyzji odnośnie do realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Niezbędne jest posiadanie wiarygodnych informacji oraz bogatej wiedzy o warunkach technicznych, społecznych, prawnych i ekonomicznych w aspekcie realizacji procesu budowy oraz umiejętności podejmowania decyzji menadżerskich w warunkach rynkowych, mając na względzie oczekiwania i preferencje zarówno inwestorów, jak i użytkowników. Źródłem takich danych mogą być badania ankietowe [43, 45].

W pracy postawiono sobie trzy cele. Pierwszy – przegląd literatury w zakresie badań zrealizowanych w ostatnich latach w budownictwie, a zwłaszcza z zakresu

¹ Katedra Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, e-mail: elzbieta.radziszewska-zielina@pk.edu.pl.

inżynierii przedsięwzięć budowlanych, w których jako narzędzie badawcze zastosowano kwestionariusz wywiadu lub ankiety. Przegląd przeprowadzono na podstawie wybranych artykułów z bazy Scopus, opublikowanych w okresie ostatnich dziesięciu lat. Drugi – wskazanie aktualnych trendów badawczych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych oraz najczęściej poruszanych problemów współczesnego budownictwa, które starano się zbadać i przeanalizować z wykorzystaniem badań ankietowych lub wywiadów. Trzeci – wykazanie, że badania te, pomimo iż najczęściej wykorzystywane są w naukach społecznych, a rzadziej w naukach technicznych, stanowią jednak bardzo dobre narzędzie do rozwiązania wskazanych problemów badawczych w budownictwie.

Praca zawiera rezultaty doświadczeń badawczych i przemyśleń autorki na temat możliwości zastosowań badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Autorka przeanalizowała i opisała możliwości zastosowania badań ankietowych zarówno w nauce, jak i praktyce inżynierii przedsięwzięć budowlanych oraz zaproponowała klasyfikację badań kwestionariuszowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych.

16.2. WYBRANE PROBLEMY BADAWCZE W INŻYNIERII PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH

16.2.1. MODELOWANIE INFORMACJI O BUDYNKU (BIM)

Coraz powszechniejszym, wręcz nieodzownym narzędziem w budownictwie staje się modelowanie informacji o budynku (BIM). Rozwój tego narzędzia może jednak przysparzać trudności dotyczących jego zrozumienia i właściwego stosowania. Przyjęcie technologii BIM badano np. w Korei (w zestawieniu z danymi dotyczącymi BIM w USA), stosując wywiady z ekspertami. Akceptację BIM przez przedsiębiorstwa budowlane w Malezji opisuje praca [49], bazując na badaniach ankietowych w przedsiębiorstwach budowlanych.

Korzyści z BIM oczekiwane przez klientów to temat pracy [16]. Przebadano w niej za pomocą ankiet klientów w Malezji, wykazując potencjał technologii BIM w tym kraju. Czynniki sukcesu w zastosowaniu BIM w krajach rozwijających się badano w pracy [33] na podstawie danych z ankiet rozpowszechnionych wśród pracowników publicznego i prywatnego sektora budowlanego w Turcji.

16.2.2. IDENTYFIKACJA CZYNNIKÓW NIEKORZYSTNYCH, RYZYKO

Rolą badań ankietowych jest również identyfikacja czynników niekorzystnych oraz ich wpływu na różne aspekty przedsięwzięcia budowlanego. W pracy [3] badano wpływ niekorzystnych, trudnych do przewidzenia i nieuwzględnionych w kontrak-

tach czynników, związanych z miejscem budowy, na czas trwania i koszt przedsięwzięć budowlanych na Sri Lance, za pomocą 10 wywiadów z ekspertami i 93 ankiet. Niekorzystną sytuacją na budowie są opóźnienia. Skutkami opóźnień w przedsięwzięciach budowlanych zajmuje się m.in. praca [60], w której na przykładzie Malezji opracowano ranking 17 skutków opóźnień według ich ważności. Wyniki uzyskano drogą badań ankietowych wśród ekspertów (wykonawców i konsultantów) oraz klientów (łącznie 240 respondentów).

Identyfikacją ryzyka w międzynarodowych przedsięwzięciach, zatrudniających przedsiębiorstwa z Singapuru i krajów rozwijających się, zajmowano się w pracy [17] – uzyskano ankiety z 38 przedsiębiorstw, wyróżniono czynniki ryzyka i oceniono je, stosując wskaźnik zagrożenia (ang. *risk criticality index*). Różne typy ryzyka związanego z bezpieczeństwem konstrukcji w fazie projektowania i budowy opisano w artykule [56] na bazie badań ankietowych przeprowadzonych wśród ekspertów, wyłaniając krytyczne czynniki bezpieczeństwa konstrukcji, wśród nich też czynniki ludzkie, takie jak komunikacja i współpraca.

16.2.3. OCENA KOMFORTU I SATYSFAKCJI

Jednym z zastosowań badań ankietowych jest ocena satysfakcji użytkowników konkretnych budynków oraz większych obszarów zabudowanych. W publikacji [64] autorzy analizowali dane z szeroko zakrojonych badań ankietowych, przeprowadzonych w aż 40 miastach w Chinach i dotyczących m.in. jakości obiektów, udogodnień publicznych, bezpieczeństwa i transportu.

W pracy [29] metodą ankiety zbadano satysfakcję w zakresie warunków cieplnych prawie 1000 użytkowników budynków szkolnych i mieszkalnych na Madagaskarze w porze deszczowej i suchej. Ankiety badania komfortu użytkowania budynków docieplonych od wewnątrz innowacyjnym systemem przedstawiono w pracach [34, 42].

Publikacja [12] prezentuje badania, w których eksperci oceniali za pomocą ankiety zależności pomiędzy czynnikami wpływającymi na kryterium korzyści społecznych oraz korzyści z zachowania dziedzictwa kulturowego obiektu zabytkowego. Badania te są podstawą analizy wielokryterialnej, bazującej na opracowanym modelu wyboru nowej funkcji użytkowej zabytkowego obiektu Stara Polana w Zakopanem [14]. Ankiety badania opinii ekspertów były również wykorzystane na etapie oceny wpływu i zależności pomiędzy parametrami mierzalnymi i trudno mierzalnymi [13].

16.2.4. ASPEKT SPOŁECZNY BUDOWNICTWA

Aspekt społeczny łączy się wyraźnie z punktem poprzednim w zakresie oceny satysfakcji, a przedstawione prace nieraz tematycznie się zająbiają.

Badania ankietowe zastosowano w analizie podejścia projektantów do budownictwa dla przesiedleńców [2]. W pozycji [30] zbadano metodą ankiety aspekt społeczny budownictwa mieszkaniowego w kontekście projektowania przestrzeni publicznej do wspólnego użytku mieszkańców.

W aspekcie społecznym można rozważać też potrzeby, preferencje oraz oczekiwania dostawców i nabywców usług budowlanych. Potrzeby małych i średnich przedsiębiorców budowlanych w Ghanie badano w pracy [4] na podstawie ankiet wśród władz lokalnych, wykonawców i konsultantów. Decydujące o wyborze danego materiału budowlanego czynniki, uwzględniane przez nabywców materiałów wykończeniowych, analizują z kolei badacze w [19].

Badania ankietowe zastosowane zostały również przy określeniu potrzeb remontowych budynków mieszkalnych [31] oraz wykorzystane do oceny socjalnych właściwości użytkowych budynków mieszkalnych w opracowaniu [36].

16.2.5. KONFLIKT A WSPÓŁPRACA

Badania ankietowe posłużyły jako źródło danych w pracy [27], badającej wpływ różnych czynników, mogących mieć wpływ na liczbę roszczeń i sporów sądowych dotyczących przedsięwzięć drogowych. Wyniki badania wskazują, że metody realizacji przedsięwzięcia mają znaczące powiązanie z takimi czynnikami jak zaufanie i partnerstwo w przedsięwzięciu. Przyczyny sporów w przedsięwzięciach budowlanych w Turcji są przedmiotem analizy pracy [63], a wyniki badań ankietowych wśród 80 wykonawców wyłoniły ich podstawowe przyczyny: niską jakość robót, opóźnienia w płatnościach, konflikty i błędy w zarządzaniu.

Podejście przeciwne z kolei, oparte na współpracy, zaprezentowano w publikacji [18], gdzie model zaufania w przedsięwzięciach budowlanych w USA zbudowano na podstawie wyników badań ankietowych przeprowadzonych wśród wykonawców. Badania ankietowe w zakresie współpracy partnerskiej w budownictwie były prezentowane w cyklu publikacji [37, 48], gdzie analizowano poziom współpracy partnerskiej i jej wpływ na czas i koszt przedsięwzięcia. W publikacji [39] zaprezentowano działanie opracowanego algorytmu wspomagającego generalnego wykonawcę w zakresie wyboru podwykonawcy do współpracy partnerskiej podczas realizacji przedsięwzięć budowlanych.

16.2.6. ZARZĄDZANIE I BEZPIECZEŃSTWO

Miernikiem dobrego zarządzania przedsiębiorstwem budowlanym są jego sukcesy. Poprzedzona badaniami ankietowymi wśród ekspertów identyfikacja i ocena czynników sukcesu przedsiębiorstw budowlanych [59] została przeprowadzona w Indiach, a podstawowym czynnikiem sukcesu okazała się dostępność wykwalifikowanej kadry.

Proces komunikacji pomiędzy inwestorem a usługobiorcą, wykonawcą przedsięwzięcia w systemie zaprojektuj i wybuduj w USA, prezentuje opracowanie [58] na podstawie danych z ankiet i wywiadów wśród ekspertów. Podobnie na podstawie danych z literatury i badań ankietowych opisano komunikację w zarządzaniu przedsięwzięciem budowlanym w RPA, wyróżniając najważniejsze umiejętności komunikacyjne [65]. Badania ankietowe w zakresie komunikacji i przepływu informacji w przedsięwzięciach budowlanych były również prezentowane w publikacjach [23, 24, 55].

