



Michał Tomczak

Metoda wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego



MONOGRAFIE

Metoda wykonania procesów wielkoobektowego
przedsięwzięcia budowlanego

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
ul. Nadbystrzycka 40
20-618 Lublin

Michał Tomczak

Metoda wykonania procesów wielkoobektowego przedsięwzięcia budowlanego



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2021

Recenzenci:

dr hab. inż. Michał Krzemiński, Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. Elżbieta Radziszewska, Politechnika Krakowska

Monografia powstała na podstawie pracy doktorskiej autora napisanej pod kierunkiem dr hab. inż. Piotra Jaśkowskiego, prof. Uczelni, obronionej w 2020 roku na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2021

ISBN: 978-83-7947-441-7

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmiotowicza 1/1
www.djaf.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Streszczenie	7
Abstract.....	9
Definicje wybranych pojęć stosowanych w pracy	11
1. Wstęp	13
2. Przedmiot, cel i zakres pracy	21
3. Analiza stanu badań w zakresie harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych.....	25
3.1. Klasyczne metody harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych..	25
3.2. Systematyka powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych	27
3.3. Metodyka przeprowadzonych badań literaturowych	29
3.3.1. Materiały źródłowe.....	29
3.3.2. Analiza statystyczna zgromadzonych materiałów	29
3.3.3. Taksonomia znalezionych publikacji	30
3.3.4. Analiza i ocena zgromadzonych publikacji	33
3.3.4.1. <i>Adaptacja tradycyjnych metod i narzędzi</i> <i>harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych</i>	33
3.3.4.2. <i>Harmonogramowanie budowlanych przedsięwzięć</i> <i>powtarzalnych zorientowane na zasoby</i>	37
3.3.4.3. <i>Zwiększanie niezawodności dotrzymania planowanych</i> <i>terminów realizacji</i>	39
3.3.4.4. <i>Minimalizacja czasu wykonywania powtarzalnych</i> <i>przedsięwzięć budowlanych</i>	41
3.3.4.5. <i>Minimalizacja kosztu realizacji powtarzalnego</i> <i>przedsięwzięcia budowlanego</i>	43
3.3.4.6. <i>Pozostałe podejścia do harmonogramowania powtarzalnych</i> <i>przedsięwzięć budowlanych</i>	45
3.4. Podsumowanie	48
4. Badania ankietowe procesu doboru kryteriów oceny harmonogramów budowlanych.....	50
5. Eksplikacja opracowanej metody harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego	59
5.1. Identyfikacja i formalizacja modelu zagadnienia	61
5.2. Metoda rozwiązania	72
5.3. Algorytmizacja obliczeń oraz obsługa opracowanego systemu komputerowego wspomaganie harmonizacji procesów budowlanych... 76	
5.3.1. Struktura wprowadzanych danych do systemu.....	76
5.3.2. Podział przedsięwzięcia na obiekty i działki robocze	77
5.3.3. Scalenie robót budowlanych w pakiety robót.....	78
5.3.4. Ustalenie ważności kryteriów oceny harmonogramu	81
5.3.4.1. <i>Dyrektywne wskazanie wag kryteriów oceny harmonogramu</i>	81

5.3.4.2. Ustalenie wag kryteriów oceny harmonogramu za pomocą grupowej metody wspomagania decyzji	81
5.3.4.3. Ustalenie wag kryteriów oceny harmonogramu za pomocą interaktywnej metody wspomaganie decyzji.....	90
5.3.4.4. Porównanie metod ustalania wag kryteriów oceny harmonogramów budowlanych	95
5.3.5. Alokacja brygad i określenie czasów wykonania procesów.....	96
5.3.6. Ustalenie czasów i dopuszczalnych terminów realizacji procesów budowlanych	100
5.3.7. Utworzenie harmonogramu robót.....	102
5.3.7.1. Algorytm metody optymalizacji rojem cząstek	102
5.3.7.2. Obsługa algorytmu pso w opracowanym systemie komputerowym.....	111
5.3.7.3. Podsumowanie procedury tworzenia harmonogramu przedsięwzięcia budowlanego	116
5.4. Badania weryfikacyjne metody opracowanego modelu zagadnienia, systemu i uzyskiwanych rozwiązań.....	125
6. Przykład wykorzystania opracowanej metody harmonizacji procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego	131
7. Podsumowanie i wnioski	146
Bibliografia	149
Załącznik A.....	167
Załącznik B.....	188
Załącznik C.....	194
Załącznik D.....	204

Metoda wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego. Celem pracy było opracowanie metody harmonizacji wykonania niejednorodnych procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego w warunkach deterministycznych umożliwiającą minimalizację czasu realizacji przedsięwzięcia i obiektów budowlanych oraz przerw w pracy z uwzględnieniem preferencji decydenta co do istotności tych celów optymalizacji harmonogramu budowy.