Kwestią zarządzania zajmuje się też praca [15], która wskazuje te praktyki w zarządzaniu przedsięwzięciem budowlanym, które mogą poprawić efektywność pracy. Przeprowadzono najpierw analizę jakościową – wywiady wśród ekspertów, a potem ilościową – ankiety wśród wykonawców. Trendy w zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi wśród przedsiębiorstw na Słowacji zbadano w pracy [25] za pomocą wielokrotnie powtarzanych w latach 1996–2013 badań ankietowych.

Ankiety są naturalnym narzędziem badawczym w przypadku badania problemu bezpieczeństwa i ryzyka utraty zdrowia na budowie, ponieważ to zagadnienie bezpośrednio wiąże się z ludźmi. Wśród prac na ten temat wyróżniają się prace badawcze dotyczące zarządzania bezpieczeństwem, m.in. praca [28], która identyfikuje działania związane z bezpieczeństwem ludzi. Celem badań ankietowych jest wyłonienie i wskazanie takich praktyk w zarządzaniu, które poprawią bezpieczeństwo pracowników realizujących przedsięwzięcie budowlane.

16.2.7. ODPADY W BUDOWNICTWIE

Ważnym aspektem każdego przedsięwzięcia budowlanego jest minimalizacja generowania odpadów na budowie i marnotrawstwa materiałów. Minimalizacją odpadów na etapie projektowania budynku zajmuje się opracowanie [62], w którym wyróżniono 19 czynników minimalizacji odpadów, przeprowadzono badania ankietowe w dziesięciu biurach projektów i wyłoniono czynniki krytyczne.

Na trudności dotyczące podejścia do gospodarowania odpadami w przedsięwzięciach budowlanych na Kostaryce wskazuje praca [1], wykorzystująca przeprowadzone podczas wizyt na budowach ankiety i wywiady. Trudności te wynikają przede wszystkim z braku wiedzy o ochronie środowiska i braku rejestracji danych o odpadach na budowie.

16.2.8. ZIELONE BUDOWNICTWO

Zielone budownictwo to bardzo aktualny temat badań, często analizowany z wykorzystaniem wyników badań ankietowych.

Rozwiązanie, jakim są zielone dachy, analizowano w Grecji (800 ankiet przeprowadzonych wśród mieszkańców miast), wykazując duży popyt na tego typu

rozwiązanie [61]. Ocena strategii promowania zielonego budownictwa w krajach rozwijających się jest przedmiotem badań w pracy [9]. Za pomocą wywiadów wśród 43 ekspertów z doświadczeniem w zielonym budownictwie w Ghanie wyróżniono najlepsze strategie promocji. Bariery w stosowaniu zielonych technologii budowlanych zainteresowały autorów pracy [8]. Badania ankietowe wśród ekspertów w Ghanie pozwoliły wyróżnić 20 kluczowych barier.

16.2.9. ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ

W artykule [10] analizowano obecność czynników zrównoważonego rozwoju w cyklu życia przedsięwzięcia budowlanego. Na podstawie badań ankietowych wśród 119 inżynierów budowlanych w Strefie Gazy sporządzono wykaz czynników zrównoważonego rozwoju.

Zrównoważony rozwój analizują też, stosując badania ankietowe, inne prace, np. [6], dotycząca dostosowania się przedsiębiorstw budowlanych do wymogów zrównoważonego budownictwa. W kolejnych pracach badania ankietowe opinii ekspertów zostały wykorzystane do określenia preferencji rozwiązań technicznych w zakresie budownictwa zrównoważonego [46] oraz układu urbanistycznego osiedla mieszkaniowego [11].

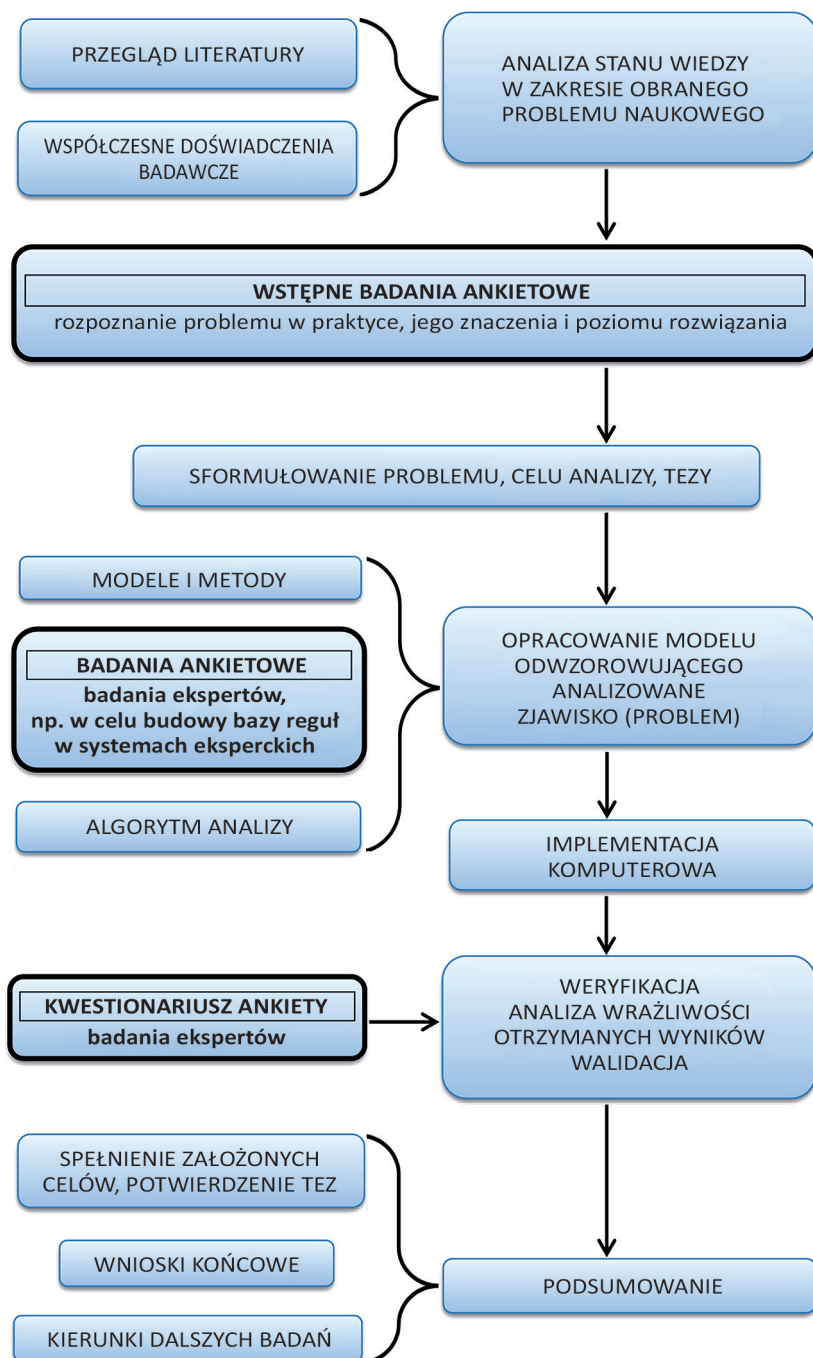
16.3. CHARAKTERYSTYKA BADAŃ ANKIETOWYCH W INŻYNIERII PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH

16.3.1. BADANIA OPINII EKSPERTÓW

Badania opinii ekspertów – specjalistów w danej dziedzinie – są często stosowane w nauce w zakresie inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Rola tych badań jest bardzo ważna, a przydatność bezsporna co najmniej w dwóch przypadkach:

- na etapie wstępnych badań naukowych, rozpoznania problemu badawczego,
- na etapie pozyskiwania danych, np. w celu przeprowadzenia analiz wielokryterialnych lub zaprojektowania systemów ekspertowych w ramach opracowań naukowych, a ostatecznie opracowania i dostarczenia praktycznego narzędzia dla przemysłu [22, 57].

W pierwszym przypadku badania ankietowe są przeprowadzane w grupie specjalistów, zazwyczaj praktyków, profesjonalistów (np. kierownicy budów). Badania mają dać odpowiedź na pytanie, czy problem, który zainteresował naukowców na etapie studiów literaturowych oraz nadal nie jest wystarczająco dobrze rozwiązany od strony naukowej oraz praktycznej (brakuje skutecznych metod i narzędzi do jego rozwiązania), stanowi również zagadnienie istotne do analiz dla grup i osób na codzień z nim się stykających (np. dla praktyków na placu budowy). Badania



Rys. 16.1. Schemat przykładowego zastosowania badań ankietowych w nauce

mają zdiagnozować zaistniałe problemy, stan i sposób ich rozwiązania w praktyce, braki w opracowaniu narzędzi do ich rozwiązania, potrzeby (np. w zakresie systemu wspomagającego jego analizę i rozwiązanie), oraz być bodźcem do zajęcia się tym tematem szerzej w ramach dalszych badań naukowych (problem, sytuacja, zjawisko zostanie zamodelowane, a następnie zostaną dobrane i zastosowane lub specjalnie opracowane do jego analizy metody badawcze). W wyniku prowadzonych badań naukowych model i metody przejdą proces weryfikacji, a praktycy otrzymają odpowiedź na zaistniałe problemy, np. w postaci użytecznego narzędzia wspomagającego proces podejmowania decyzji w danym zakresie. Badania ankietowe opinii ekspertów mogą zatem stanowić pierwszy, ważny etap w badaniach naukowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych.

W drugim przypadku badania ankietowe również służą jako narzędzie do pozyskania danych od ekspertów. Tego typu dane mogą być niezbędne, aby można było zastosować odpowiednie metody do rozwiązania określonego problemu badawczego. Metody te mogą być z kolei wykorzystane na etapie budowy modelu danego zjawiska. W tym przypadku badania ankietowe służą np. do identyfikacji i oceny kryteriów oraz ich wag lub do opracowania bazy reguł w systemach ekspertowych. Niezwykle ważną kwestią jest odpowiedni dobór ekspertów do badań, osób kompetentnych, z dużą wiedzą i doświadczeniem zawodowym w temacie badań (co jest udokumentowane np. stażem pracy w danej specjalności) oraz ich motywacja do wzięcia udziału w badaniu. Grupę zaufanych ekspertów wyznaczonych do badania stanowi zazwyczaj kilka osób (do dziesięciu). Na etapie weryfikacji modelu badania opinii ekspertów dotyczą oceny wyniku działania modelu i możliwości jego zastosowania w praktyce (rys. 16.1).