Pierwszym krokiem zrealizowanych badań było studium literatury, które wykonano w celu analizy istniejących metod harmonizacji wieloobiektowych przedsięwzięć budowlanych. Z analizy literatury wynika, że tak postawiony problem harmonizacji przedsięwzięć budowlanych, jak w niniejszej pracy, nie był dotychczas sformułowany i nie doczekał się metod rozwiązań.

Kolejnym krokiem realizowanej metodyki badań było przeprowadzenie badań ankietowych wśród kadry kierowniczej przedsięwzięć budowlanych. Uzyskane w niej informacje pozwoliły rozpoznać stosowane w praktyce kryteria oceny harmonogramów budowlanych: minimalizacji czasu realizacji całego przedsięwzięcia i poszczególnych obiektów budowlanych oraz minimalizacji przerw w pracy brygad. Istotność zdefiniowanych kryteriów oceny harmonogramów można wprowadzić za pomocą jednego z trzech sposobów:

- dyrektywnego wskazania wag przez decydenta,
- autorskiej grupowej metody wspomaganie podejmowania decyzji będącej rozwinięciem rozmytej metody AHP w ujęciu Mikhailova,
- interaktywnej metody wspomaganie podejmowania decyzji wzorowanej na metodzie przeglądu wiązką światła.

Następnie, dokonano identyfikacji modelu problemu harmonizacji wykonania procesów przedsięwzięcia budowlanego oraz jego formalizacji matematycznej. Zaproponowane ujęcie zagadnienia uniemożliwia generowanie rozwiązań niedopuszczalnych, a jednocześnie nie pomija rozwiązań, które mogą być użyteczne. Zaproponowany w pracy sposób matematycznego ujęcia problemu znacząco skraca czas obliczeń oraz ułatwia jego rozwiązanie. Kolejny etap badań polegał na opracowaniu oraz oprogramowaniu algorytmu metaheurystycznego (algorytmu optymalizacji rojem cząstek) w celu poszukiwania rozwiązań niezdominowanych zagadnienia (dokładnych lub przybliżonych).

Model zagadnienia oraz uzyskiwane za pomocą systemu komputerowego rozwiązania poddano badaniom weryfikacyjnym. Polegały one na wykonaniu testów: konfrontacji danych, warunków brzegowych, stabilności otrzymanego

rozwiązania, analizy wrażliwości i efektywności czasowej uzyskanego rozwiązania. Opracowany system komputerowy pozytywnie przeszedł wszystkie przeprowadzone testy kontrolne.

Stworzoną metodę zastosowano do harmonizacji wykonania procesów drugiego etapu Elizówka Park. Redukcja czasu wykonania przedsięwzięcia, dla preferowanego rozwiązania przez kierownika budowy, otrzymana za pomocą opracowanego systemu, względem harmonogramu skierowanego w rzeczywistości do realizacji wyniosła od 25 % do 35 % (w zależności od sposobu wyboru wag kryteriów oceny).

Na końcu pracy zestawiono uzyskane wyniki i wnioski. Opracowana metoda harmonizacji wykonania procesów budowlanego przedsięwzięcia wieloobiektowego może wspomagać decyzje zarządzających budową przy projektowaniu organizacji robót budowlanych i poprawić efektywność realizacji przedsięwzięcia (zgodnie z preferencjami decydenta).

Słowa kluczowe: algorytm optymalizacji rojem cząstek, harmonogramowanie budowlane, optymalizacja harmonogramów, modelowanie matematyczne, optymalizacja wielokryterialna, zarządzanie zasobami.

Method of harmonizing construction processes in multi-object project

Abstract

The paper puts forward a method of harmonizing construction processes related to the execution of projects that involve the erection of multiple buildings. The method is, by assumption, deterministic. Its aim is to generate construction schedules of minimized overall project duration, minimized completion time of particular buildings, as well as minimized resource downtimes. As these three optimization objectives are, in most cases, contradictory, the method bases on the decision maker's preferences on their relevance.