16.3.2. BADANIA OPINII UŻYTKOWNIKÓW I KLIENTÓW

Badania opinii użytkowników i klientów obejmują zarówno potencjalnych, jak i byłych czy aktualnych klientów. Ważną rolę badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych jest wspomaganie decyzji rynkowych inwestorów, projektantów i wykonawców budowlanych. W tym celu niezbędne jest zebranie opinii potencjalnych klientów rynkowych na temat ich potrzeb i preferencji w zakresie produktów budowlanych, w tym towarów i usług, oraz oceny przez byłych oraz aktualnych klientów produktów już zaoferowanych.

16.3.3. BADANIA JEDNORAZOWE I WIELOKROTNE (POWTARZALNE)

Badania ankietowe mogą być wykonywane jednorazowo lub wielokrotnie powtarzane z zastosowaniem tego samego kwestionariusza. Badania powtarzane wielokrotnie w czasie mogą być realizowane w formie badań panelowych lub trackingowych. Badania realizowane są co pewien określony, najczęściej taki sam okres.

Badania panelowe polegają na kilkukrotnych pomiarach tych samych analizowanych jednostek w celu zbadania i wyjaśnienia dynamiki zaistniałych zmian, badanych cech osób lub organizacji. W metodzie tej następuje porównanie wyników badań przeprowadzonych kilkukrotnie w uzasadnionych odstępach według tego samego narzędzia – kwestionariusza. Zasadnicza rola badań ankietowych w przypadku badań panelowych sprowadza się do monitorowania zmian. Jeżeli badania są powtarzane co pewien określony przedział czasu, możliwe jest monitorowanie w sposób ciągły np. zmian zaistniałych na rynku.

Badania trackingowe są również badaniami wielokrotnie realizowanymi. Różnią się jednak od badań panelowych tym, że są realizowane na analogicznie dobranej próbie badawczej, ale z udziałem innych respondentów.

Podsumowując, metoda panelu jest techniką pomiaru wielokrotnego, powtarzanego na tej samej grupie osób co pewien czas i według tego samego kwestionariusza, natomiast w przypadku badań trackingowych stosowane jest to samo narzędzie badawcze, kwestionariusz, i tak samo zdefiniowana jest populacja i struktura próby badawczej, ale badania przeprowadzane są z udziałem innych osób niż w prowadzonych wcześniej badaniach.

Przykładem mogą być badania przeprowadzone trzykrotnie w okresie ostatnich 15 lat, dotyczące opinii mieszkańców osiedli Lublina w zakresie utrzymania i eksploatacji oraz potrzeb remontowych, które przedstawiono w publikacji [32].

16.3.4. BADANIA ILOŚCIOWE I JAKOŚCIOWE

Ze względu na rodzaj materiału badawczego i sposób jego analizy można wyróżnić badania jakościowe i ilościowe.

Badania ilościowe są oparte na kwestionariuszu zawierającym wyłącznie pytania zamknięte, które są wyskalowane i ograniczają odpowiedź respondenta do wyboru jej odpowiedniego wariantu. W przypadku tych badań możliwa jest analiza statystyczna pozyskanych danych.

Najwięcej trudności sprawia skalowanie odpowiedzi, dlatego badania ilościowe są często poprzedzane badaniami jakościowymi z zastosowaniem pytań otwartych. Wówczas badania jakościowe dostarczają informacji na temat możliwych odpowiedzi przez respondentów na poszczególne pytania i są podstawą do podania propozycji wartości zmiennych w przypadku pytań kwestionariusza w badaniach ilościowych. Celem badań jakościowych może być np. określenie parametrów rynku, analiza natury procesów decyzyjnych, odkrycie czynników motywacyjnych i postaw wpływających na zachowania konsumentów. Jeżeli badania jakościowe służą do ustalenia wytycznych do badań ilościowych, to są wykonywane przed ilościowymi.

Badania z zastosowaniem kwestionariusza, realizowane metodą wywiadu lub ankiety, mogą ograniczać się tylko do zebrania danych ilościowych, mogą przebiegać

dwuetapowo, tj. badania jakościowe i ilościowe, rzadziej ilościowe i jakościowe, albo skupiać się wyłącznie na danych jakościowych.

W dalszej części zostanie krótko omówiony aspekt wykorzystywania badań ankietowych w celach marketingowych przedsiębiorstwa budowlanego.

Menadżerowie w przedsiębiorstwach budowlanych podejmują wiele decyzji, począwszy od koncepcji usługi aż po jej sprzedaż i utrzymywanie kontaktów z klientami. Aby podjąć właściwe decyzje i przyjąć dobrą strategię marketingową działania przedsiębiorstwa budowlanego na konkurencyjnym rynku, niezbędne są odpowiednie informacje. Informacji takich dostarczają m.in. badania ankietowe, które można określić w tym przypadku jako systematyczne zbieranie, analizowanie i prezentowanie danych w celu doskonalenia procesu decyzyjnego przedsiębiorstwa budowlanego.

Autorka zaproponowała przykładową tematykę badań, którą przedsiębiorstwa budowlane powinny realizować samodzielnie lub zlecać ich realizację specjalistycznym ośrodkom badawczym:

- zapotrzebowanie na usługi przedsiębiorstwa – czy popyt ma tendencję rosnącą, czy malejącą,
- zmiany i wahania w popycie na rynkach krajowych i zagranicznych,
- czynniki, jakimi kieruje się potencjalny klient – inwestor przy wyborze wykonawcy,
- preferencje potencjalnych klientów co do usług, ich cech, przebiegu wykonania usługi (technologia, materiały), czasu jej realizacji,
- zadowolenie klientów z wykonanej usługi – jeśli nie są zadowoleni, to dlaczego tak się dzieje,
- klienci przedsiębiorstwa – kim są i jak się zachowują przed, w trakcie i po zakupie usługi, przebieg procesu decyzyjnego zakupu,
- siła nabywcza klientów,
- trendy występujące na rynku – co je wywołuje, przyczyny i skutki,
- nowe rozwiązania techniczno-technologiczne w budownictwie i ich odbiór społeczny,
- rozwiązania technologiczne i materiałowe stosowane przez konkurencję,
- warunki zewnętrzne działania przedsiębiorstwa, w tym społeczne, polityczne i ekonomiczne,
- badanie struktury i segmentacji rynku budowlanego,
- pozycja przedsiębiorstwa na rynku, opinia o przedsiębiorstwie i jego usługach, wizerunek przedsiębiorstwa wśród klientów,
- przedsiębiorstwa konkurencyjne – jak działają na rynku, jaka jest opinia o nich i ich usługach, porównanie w zakresie organizacji, zarządzania i strategii przedsiębiorstw konkurencyjnych,
- cena usługi budowlanej, jej atrakcyjność dla klienta,
- dystrybucja usługi (sieć punktów sprzedaży), jej skuteczność,

- promocja, w tym reklama, pretesty reklam, efektywność reklamy,
- badanie zasobów finansowych, rzeczowych i ludzkich, badanie pracowników i kooperantów przedsiębiorstwa.

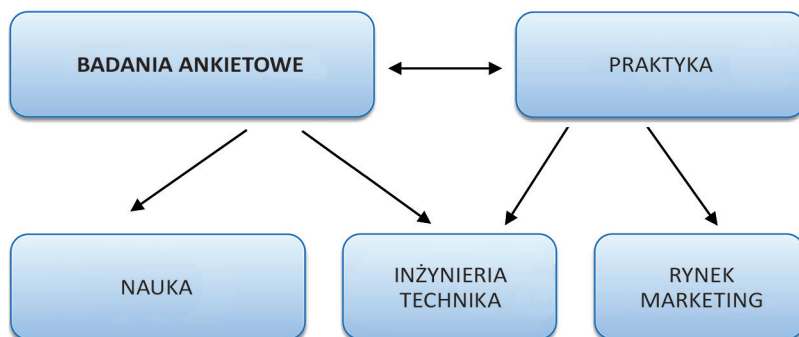
Wskazane jest, w przypadku badania przez przedsiębiorstwo budowlane popytu, preferencji i zadowolenia klientów z usługi, zwrócenie uwagi nie tylko na fakt wykonania usługi budowlanej, ale też na zastosowane wyroby budowlane i ich parametry. Podobnie producenci materiałów budowlanych, badając popyt, preferencje i zadowolenie klientów, powinni skupić się nie tylko na samym materiale budowlanym, ale również na usłudze budowlanej. W przypadku przedsiębiorstw projektowo-wykonawczych i deweloperów wskazane jest badanie popytu i preferencji odnośnie do parametrów projektowanego obiektu wśród przyszłych użytkowników (obraz idealnego produktu w oczach klienta).

Ponadto, realizując jedną z funkcji zarządzania, jaką jest controlling zasobów ludzkich w zarządzaniu kadrami, można wykorzystać wewnętrzne badania ankietowe w przedsiębiorstwie w zakresie kontroli pracowników pod względem kompetencji, pracowitości, rzetelności, umiejętności współpracy oraz kontaktu z klientami.

W zależności od reprezentowanej dyscypliny i specjalności podział na rodzaje ze względu na zakres zastosowań badań ankietowych jest różny. Przykładowo, w socjologii, zgodnie z uznaną pozycją wydaną przez Wydawnictwo Instytutu Filozofii i Socjologii PAN [54], podstawowy podział badań ankietowych jest następujący:

- badania opinii publicznej (np. sondaże przedwyborcze),
- badania rynku, marketingowe, inaczej konsumenckie (np. wybory konsumenta konkretnych produktów),
- badania akademickie (cel poznawczy, np. badanie postaw społecznych).

Tworząc analogiczną klasyfikację ze względu na zastosowania badań ankietowych w budownictwie (zwłaszcza w inżynierii przedsięwzięć budowlanych), należy wyróżnić dwie grupy badań (rys. 16.2).



Rys. 16.2. Obszary zastosowania badań ankietowych w budownictwie

1. Badania ankietowe stanowią element badań naukowych, jedno z ogniw w procesie badawczym, i są realizowane:
 - a) na etapie identyfikacji problemu naukowego i praktycznego (zaraz po lub równoległe z przeglądem literatury naukowej); badania opinii ekspertów, np. kierowników budów:
 - analiza aktualnego stanu, opis problemu,
 - analiza stopnia rozwiązania problemu w praktyce,
 - analiza przydatności zastosowanych dotychczas w praktyce metod do rozwiązania problemu,
 - b) na etapie budowy modelu (opisu interesującego aspektu rzeczywistości w postaci modelu matematycznego); badania opinii ekspertów w zakresie:
 - doboru parametrów, budowy struktury modelu,
 - określenia zależności pomiędzy parametrami,
 - oceny parametrów trudno mierzalnych i ich ważności,
 - opracowania bazy reguł w systemach ekspertowych,
 - c) na etapie weryfikacji modelu; badania opinii ekspertów w zakresie:
 - oceny wyniku działania modelu i możliwości zastosowania modelu w praktyce.
2. Badania rynku i badania marketingowe, w tym przypadku pozyskane dane z próby, są poddawane analizie statystycznej, a wynik analizy i wyciągnięte wnioski wspomagają przedsiębiorcę budowlanego w podejmowaniu trafnych decyzji; są to badania użytkowników lub potencjalnych klientów, np.:
 - badania popytu,
 - badania preferencji,
 - badania zadowolenia klienta,
 - badanie komfortu użytkownika pomieszczeń ze względu na hałas,
 - badanie komfortu cieplnego użytkownika.

Poniżej przedstawiono przykład cyklu publikacji, w których badania ankietowe pełnią istotną, komplementarną rolę. W publikacji [12] przedstawiono wyniki badań, w których grupa specjalistów, ekspertów oceniała za pomocą przygotowanego kwestionariusza ankiety zależności pomiędzy czynnikami wpływającymi na kryterium korzyści społecznych oraz korzyści z zachowania dziedzictwa kulturowego. Były to jedne z parametrów przyjętych do analizy i oceny ze względu na rozpatrywane alternatywne funkcje użytkowe w adaptacji obiektu zabytkowego Stara Polana w Zakopanem. Pozostałe parametry, związane np. z akustyką, drganiami czy komfortem cieplnym, były oceniane na podstawie wykonanych na obiekcie badań z wykorzystaniem specjalistycznej aparatury technicznej. Przeprowadzone interdyscyplinarne badania stanowiły podstawę analizy wielokryterialnej, bazującej na zaproponowanym w pracy [14] modelu hybrydowym wyboru funkcji użytkowej w adaptacji przedmiotowego budynku zabytkowego. Ankietowe badania opinii ekspertów były również wykorzystane na etapie oceny wpływu i zależności pomiędzy

parametrami mierzalnymi i trudno mierzalnymi [13]. Wymienione publikacje są przykładem dobrej współpracy naukowej o charakterze użytkowym, gdzie do rozwiązania postawionego problemu badawczego niezbędne jest komplementarne zastosowanie różnych metod, w tym również ankietowych.

16.4. KLASYFIKACJA BADAŃ ANKIETOWYCH W INŻYNIERII PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH

Rola badań ankietowych, jaką mają do spełnienia w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, sprowadza się przede wszystkim do funkcji związanej z dostarczaniem informacji. Polega ona na zbieraniu, przetwarzaniu i przekazywaniu informacji w celu wspomagania procesu podejmowania decyzji. Na podstawie analizy literatury oraz własnego doświadczenia badawczego autorka określiła możliwości zastosowania badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. W niniejszym rozdziale przedstawiono klasyfikację badań ankietowych, a także omówiono możliwości ich zastosowania oraz pełnione funkcje.

Poniżej zaproponowano klasyfikację badań przeprowadzonych z zastosowaniem kwestionariusza ankiety/wywiadu w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Badania można podzielić ze względu na:

1. Rodzaj badanej grupy respondentów:
 - badanie ekspertów, specjalistów w danym temacie,
 - badanie użytkowników, klientów: potencjalnych, byłych i aktualnych,
2. Powtarzalność:
 - badania jednorazowe,
 - badania wielokrotne (powtarzalne),
3. Obszar badań:
 - badania przedsięwzięcia budowlanego,
 - badania przedsiębiorstwa budowlanego i jego otoczenia,
4. Metodę przeprowadzenia:
 - ankieta,
 - wywiad,
5. Źródło pozyskanych informacji:
 - badania opinii respondentów,
 - badania w formie spisu, rejestracji danych o przedsięwzięciu (np. czas trwania realizacji, koszt),
 - ilościowe (liczbowe),
 - jakościowe (opisowe),
6. Wykorzystanie wyników badań:
 - wyniki badania po analizie statystycznej mogą być bezpośrednio wykorzystane do zdiagnozowania problemu i podjęcia decyzji,

- wyniki badań ankietowych są komplementarne, uzupełniające, wykonywane równolegle z badaniami realizowanymi z zastosowaniem specjalistycznej aparatury technicznej (np. w zakresie drgań, wilgotności, szczelności, izolacyjności), i dotyczą np. odczucia komfortu cieplnego przez użytkowników, stanowiąc uzupełnienie badań technicznych,
- wyniki badania (np. oceny parametrów przez ekspertów) są danymi wejściowymi do innej metody badawczej lub modelu matematycznego, np. analizy wielokryterialnej czy bazy danych w systemach eksperckich.

W niniejszym rozdziale autorka używa ogólnego określenia „badania ankietowe”, natomiast wszystkie prezentowane rozważania dotyczą zarówno badań prowa-



Rys. 16.3. Klasyfikacja badań z zastosowaniem kwestionariusza ankiety/wywiadu w inżynierii przedsięwzięć budowlanych

dzonych z zastosowaniem kwestionariusza ankiety, jak i badań prowadzonych w formie rozmowy – wywiadu, z zastosowaniem kwestionariusza wywiadu (rys. 16.3).

W tabeli 16.1 przedstawiono przykładowe zastosowania badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych.

Tabela 16.1

Przykładowe zastosowania badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych

KLASYFIKACJA BADAŃ ANKIETOWYCH	ZASTOSOWANIA BADAŃ ANKIETOWYCH W INŻYNIERII PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH
Ze względu na rodzaj badanej grupy respondentów:	
1. Badanie ekspertów, specjalistów w danym temacie. Możliwość wykorzystania wyników badań: a) bezpośrednio (np. jako dane statystyczne) b) dane wejściowe do innych metod, np. systemów eksperckich (baza reguł), analiz wielokryterialnych (ocena wag i parametrów) 2. Badanie użytkowników, klientów: potencjalnych, byłych i aktualnych	1a) Rozpoznanie i diagnoza problemu badawczego, naukowego i praktycznego 1b) Ekspercka ocena trudno mierzalnych parametrów i wspomaganie podejmowania decyzji, zastosowanie przede wszystkim w nauce 2. Wspomaganie decyzji rynkowych przedsiębiorców budowlanych (inwestorów, wykonawców)
Ze względu na powtarzalność badań:	
1. Badania jednorazowe 2. Badania wielokrotne (powtarzalne)	1. Wspomaganie podejmowania bieżących decyzji 2. Monitorowanie zmian na rynku, ich przyczyn i skutków
Ze względu na obszar badań:	
1. Badania przedsięwzięcia budowlanego 2. Badania przedsiębiorstwa budowlanego	1. Wspomaganie zarządzania przedsięwzięciem budowlanym 2. Wspomaganie zarządzania i marketingu w przedsiębiorstwie budowlanym

16.5. WERYFIKACJA BADAŃ ANKIETOWYCH

16.5.1. WERYFIKACJA JAKOŚCI POMIARU

Projektując i realizując badania ankietowe, należy przeprowadzić weryfikację projektu badań, a następnie jakości pomiaru.

Weryfikację projektu badań, a zwłaszcza zaproponowanych w nim metod i narzędzi, można przeprowadzić np. na podstawie podobnych zasad, jakie stosuje się przy weryfikacji modeli naukowych, omówionych m.in. w pozycji [7].

Weryfikacja logiczna polega na sprawdzeniu, czy przyjęte metody badawcze i narzędzia pomiarowe są logicznie spójne i odpowiednie, zgodne z celem badania, czy ich użycie jest prawidłowe i zgodne z teorią pomiaru. Ważne jest przedstawienie uzasadnienia potrzeby i celu zastosowania poszczególnych metod i narzędzi badawczych, jak również sprawdzenie i uzasadnienie ich spójności, a także odwołanie się do doświadczeń i praktyki badawczej w zakresie rozwiązywania podobnych problemów badawczych. Weryfikacja operacyjna polega na przetestowaniu narzędzia badawczego w rzeczywistych warunkach. Weryfikacja konceptualna polega na sprawdzeniu, czy stosowane w kwestionariuszu pojęcia są zrozumiałe dla respondenta. Dzieje się to najczęściej na etapie przeprowadzania badań pilotażowych. Jeżeli zastosowane zwroty, pojęcia, pytania były zrozumiałe i logicznie spójne dla uczestników badania pilotażowego, uznaje się, że weryfikacja konceptualna narzędzia badawczego przebiegła pozytywnie. W przypadku przeprowadzonych już badań właściwych niezbędna jest weryfikacja eksperymentalna uzyskanych wyników badań, rozwiązanie problemu ewentualnych braków danych w kwestionariuszach oraz analiza dotycząca oceny wiarygodności uzyskanych wyników badań, co np. w sytuacji badania ekspertów określa się jako ocenę zgodności opinii ekspertów. W skrajnych przypadkach, jeżeli sytuacja tego wymaga, możliwe jest wprowadzenie zmian, przeprowadzenie badań uzupełniających lub powtórnych.

Pomiar w badaniach kwestionariuszowych powinien być precyzyjny i poprawny. Badacze, oceniając pomiary, powinni zwrócić szczególną uwagę na dwa aspekty techniczne, stanowiące kryteria jakości pomiaru, a mianowicie: rzetelność i trafność.