The first step of the research was a literature review to analyze the existing methods. A knowledge gap was found: no direct solution to the above-defined problem under the above-listed criteria was found.

The next step was a survey among the construction managers to recognize the criteria used for assessing the quality of construction schedules in practical cases. The survey confirmed that minimizing the time of execution of the entire project and individual buildings, and minimizing interruptions in construction crews' workflow were considered most significant.

The proposed method requires that the criteria weights are given by the scheduler to express the constraints of a particular case. These weights can be defined in one of the following ways:

- by an arbitrary decision of the decision-maker,
- by aggregating opinions of a number of decision-makers (here, the author proposed an original method of aggregating opinions, a development of the fuzzy AHP according to Mikhailov)
- using an interactive decision support method that draws from the idea of the light beam search algorithm.

The research step to follow was the model identification: the mathematical formalization of the problem of harmonizing the construction works. The model prevents generating unacceptable schedules and, at the same time, does not exclude solutions that are potentially acceptable. The mathematical formulation proved satisfactory in terms of the runtime performance of the program created on its basis. Its core was a metaheuristic algorithm (the particle swarm optimization algorithm) to search for the exact or approximate non-dominated solutions.

The model and the solutions obtained by means of the program were subject to verification. The tests comprised data confrontation, checks on the boundary conditions, the stability of the solution, sensitivity analysis, and runtime performance. The program successfully passed all these tests.

To validate the method in a problem of a real-life scale, it was applied to harmonizing the schedule of a multifamily housing project (2nd Stage of Elizówka Park Project in Lublin), with input and original schedule supplied by the contractor. The reduction of the project duration (relative to the contractor's schedule) was between 25% and 35%, depending on the weights assigned to the optimization criteria.

The proposed method of harmonizing construction processes of projects with multiple buildings proved fit to support the scheduling process. It is applicable to designing the organization of construction works and improving resource utilization according to the decision-maker priorities.

Key words: construction scheduling, mathematical modelling, multi-objective optimization, particle swarm optimization, resource management, schedules optimization.

Definicje wybranych pojęć stosowanych w pracy

Budowlany proces inwestycyjny – (1) skoordynowana czynność o charakterze technicznym, prawnym, technologicznym, organizacyjnym, finansowym itp. prowadząca do realizacji i eksploatacji planowanej inwestycji budowlanej w określonym czasie oraz przy ograniczonych zasobach finansowych [1]; (2) działania i decyzje zmierzające do wybudowania nowego lub modernizacji istniejącego obiektu budowlanego [2].

Prawo harmonii doboru – można nazwać taki dobór, przy którym wykresy charakterystyczne wszystkich organów będą ze sobą uzgodnione tak, aby miały one najbardziej zbliżone do siebie produkcje wzorcowe i aby łączny koszt straconego czasu był jak najmniejszy [3].

Proces budowlany – (1) jest zespołem technologicznie powiązanych ze sobą procesów produkcyjnych wykonywanych na placu budowy lub zapleczu, których celem jest wytworzenie określonej produkcji związanej z wykonaniem wybranego elementu obiektu budowlanego [4]; (2) stanowi zespół określonych działań technologicznych, technologicznie uwarunkowanych i organizacyjnie ze sobą powiązanych [5].

Przedsięwzięcie – celowo zorientowana działalność człowieka lub grupy interesów w określonym otoczeniu (środowisku zewnętrznym) w oparciu o przyjętą hierarchię wartości, zmierzająca do stworzenia określonej klasy dobra zwymiarowanego posiadającego określone cechy użyteczności, wymagającego określonej wiedzy i umiejętności do jego kreowania oraz realizacji, aby w określonym cyklu, przy odpowiednich uwarunkowaniach w oparciu o określone zasoby i nakłady, wypracować odpowiedni wynik (dobro indywidualne lub wspólne), zgodny z założonym celem [6]; (2) jest działaniem złożonym, wielopodmiotowym, przeprowadzonym zgodnie z planem, który ze względu na skomplikowanie bywa realizowany za pomocą specjalnych metod [7].

Przedsięwzięcie budowlane – jest to proces inwestycyjny związany z budową, modernizacją, montażem, remontem bądź rozbiórką obiektów budowlanych lub tymczasowych obiektów budowlanych [8].