„**Rzetelność** polega na tym, że dana technika, stosowana do tego samego przedmiotu, daje za każdym razem ten sam wynik” [5]. „Operacyjnie definiuje się rzetelność jako powtarzalność wyników” [20]. Pomiar powtarzany kilkakrotnie powinien dać za każdym razem takie same (lub zbliżone) wyniki; wówczas mówimy, że pomiar jest rzetelny. Najprostszym sposobem oceny rzetelności pomiaru jest tzw. powtórzony pomiar, „a więc zadanie respondentom, w trakcie wywiadu kontrolnego, wybranych pytań z wywiadu zasadniczego. Porównując odpowiedzi tych samych respondentów na te same pytania uzyskane w dwóch różnych sytuacjach (wywiad zasadniczy i wywiad kontrolny), można określić szacunkową rzetelność pomiaru, a więc jego ewentualny błąd” [54].

Trafność pomiaru odnosi się do kwestii, czy dany miernik adekwatnie odzwierciedla znaczenie danego pojęcia. Trafność pomiaru oznacza, że mierzymy dokładnie to pojęcie (problem, zmienną), które chcemy zmierzyć, a narzędzie jest dobrze dobrane.

Podsumowując, „rzetelność oznacza otrzymywanie spójnych wyników za pomocą tego samego miernika, trafność zaś oznacza uzyskiwanie wyników, które są adekwatnym odbiciem mierzonego pojęcia” [5].

Błąd można popełnić na każdym etapie badawczym, począwszy od projektowania, przez realizację badań, aż po analizę danych i raport końcowy. Z tego wzglę-

du w pozycji [40] podano podstawowe wskazówki, jak prawidłowo układać pytania kwestionariusza i zaprojektować badanie, żeby nie popełniać błędów. Ponadto, w przypadku badań przeprowadzanych na próbie, a nie na całej populacji, niezwykle ważną kwestią jest właściwe określenie liczebności próby przed przystąpieniem do badań.

Istotną kwestią dla badacza z punktu widzenia jakości badań ankietowych jest postępowanie w przypadku braku danych. Aby zredukować zniekształcenia wyników badania, spowodowane niekompletnością bazy danych, opracowano algorytmy naprawcze, nazwane metodami analizy danych niepełnych (*missing data analysis*). Przykłady analizy wyników badań metodami danych niepełnych przedstawiono np. w pozycji [50].

16.5.2. WERYFIKACJA ZGODNOŚCI OCEN EKSPERTÓW

Możemy formułować sądy ogólne na podstawie ocen ekspertów, jedynie gdy są one spójne (zgodność ocen jest na odpowiednio wysokim poziomie). Zgodnie z koherencyjną koncepcją prawdy, którą sformułował Francis Herbert Bradley w 1914 roku, „prawdziwe jest to, co jest wewnętrznie spójne”. Najczęściej do oceny zgodności ocen ekspertów (np. w celu weryfikacji zgodności preferencji ekspertów) stosuje się w praktyce badawczej metody analizy korelacji rang.

Ocenę wiarygodności przeprowadzonych badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, w zakresie czynników wpływających na decyzje polskich wykonawców o przystąpieniu do przetargu, zaprezentowano w publikacji [26], a przykłady oceny wiarygodności opinii ekspertów w [51, s. 171–177). Czynniki, które mogą wpłynąć na czas realizacji procesów budowlanych, analizowali na podstawie badań opinii ekspertów [21], stosując w celu określenia stopnia zgodności opinii współczynnik konkordancji W Kendalla. Ten sam współczynnik zastosowano w rozprawie doktorskiej [35] do oceny zgodności opinii ekspertów w zakresie ustalenia wag kategorii i podkategorii, opisujących aspekt socjalny obiektów mieszkalnych. Weryfikację zgodności eksperckich ocen wag parametrów relacji partnerskich i relacji partnerskich zarządzającego przedsięwzięciem z pozostałymi uczestnikami z wykorzystaniem współczynnika konkordancji W Kendalla przeprowadzono również w innej pracy doktorskiej [53].

Więcej na temat metod badawczych, klasyfikacji, weryfikacji badań ankietowych, wraz z przykładami praktycznymi, zawarto w publikacji [40].

16.6. PODSUMOWANIE

Przedstawione problemy badawcze, które były rozwiązywane z zastosowaniem metod opartych na kwestionariuszu ankiety lub wywiadu, są różnorodne i dotyczą m.in. kwestii: modelowania informacji o budynku (BIM), identyfikacji czynników niekorzystnych, ryzyka, oceny stanu technicznego budynku, oceny komfortu, satysfakcji, aspektu społecznego budownictwa, konfliktów i sporów, współpracy i zaufania, zarządzania, czynników sukcesu, odpadów, technologii, zielonego budownictwa, zrównoważonego rozwoju, bezpieczeństwa i kosztów.

Podsumowując opracowany przegląd problemów badawczych, analizowanych za pomocą badań ankietowych, należy stwierdzić, że metody te są uznane przez naukowców na całym świecie i stosowane praktycznie we wszystkich obszarach tematycznych z zakresu inżynierii przedsięwzięć budowlanych.

Badania te dostarczają wartościowych danych, które następnie są poddane analizie, przede wszystkim statystycznej, a ostatecznie wyniki tej analizy oraz wypływające z nich wnioski i zalecenia wspomagają decydenta w podejmowaniu decyzji w budownictwie.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano również możliwości zastosowania i wykorzystania wyników badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Autorka przedstawiła rezultaty wieloletnich studiów i analiz własnych, związanych z możliwościami wdrażania metod ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, a także podejścia metodyczno-analitycznego, charakterystycznego dla badania zjawisk oraz procesów społecznych, a rzadziej wykorzystywanego w naukach technicznych. Metody te są właściwe i przydatne również w inżynierii przedsięwzięć budowlanych.

Metody badań ankietowych są źródłem wartościowych danych, samodzielnie lub w połączeniu z innymi metodami dostarczają informacji, które są następnie analizowane przez badacza, a wyciągnięte na ich podstawie wnioski oraz wynik końcowy analizy jest wykorzystywany w zakresie diagnozowania i prognozowania zjawisk i problemów, a także sterowania procesami. Przede wszystkim jednak wspomaga decydenta w trudnym procesie podejmowania decyzji.

Autorka przeanalizowała i opisała możliwości zastosowania badań ankietowych w nauce i praktyce inżynierii przedsięwzięć budowlanych.

Autorka ma nadzieję, że niniejszą pracą przyczyni się do jeszcze większego rozpropagowania badań ankietowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Są to z całą pewnością metody i narzędzia wartościowe i przydatne, jednak wymagające wiedzy i doświadczenia badawczego w ich stosowaniu, jak również dbałości o zapewnienie wysokiej jakości pomiaru przez proces weryfikacji.

Projektując i realizując badania ankietowe, należy sprawdzić poprawność projektu badań oraz jakość pomiaru (rzetelność i trafność). W kierunkach dalszych

badan należy wskazać rozwijanie metod weryfikacji rzetelności pomiaru, adekwatnie do najczęściej pojawiających się grup problemów badawczych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Istnieje również potrzeba opracowania propozycji zestawów pytań kwestionariuszowych, odpowiadających najczęstszym problemom badawczym w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Należy odpowiedzieć ponadto na potrzebę szerszego przedstawienia metod analizy matematycznej wyników badań ankietowych, zebranych danych, które następnie wykorzystywane są w dalszych etapach procesu badawczego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abarca-Guerrero L., Grettel Leandro-Hernandez A. (2016), *Actual situation of construction materials management in Costa Rica*, *Tecnologia En Marcha*, 29(4), 111–122.
- [2] Afolabi A.O., Oluwatayo A., Oyeyipo O., Ojelabi R., Fagbenie O. (2018), *Assessment of Designers' Perception of Post Conflict Housing Schemes for Internally Displaced Persons*, *Construction Economics and Building*, 18(1), 27–47.
- [3] Amarasekara W.D.L., Perera B.A.K.S., Rodrigo M.N.N. (2018), *Impact of Differing Site Conditions on Construction Projects*, *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 10(3), UNSP 04518006.
- [4] Asante J., Kissi E., Badu E. (2018), *Factorial analysis of capacity-building needs of small- and medium-scale building contractors in developing countries: Ghana as a case study*, *Benchmarking – an International Journal*, 25(1), 357–372.
- [5] Babbie E. (2007), *Badania społeczne w praktyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [6] Bamgbade J.A., Nawi M.N.M., Kamaruddeen A.M. (2017), *Construction Firms' Sustainability Compliance Level*, *Journal of Engineering Science and Technology*, 12, 126–136.
- [7] Bouyssou D., Marchant T., Pirlot M., Tsoukiàs A., Vincke P. (2006), *Evaluation and decision models with multiple criteria: Stepping stones for the analyst*, Springer, Boston.
- [8] Chan A.P.C., Darko A., Olanipekun A.O., Effah E.A. (2018), *Critical barriers to green building technologies adoption in developing countries: The case of Ghana*, *Journal of Cleaner Production*, 172, 1067–1079.
- [9] Darko A., Chan A.P.C. (2018), *Strategies to promote green building technologies adoption in developing countries: The case of Ghana*, *Building and Environment*, 130, 74–84.

- [10] Enshassi A., Al Ghouli H., Alkilani S. (2018), *Exploring sustainable factors during construction projects' life cycle phases*, Revista Ingenieria de Construccion, 33(1), 51–68.
- [11] Fedorczyk-Cisak M., Kotowicz A., Radziszewska-Zielina E., Sroka B., Tatara T., Barnaś K. (2020), *Multi-criteria Optimisation of the Urban Layout of an Experimental Complex of Single-family NZEBs*, Energies, 13, 1541.
- [12] Fedorczyk-Cisak M., Kowalska-Koczwara A., Nering K., Pachla F., Radziszewska-Zielina E., Śladowski G., Tatara T., Ziarko B. (2019), *Evaluation of the criteria for selecting proposed variants of utility functions in the adaptation of historic regional architecture*, Sustainability, 11(4), 1094.
- [13] Fedorczyk-Cisak M., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Radziszewska-Zielina E., Szewczyk B., Śladowski G., Tatara T. (2020), *Fuzzy Model for Selecting a Form of Use Alternative for a Historic Building to be Subjected to Adaptive Reuse*, Energies, 13(11), 2809.
- [14] Fedorczyk-Cisak M., Kowalska-Koczwara A., Radziszewska-Zielina E., Śladowski G., Pachla F., Tatara T. (2019), *A multi-criteria approach for selecting the utility function of the historical building "Stara Polana" located in Zakopane*, Krynica 2018, MATEC Web of Conferences, 262, 07002.
- [15] Gurmu A.T., Aibinu A.A. (2018), *Survey of management practices enhancing labor productivity in multi-storey building construction project*, International Journal of Productivity and Performance Management, 6(4), 717–735.
- [16] Husain A.H., Razali M.N., Eni S. (2018), *Stakeholders' expectations on building information modelling (BIM) concept in Malaysia*, Engineering Construction and Architectural Management, 25(6), 758–779.
- [17] Hwang B., Zhao X., Chin E.W.Y. (2017), *International construction joint ventures between Singapore and developing countries Risk assessment and allocation preferences*, Engineering Construction and Architectural Management, 24(2), 209–228.
- [18] Issa R.R.A., Olbina S., Zuppa D. (2018), *Model for developing trust on US construction projects*, Built Environment Project and Asset Management, 8(1), 5–23.
- [19] Ivanova Z., Smetanina T. (2016), *Research into Behaviour Patterns Typical for Consumers of Construction Material as the Mission of Ecological Management*, 15th International Conference on Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology (TPACEE), MATEC Web of Conferences, 73, 07024.
- [20] Jankowski K.S. (2009), *Metody szacowania rzetelności pomiaru testem*, [w:] Fronczyk K. (red.), *Psychometria – podstawowe zagadnienia*, <http://www.academia.edu/9480939>.
- [21] Jaśkowski P., Biruk S. (2010), *Analiza czynników ryzyka czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych*, Czasopismo Techniczne, 1-B, 157–166.

- [22] Jaśkowski P., Biruk S., Bucoń R. (2010), *Assessing contractor selection criteria weights with fuzzy AHP method application in group decision environment*, Automation in Construction, 19(2), 120–126.
- [23] Kania E., Radziszewska-Zielina E., Śladowski G. (2020), *Communication and Information Flow in Polish Construction Projects*, Sustainability, 12(21), 9182.
- [24] Kania E., Śladowski G., Radziszewska-Zielina E., Sroka B., Szewczyk B. (2021), *Planning and monitoring communication between construction project participants*, Archives of Civil Engineering, 2, 455–473.
- [25] Kozłowska M., Mackova D., Spisalcova M. (2016), *Survey of Construction Management Documentation Usage in Planning and Construction of Building Project*, World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016 (WMCAUS 2016), Procedia Engineering, 161, 711–715.
- [26] Leśniak A. (2016), *Modelowanie decyzji wykonawcy o udziale w przetargu na roboty budowlane*, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [27] Mehany M.S., Hashem M., Bashettiyavar G., Esmaceli B., Gad G. (2018), *Claims and Project Performance between Traditional and Alternative Project Delivery Methods*, Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, 10(3), UNSP 04518006.
- [28] Mohammad M.Z., Hadikusumo B.H.W. (2017), *A model of integrated multilevel safety intervention practices in Malaysian construction industry*, 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials – Sustainable Structures for Future Generations (SCESCM), Procedia Engineering, 171, 396–404.
- [29] Nematchoua M.K., Ricciardi P., Buratti C. (2018), *Adaptive approach of thermal comfort and correlation between experimental data and mathematical model in some schools and traditional buildings of Madagascar under natural ventilation*, Sustainable Cities and Society, 41, 666–678.
- [30] Nomani M., Daneshpour A. (2016), *Promotion of the skeletal design of building complexes quality of social interactions through*, IIOAB Journal, 7(3), 177–181.
- [31] Nowogońska B. (2020), *A Methodology for Determining the Rehabilitation Needs of Buildings*, Applied Sciences, 10(11), 3873.
- [32] Ostańska A. (2018), *Programowanie rewitalizacji osiedli mieszkaniowych z zastosowaniem modelu PEARS*, KILiW PAN, Lublin.
- [33] Ozorhon B., Karahan U. (2017), *Critical Success Factors of Building Information Modeling Implementation*, Journal of Management in Engineering, 33(3), 04016054.
- [34] Piasecki M., Radziszewska-Zielina E., Czerski P., Fedorczyk-Cisak M., Zielina M., Krzyściak P., Kwaśniewska-Sip P., Grześkowiak W. (2020), *Implementation of the Indoor Environmental Quality (IEQ) Model for the Assessment of a Retrofitted Historical Masonry Building*, Energies, 13(22), 6051.

- [35] Radziejowska A. (2018), *Metoda oceny socjalnych właściwości użytkowych obiektów mieszkalnych w aspekcie zrównoważonego budownictwa*, rozprawa doktorska, AGH, Kraków.
- [36] Radziejowska A. (2021), *The assessment of the social performance of residential buildings*, Archives of Civil Engineering, 3, 543–564.
- [37] Radziszewska-Zielina E. (2010), *Analysis of the partnering relations of Polish, Slovak and Ukrainian construction enterprises*, Technological and Economic Development of Economy, 16(3), 432–454.
- [38] Radziszewska-Zielina E. (2011), *Assessment methods of partnering relations of Polish, Slovak and Ukrainian construction enterprises with the use of fuzzy logic*, Archives of Civil Engineering, 67(1), 87–118.
- [39] Radziszewska-Zielina E. (2016), *The Application of Multi-Criteria Analysis in the Evaluation of Partnering Relations and the Selection of a Construction Company for the Purposes of Cooperation*, Archives of Civil Engineering, 62(2), 167–182.
- [40] Radziszewska-Zielina E. (2019), *Zastosowania badań kwestionariuszowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych*, KILiW PAN, Warszawa–Kraków.
- [41] Radziszewska-Zielina E. (2020), *Survey studies in construction project engineering*, WMCAUS, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 960, 042035.
- [42] Radziszewska-Zielina E., Czerski P., Grześkowiak W., Kwaśniewska-Sip P. (2020), *Comfort of Use Assessment in Buildings with Interior Wall Insulation based on Silicate and Lime System in the Context of the Elimination of Mould Growth*, Archives of Civil Engineering, 66(2), 89–104.
- [43] Radziszewska-Zielina E., Grabowska W., Szewczyk B. (2019), *Market Research Concerning Functional and Material Solutions Employed in Nursery Facilities*, Archives of Civil Engineering, 65(1), 197–212.
- [44] Radziszewska-Zielina E., Kania E. (2017), *Problems in Carrying Out Construction Projects in Large Urban Agglomerations on the Example of the Construction of the Axis and High5ive Office Buildings in Krakow*, MATEC Web of Conferences, 117, 00144.
- [45] Radziszewska-Zielina E., Kania E., Śladowski G. (2018), *Problems of the selection of construction technology for structures in the centres of urban agglomerations*, Archives of Civil Engineering, 64(1), 55–71.
- [46] Radziszewska-Zielina E., Rumin R. (2016), *Analysis of investment profitability in renewable energy sources as exemplified by a semi-detached house*, International Conference on the Sustainable Energy and Environment Development, SEED 2016, E3S Web of Conferences, 10, 00079.
- [47] Radziszewska-Zielina E., Śladowski G., Kania E., Sroka B., Szewczyk B. (2019), *Managing information flow in self-organising networks of communication*

- between construction project participants*, Archives of Civil Engineering, 65(2), 133–148.
- [48] Radziszewska-Zielina E., Szewczyk B. (2015), *Controlling partnering relations in construction operations using fuzzy reasoning*, Archives of Civil Engineering, 61(3), 89–104.
 - [49] Rogers J., Chong H., Preece C. (2015), *Adoption of Building Information Modelling technology (BIM) Perspectives from Malaysian engineering consulting services firms*, Engineering Construction and Architectural Management, 22(4), 424–445.
 - [50] Rószkiewicz M., Perek-Białas J., Węziak-Białowolska D., Zięba-Pietrzak A. (2013), *Projektowanie badań społeczno-ekonomicznych. Rekomendacje i praktyka badawcza*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
 - [51] Sobotka A., Radziszewska-Zielina E. (red.) (2018), *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych. Problemy, modele, metody*, KILiW PAN, Warszawa–Kraków.
 - [52] Sobotka A., Radziszewska-Zielina E., Plebankiewicz E., Zima K., Kowalik M. (2014), *Realization of earthworks in the opinion of building contractors [Realizacja robót ziemnych w opinii wykonawców budowlanych]*, Scientific Review Engineering and Environmental Sciences, 23(1), 3–13.
 - [53] Szewczyk B. (2018), *System sterowania i oceny relacji partnerskich w przedsięwzięciach budowlanych*, rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków.
 - [54] Sztabiński P.B., Sawiński Z., Sztabiński F. (red.) (2005), *Fieldwork jest sztuką*, Wydawnictwo IFiS, Warszawa.
 - [55] Śladowski G., Radziszewska-Zielina E., Kania E. (2019), *Analysis of self-organising networks of communication between the participants of a housing complex construction project*, Archives of Civil Engineering, 65(1), 181–195.
 - [56] Terwel K.C., Jansen S.J.T. (2015), *Critical Factors for Structural Safety in the Design and Construction Phase*, Journal of Performance of Constructed Facilities, 29(3), 04014068.
 - [57] Tomczak M., Jaśkowski P. (2018), *Application of type-2 interval fuzzy sets to contractor qualification process*, KSCE Journal of Civil Engineering, 22(8), 2702–2713.
 - [58] Tran D.Q., Long D.N., Faught A. (2017), *Examination of communication processes in design-build project delivery in building construction*, Engineering Construction and Architectural Management, 24(6), 1319–1336.
 - [59] Tripathi K.K., Jha K.N. (2018), *Application of fuzzy preference relation for evaluating success factors of construction organisations*, Engineering Construction and Architectural Management, 25(6), 758–779.
 - [60] Ullah K., Khan M.S., Lakhari M.T., Vighio A.A., Samiullah S., (2018), *Ranking of effects of construction delay: evidence from Malaysian building projects*, Journal of Applied Engineering Sciences, 8(1), 79–84.