Harmonizacja pracy – (1) polega na maksymalnym wyrównywaniu czasów działania, przy czym wielkość skutku użytecznego zespołu, zależy od tego elementu, którego wydajność jest najmniejsza; wymaga zarówno harmonijnego doboru poszczególnych organów jak i zsynchronizowania ich wszystkich czynności [3]; (2) polega na takim doborze czynników i oddziaływaniu na system pracy, aby jego człony harmonijnie współprzyczyniały się do osiągania celów pracowników, jednostki organizacyjnej oraz rozwoju społeczno-gospodarczego kraju [9].

Harmonogram – odwzorowanie przedstawiające określone rozwiązania organizacyjne; jest środkiem ułatwiającym harmonizację pracy [10]; etymologia słowa harmonogram związana jest z greckimi słowami: „harmonia” – w mitologii greckiej bogini i uosobienie ładu oraz symetrii, a także – „gramma”, które oznacza

znak pisany, literę; czyli łącznie harmonogram jest to opracowanie mające na celu zharmonizowanie szeregu zamierzonych czynności [11].

Harmonogram budowlany – jest narzędziem planowania przebiegu procesów budowlanych składających się na realizację przedsięwzięcia budowlanego [12].

Model – zbiór elementów rzeczywistości, przyjętych jako istotne dla danego zagadnienia, oraz reguł, które nim rządzą [13].

Modelowanie – wybór elementów rzeczywistości, przyjętych jako istotne dla danego zagadnienia oraz określenie reguł ich działania [13].

Sprawność – jest miarą uniwersalną, która służy do oceny funkcjonowania organizacji; jest to nazwa ogólna każdego z walorów praktycznych: skuteczność, korzystność, jak i ekonomiczność [14]; polega na korzystaniu z wszystkiego, co jest niezbędne do realizacji przyjętego celu i równocześnie na korzystaniu tylko z tych zasobów, których zużycie jest konieczne, aby cel ten został osiągnięty [15].

1. Wstęp

Jednym z kluczowych zagadnień naukowych aktualnie podejmowanych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport jest tworzenie i rozwijanie metod wspomagania zarządzania realizacją przedsięwzięcia budowlanego.

Pojęcie zarządzania jest różnie definiowane w literaturze. Według Griffina [16]: „zarządzanie jest to zestaw działań (obejmujący planowanie i podejmowanie decyzji, organizowanie, przewodzenie, tj. kierowanie ludźmi, oraz kontrolowanie), skierowanych na zasoby organizacji (ludzkie, finansowe, rzeczowe i informacyjne) oraz wykonywanych z zamiarem osiągnięcia celów organizacji w sposób sprawny i skuteczny”. Zarządzanie jest rozumiane również jako:

- działanie polegające na dysponowaniu zasobami [17],
- sztuka łączenia różnych środków, którymi dysponuje przedsiębiorstwo, tak aby osiągnęło ono swoje cele z maksymalną skutecznością [18],
- formułowanie celu działania, planowanie, czyli organizowanie struktur oraz kontrolowanie realizacji celów [19],
- działanie zmierzające do spowodowania funkcjonowania rzeczy, organizacji lub osób podległych zgodnie z celami zarządzającego [20].

Wszystkie wyżej wymienione definicje mają pewne cechy wspólne: zarządzanie jest zestawem twórczych działań, wykonywanych z wykorzystaniem zasobów, w celu realizacji predefiniowanych celów. Pod pojęciem „zestaw twórczych działań” należy rozumieć rolę zarządzania, które po raz pierwszy zostały zidentyfikowane i opisane przez Henri’ego Fayola [21]. Wyróżnił on pięć podstawowych funkcji zarządzania: planowanie, organizowanie (rozumiane jako wszelkie czynności administracyjne), koordynowanie (zasobów i działań), przewodzenie (bycie liderem formalnym bądź nieformalnym), kontrolowanie (wykonania planu). Przewodzenie coraz częściej w literaturze jest zastępowane pojęciem motywowania [22], a koordynowanie nie jest wyszczególniane jako osobne działanie, ponieważ uznaje się, że jest nieodłączną czynnością w ramach wszystkich funkcji [23].