- [61] Varras G., Chiotelli K., Fragaki V., Karras G., Tsantopoulos G. (2016), *Potentials and prospects for the expansion of green areas on buildings in the metropolitan area of Athens*, Conference: V International Conference on Landscape and Urban Horticulture and International Symposium on Sustainable Management in The Urban Forest, Acta Horticulturae, 1108, 331–337.
- [62] Wang J., Li Z., Tam V.W.Y. (2014), *Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: A Shenzhen case study, China*, Resources Conservation and Recycling, 82, 1–7.
- [63] Yildizel S.A., Dogan E., Kaplan G., Ergut A. (2016), *Major Constructional Dispute Causes in Turkey*, Archives of Civil Engineering, 62(4), 193–202.
- [64] Zhan D., Kwan M., Zhang W., Fan J., Yu J., Dang. Y. (2018), *Assessment and determinants of satisfaction with urban livability in China*, Cities, 79, 92–101.
- [65] Zulch B. (2016), *A proposed model for construction project management communication in the South African construction industry*, Acta Structilia, 23(1), 1–35.

POPRIEDNIO WYDANE TOMY W SERII:

STUDIA Z ZAKRESU BUDOWNICTWA

- [1] Łempicki Jerzy, *Teoria zginania belek żelbetowych statycznie niewyznaczalnych*, PWN, Warszawa 1958, s. 115.
- [2] Kacner Artur, Lewicki Bohdan, *Praca budynków z elementów wielkowymiarowych pod działaniem sił poziomych parcia wiatru*, PWN, Warszawa 1959, s. 110.
- [3] Lewicki Bohdan, *Nośność konstrukcji w przypadku technicznego obciążenia osiowego*, PWN, Warszawa 1960, s. 113.
- [4] Skalmowski Włodzimierz, *Gipsy i anhydryty w Polsce. Możliwości i kierunki ich zastosowań w budownictwie*, PWN Warszawa 1969, s. 87.
- [5] Lewicki Bohdan, Kukulski Wojciech, Pawlikowski Jan, *Ściany i słupy z betonu i muru obciążone mimośrodowo*, PWN, Warszawa 1962, s. 129.
- [6] Brandt Andrzej M., *Odształcalność betonu w świetle pomiarów sześciu składowych stanu odkształcenia*, Arkady, Warszawa 1968, s. 120.
- [7] Ostoja-Pętkowski Jan, *Wpływ konstrukcji budynków mieszkalnych na architekturę ich elewacji*, Arkady Warszawa 1970, s. 68.
- [8] Kukulski Wojciech, *Nośność smukłych ściskanych elementów betonowych*, Arkady, Warszawa 1970, s. 116, rys. 65.

STUDIA Z ZAKRESU INŻYNIERII

- [9] *Mechanizacja budowy mostów* (praca zbiorowa), WKiŁ Warszawa 1971, s. 572.
- [10] Mianowski Krzysztof M., *Zagadnienie siły poprzecznej w belkach strunobetonowych*, PWN, Warszawa 1971, s. 124.
- [11] Kasperkiewicz Janusz, *Dyfuzja wilgoci i deformacje skurczowe w betonie*, PWN, Warszawa 1972, s. 129.
- [12] *Zagadnienia inżynierii komunikacyjnej* (praca zbiorowa), PWN, Warszawa 1973, s. 192.
- [13] Jendrzejek Stefan, Weseli Jerzy, *Zagadnienia analizy dynamicznej belkowych i płytowych mostów drogowych*, PWN, Warszawa, s. 118.
- [14] Absi Elie, Brandt Andrzej M., *Analiza i badania płyt żelbetowych w stanie zarysowania*, PWN, Warszawa 1974, s. 128.
- [15] MURZEWSKI Janusz, *Teoria nośności losowej konstrukcji prętowych*, PWN, Warszawa 1976, s. 114.
- [16] *Nowoczesne metody projektowania dróg komunikacyjnych* (praca zbiorowa), PWN, Warszawa 1977, s. 138.
- [17] Drewnowski Sławomir, *Betonowe konstrukcje mostowe sprężono-rozprężne*, PWN, Warszawa–Łódź 1978, s. 80.

- [18] Radomski Wojciech, *Badania betonu pod obciążeniami uderzeniowymi*, PWN, Warszawa–Łódź 1978, s. 135.
- [19] *Matematyczne modelowanie ujęć wody podziemnej* (praca zbiorowa), PWN, Warszawa–Łódź 1980, s. 251.
- [20] Patas Piotr, *Własności betonu w złożonych stanach naprężenia*, PWN, Warszawa–Łódź 1981, s. 61.
- [21] Biliszczuk Jan, *Reologiczna redystrybucja stanu naprężenia w niejednorodnych, izostacyjnych konstrukcjach betonowych*, PWN, Warszawa–Łódź 1982, s. 150.
- [22] Baryła Adam, Sobocińska Elżbieta, *Teoria płyt żelbetowych z rysami*, PWN, Warszawa–Łódź 1983, s. 110.
- [23] Mazurkiewicz Bolesław K., *Mechanika gruntów dna morskiego*, PWN, Warszawa–Łódź 1985, s. 148.
- [24] Giżejowski Marian, *Nośność sprężysto-plastycznych belek ciągłych o przekrojach otwartych*, PWN, Warszawa–Łódź 1986, s. 159.
- [25] *Zastosowanie probabilistyki w nowoczesnych normach konstrukcji i obciążeń* (praca zbiorowa), PWN, Warszawa–Łódź 1987, s. 128.
- [26] *Badania doświadczalne żelbetowych ustrojów płytowo-słupowych* (praca zbiorowa pod red. Włodzimierza Starosolskiego), PWN, Warszawa–Łódź 1988, s. 129.
- [27] Bruggeling A.S.G., *A new approach to concrete structures classification and design*, PWN, Warszawa–Łódź 1989, s. 102.
- [28] *Struktura a własności betonu i kompozytów betonopodobnych. Stan wiedzy w Polsce* (praca zbiorowa pod red. Janusza Kasperkiewicza), PWN, Warszawa–Łódź 1989, s. 104.
- [29] Lewiński Paweł Marek, *Nieliniowa analiza płyt i tarcz żelbetowych metodą elementów skończonych*, PWN, Warszawa–Łódź 1990, s. 126.
- [30] Bąk Grzegorz, Stolarski Adam, *Analiza nieliniowa prętowych ustrojów żelbetowych obciążonych impulsowo*, Warszawa 1990, s. 137.
- [31] *Stan krajowych prac badawczych z zakresu technologii betonu* (praca zbiorowa pod red. Stanisława Bastiana), Warszawa 1991, s. 85.
- [32] Owczarek Stefan, *Optymalizacja kształtu budynków energooszczędnych o podstawie wieloboku*, Warszawa 1992, s. 132.
- [33] Pieńkowski Kazimierz, Stempniak Andrzej, *Wykorzystanie akumulacyjności cieplnej budynku w pracy instalacji centralnego ogrzewania*, Warszawa 1992, s. 78, rys. 30.
- [34] Laskowski Leszek, *Systemy biernego ogrzewania słonecznego. Zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej*, Warszawa 1993, s. 126, rys. 35.
- [35] Zawada Bernard A., *Analiza procesu użytkowania energii cieplnej w eksploatacji obiektów przemysłowych*, Warszawa 1993, s. 126, rys. 61.
- [36] Czkwanianc Artem, Kamińska Maria, *Metoda nieliniowej analizy żelbetonowych elementów prętowych*, Warszawa 1993, s. 128.
- [37] Chwieduk Dorota, *Słoneczne i gruntowe systemy grzewcze. Zagadnienia stymulacji funkcjonowania i wydajności cieplnej*, Warszawa 1994, s. 144.

- [38] *Metody optymalizacji materiałów kompozytowych o matrycach cementowych* (praca zbiorowa pod red. A.M. Brandta), Warszawa 1994, s. 270.
- [39] Leszczyńska-Sydor Małgorzata, *Dynamiczna izolacja cieplna przegród budowlanych*, Warszawa 1994, s. 77.
- [40] Gryczmański Maciej, *Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów*, Warszawa 1995, s. 157.
- [41] Chmielnicki Witold Józef, *Sterowanie mocą w budynkach zasilanych z centralnych źródeł ciepła*, Warszawa 1996, s. 168.
- [42] Błazik-Borowa Ewa, Flaga Andrzej, Kazakiewicz Michał I., *Problemy interferencji aerodynamicznej dwóch walców kołowych*, Warszawa 1997, s. 100.
- [43] Kapliński Oleg, *Modelling of construction processes. A managerial approach*, Warszawa 1997, s. 176.
- [44] Wyrwał Jerzy, Świrski Jadwiga, *Problemy zawilgocenia przegród budowlanych*, Warszawa 1998, s. 108.
- [45] Kossecka Elżbieta, *Wybrane zagadnienia dynamiki cieplnej ścian budynków*, Warszawa 1998, s. 120.
- [46] *Optymalizacja wielokryterialna budynków energooszczędnych* (praca zbiorowa pod redakcją W. Marksa i S. Owczarka), Warszawa 1999, s. 191.
- [47] Grzeszczyk Stefania, *Reologia zawieszin cementowych*, Warszawa 1999, s. 108.
- [48] Bołtryk Michał, *Rola wibracji w kształtowaniu właściwości cementowych ośrodków dyspersyjnych*, Warszawa-Białystok 1999, s. 150.
- [49] Marks Maria, *Analiza i optymalizacja kompozytów uzbrojonych dwiema rodzinami włókien*, Warszawa 2000, s. 115.
- [50] Roźniakowski Kazimierz, *Zastosowanie promieniowania laserowego w badaniach i modyfikacji właściwości materiałów budowlanych. Wybrane zagadnienia*, Warszawa-Łódź 2001, s. 198.
- [51] Stolarski Adam, Cichorski Waldemar, *Modelowanie statycznego i dynamicznego zachowania niesprężystych tarcz żelbetowych*, Warszawa 2002, s. 210.
- [52] Marynowicz Andrzej, Wyrwał Jerzy, *Badanie właściwości wilgotnościowych wybranych materiałów budowlanych w warunkach izotermicznych*, Warszawa 2005, s. 96.
- [53] Szczuraszek Tomasz (red.), *Badanie zagrożeń w ruchu drogowym*, Warszawa 2005, s. 120.
- [54] Jędrzejuk Hanna, *Optymalizacja osiedli mieszkaniowych*, Warszawa 2006, s. 220.
- [55] Miedziałowski Czesław, Malesza Mikołaj, *Budynki o szkieletcie drewnianym z poszyciem*, Warszawa-Białystok 2006, s. 320.
- [56] Pieńkowski Cezary A., *Centralne ogrzewanie i komplikacje związane z rozliczaniem kosztów*, Warszawa-Białystok 2006, s. 90.
- [57] *Metody i modele badań w inżynierii przedsięwzięć budowlanych* (praca zbiorowa pod red. Olega Kaplińskiego), Warszawa 2007, s. 415.

- [58] Paleczek Witold, *Metoda określania wielkości i zasięgu deformacji powierzchni terenu powodowanych podziemną eksploatacją złóż z uwzględnieniem własności geomechanicznych skał górotworu*, Warszawa 2007, s. 166.
- [59] Kwietniewski Marian, *GIS in water supply and wastewater systems*, Warszawa 2008, s. 242.
- [60] Jaworski Jan, *Termografia budynków w otaczającym środowisku. Obrazy termalne budynków w ocenie ich sprawności cieplnej*, Warszawa 2008, s. 178.
- [61] Siwoń Zbigniew, Łomotowski Janusz, Cieżak Wojciech, Licznar Paweł, Cieżak Jan, *Analizy i prognozowanie rozbiórów wody w systemach wodociągowych*, Warszawa 2008, s. 120.
- [62] Szczuraszek Tomasz, *Prędkość pojazdów w warunkach drogowego ruchu swobodnego*, Warszawa 2008, s. 168.
- [63] Biliński Tadeusz, Średniawa Wojciech, Furtak Kazimierz, Cholewicki Andrzej, Szulc Jarosław, Roehrych Paweł, *Konstrukcje zespolone*, Warszawa 2008, s. 98.
- [64] Sulewska Maria, *Sztuczne sieci neuronowe w modelowaniu zagadnień oceny zagęszczenia gruntów niespoistych*, Warszawa–Białystok 2009, s. 164.
- [65] Perkowski Zbigniew, *Modelowanie mikrouszkodzeń w kruchych materiałach budowlanych z uwzględnieniem zjawisk powierzchniowych*, Warszawa 2009, s. 152.
- [66] Kledyński Zbigniew, Rafalski Leszek, *Zawiesiny twardniejące*, Warszawa 2009, s. 254.
- [67] Kwietniewski Marian, Rak Janusz, *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*, Warszawa 2010, s. 134.
- [68] Kotowski Andrzej, Kaźmierczak Bartosz, Dancewicz Andrzej, *Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji*, Warszawa 2010, s. 170.
- [69] Gawin Dariusz, *Procesy degradacji mikrostruktury kompozytów cementowych w wysokiej temperaturze*, Warszawa 2010, s. 232.
- [70] Szelka Janusz, *Konstrukcje składane w mostownictwie*, Warszawa 2010, s. 128.
- [71] Pieńkowski Cezary, *Regulacja rozliczania kosztów ogrzewania w budynkach wielorodzinnych*, Warszawa–Białystok 2010, s. 100.
- [72] Brandt Andrzej M., *Zastosowanie popiołów lotnych z kotłów fluidalnych w betonach konstrukcyjnych*, Warszawa 2010, s. 300.
- [73] Heim Dariusz, *Modyfikacja termooptycznych właściwości transparentnych elementów obudowy budynków*, Warszawa 2011, s. 228.
- [74] Walerian Elżbieta, *To live in better environment*, Warszawa 2011, s. 200.
- [75] Klemm Katarzyna, *Kompleksowa ocena warunków mikroklimatu w luźnych i zwartych strukturach urbanistycznych*, Warszawa 2011, s. 172.
- [76] Łagoda Marek, *Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami polimerowymi*, Warszawa 2012, s. 208.
- [77] Świrska-Perkowska Jadwiga, *Adsorpcja i ruch wilgoci w porowatych materiałach budowlanych w warunkach izotermicznych*, Warszawa 2012, s. 226.
- [78] Krykowski Tomasz, *Modelowanie uszkodzenia otuliny wywołanego korozją zbrojenia w żelbecie*, Warszawa 2012, s. 173.

- [79] Żukowski Mirosław, *Modelowanie zużycia ciepła przez budynek*, Warszawa–Białystok 2012, s. 186.
- [80] Garbańska Halina, *Desorpcyjne badania nieliniowości dyfuzji wilgoci w zakresie higroskopijnym*, Warszawa 2013, s. 187.
- [81] Gilewski Wojciech, *Fizyczne funkcje kształtu w metodzie elementów skończonych*, Warszawa 2013, s. 222.
- [82] Janowska-Renkas Elżbieta, *Budowa superplastyfikatora a efektywność jego wpływu na właściwości zaczynu cementowego*, Warszawa 2013, s. 119.
- [83] Piotrowski Jerzy Zbigniew, *Procesy wymiany ciepła i ruchu powietrza w przegrodach wentylowanych*, Warszawa 2013, s. 158.
- [84] Merkiś Jerzy, Pielecha Jacek, Fuć Paweł, *Badania i analizy zużycia energii i emisji zanieczyszczeń przez pojazdy w sieci drogowej*, Kraków 2013, s. 161.
- [85] *Stan aktualny i kierunki rozwoju nauki w zakresie zaopatrzenia w wodę, usuwania i unieszkodliwiania ścieków i osadów oraz gospodarki odpadami* (praca zbiorowa pod red. Mariana Kwietniewskiego, Jolanty Podedwornej, Marka Sozańskiego), Warszawa 2014, s. 368.
- [86] Tracz Marian, Woźniak Krystian, Buczek Piotr, *Rola obwodnic w poprawie klimatu akustycznego otoczenia przejść drogowych przez miasta*, Kraków 2014, s. 193.
- [87] Nagórski Roman, Błażejowski Krzysztof, Nagórska Magdalena, *Studium właściwości mechanicznych konstrukcji nawierzchni drogowej podatnej z uwzględnieniem trwałości. Zagadnienia wybrane*, Warszawa 2014, s. 141.
- [88] Olszak Piotr, *Cyfrowe metody pomiarowe w zastosowaniu do badań mostów*, Warszawa 2015, s. 175.
- [89] Szelka Janusz, Wrona Zbigniew, *Informatyczne wspomaganie procesów informacyjno-decyzyjnych w budownictwie komunikacyjnym*, Warszawa 2015, s. 139.
- [90] Korentz Jacek, *Metoda analizy żelbetowych elementów prętowych w stanie deformacji pozakrytycznych*, Warszawa 2015, s. 109.
- [91] *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych: rekomendowane metody i techniki* (praca zbiorowa pod red. Tadeusza Kasprowicza), Warszawa 2015.
- [92] *Współczesna mechanika konstrukcji w projektowaniu inżynierskim* (praca zbiorowa pod red. Andrzeja Garsteckiego, Wojciecha Gilewskiego i Zbigniewa Pozorskiego), Warszawa 2015, s. 419.
- [93] Urbaniak Andrzej, *Komputerowe wspomaganie eksploatacji obiektów i procesów w systemach zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków*, Warszawa 2016, s. 195.
- [94] Jemioło Stanisław, *Relacje konstytutywne hipersprężystości*, Warszawa 2016, s. 307.
- [95] Nagrodzka-Goedycka Krystyna, *Betonowe wsporniki sprężone*, Warszawa 2016, s. 228.
- [96] Nowogońska Beata, *Diagnoza w procesie starzenia budynków mieszkalnych wykonanych w technologii tradycyjnej*, Warszawa 2017, s. 152.
- [97] Szajna Waldemar S., *Współdziałanie konstrukcji budowlanych z podłożem. Interpretacja badań gruntu i analizy numeryczne zagadnień geotechniki*, Warszawa 2017, s. 336.

- [98] Pichniarczyk Paweł, *Wpływ wybranych tlenków metali ciężkich na proces wiązania cementu i jego znaczenie w budownictwie*, Kraków 2018, s. 90.
- [99] *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych. Problemy, modele, metody* (praca zbiorowa pod red. Anny Sobotki i Elżbiety Radziszewskiej-Zieliny), Warszawa–Kraków 2018, s. 296.
- [100] Ostańska Anna Ewa, *Programowanie rewitalizacji osiedli mieszkaniowych z zastosowaniem modelu PEARS*, Lublin 2018, s. 176.
- [101] Szafranko Elżbieta, *Wariantowanie inwestycji budowlanych z wykorzystaniem teorii podobieństwa*, Warszawa 2019, s. 162.
- [102] Imiełowski Szymon, *Metody deformacji i energia odkształcenia sprężystego w analizie stateczności konstrukcji inżynierskich*, Warszawa 2019.
- [103] Zimoch Izabela, *Plany bezpieczeństwa wody, ich wdrażanie i weryfikacja*, Warszawa 2019, s. 224.
- [104] Kruszką Leopold, *Analiza eksperymentalna wpływu prędkości odkształcenia i temperatury na zachowanie się stali budowlanych dla potrzeb konstrukcji ochronnych i obronnych*, Warszawa.
- [105] Radziszewskas-Zielina Elżbieta, *Zastosowanie badań kwestionariuszowych w inżynierii przedsięwzięć budowlanych*, Warszawa 2019, s. 192.
- [106] Zabielska-Adamska Katarzyna, *Grunty antropogeniczne. Zagęszczalność i właściwości gruntów zagęszczonych*, Warszawa 2019, s. 202.



ISBN 978-83-67188-97-5
ISBN 978-83-66847-95-8
ISSN 0137-5393