Kluczową funkcją zarządzania jest planowanie, które „powinno być punktem wyjścia dla podejmowania jakichkolwiek działań w zarządzaniu organizacją, zespołem czy projektem*” [24]. Planowanie obejmuje [24]:

- rozpoznanie i zrozumienie aktualnej sytuacji,
- przewidywanie przyszłych zmian sytuacji,
- określenie celów,
- określenie niezbędnych zasobów (ludzkich, materiałowych, sprzętowych, finansowych, informacji itp.),
- określenie działań niezbędnych do osiągnięcia zdefiniowanych celów,

* W budownictwie zwyczajowo używa się pojęcia zarządzania przedsięwzięciem

- próbę przewidzenia skutków podjęcia bądź niepodjęcia konkretnych działań.

W odniesieniu do zarządzania przedsięwzięciami budowlanymi planowanie jest szczególnie istotne. W przypadku planowania przedsięwzięcia budowlanego głównym etapem tego procesu jest harmonogramowanie. Etymologicznie słowo harmonogram pochodzi od dwóch greckich słów: „harmonia” – w mitologii greckiej bogini i uosobienie ładu i symetrii – oraz „gramma”, które oznacza znak pisany, literę; czyli łącznie harmonogram jest to opracowanie mające na celu zharmonizowanie szeregu zamierzonych czynności. W odniesieniu do przedsięwzięć budowlanych harmonogramowanie polega na rozdziale w czasie dyskretnych i niezużywających się zasobów (tzn. zasobów odnawialnych) między uporządkowany ciąg procesów (czynności), które należy wykonać [4]. W procesie tworzenia harmonogramu należy również uwzględnić ryzyko i niepewność związaną z realizacją przedsięwzięcia, a także ograniczenia wynikające z budżetu oraz dyrektywnych terminów jego realizacji [25].

Rola harmonogramowania w inżynierii lądowej jest potrójna: harmonogramowanie jest elementem planowania oraz projektowania realizacji (organizowania) produkcji budowlanej a opracowany harmonogram stanowi narzędzie kontroli realizacji inwestycji. Zagadnienia związane z pierwszym zastosowaniem harmonogramowania są połączone między innymi z określeniem czasu realizacji przedsięwzięcia czy ustaleniem sposobu jego wykonania. Problemy związane z drugą rolą są zróżnicowane i można wyróżnić między innymi: projektowanie systemów mechanizacji kompleksowej, ustalanie najkorzystniejszego rozwiązania organizacyjnego współpracujących ze sobą zasobów, harmonizacja wykonania zadań z bilansowaniem potrzeb i ich dostępności, ocena kosztów wykonania robót, analiza ryzyka [26]. Harmonogramy mogą być wykorzystywane do kontroli czasowej realizacji przedsięwzięcia, kosztów wykonania przedsięwzięcia czy zużycia zasobów. W przypadku dezaktualizacji harmonogramów jest konieczne podejmowanie działań w ramach kierowania operatywnego.

Z wyżej wymienionych zadań harmonogramowania wynikają trzy zasadnicze problemy, które powinny być rozwiązane w tym procesie [27]:

- problem rozdziału posiadanych sił i środków do wykonania procesów cząstkowych (zagadnienie alokacji zasobów lub ich przydziału czy rozmieszczenia, ang. *assignment problem* lub *allocation problem*),
- problem ustalenia kolejności realizacji zadań niezależnych pod względem technologicznym, a wymagających kolejnego wykonania ze względów organizacyjnych (zagadnienie szeregowania zadań),
- problem ustalenia terminów realizacji procesów (analiza czasowa).

Zatem harmonogramowania nie można utożsamiać jedynie z ustalaniem terminów realizacji procesów. Harmonogramy stanowią narzędzie harmonizacji

[3] a proces ich sporządzania powinien obejmować jednocześnie dobór jednostek organizacyjnych oraz synchronizację ich działań w czasie.

Tradycyjnie harmonogramy wykonywane były na podstawie intuicji i doświadczenia kierownika budowy. Jednak w przypadku dużych, złożonych przedsięwzięć, bądź bardzo innowacyjnych i nietypowych zleceń, podejście to może prowadzić do otrzymania niesatysfakcjonujących rezultatów. Końcowy wynik uzyskany tym sposobem jest również bardzo mocno uzależniony od doświadczenia osoby sporządzającej harmonogram. Dlatego też tworzenie harmonogramów budowlanych zaczęto wspomagać metodami matematycznymi. Jednym przykładów takich metod mogą być wywodzące się z teorii grafów metody sieciowe np. metoda drogi krytycznej (ang. *CPM – Critical Path Method*), metoda PERT (ang. *Program Evaluation and Review Technique*), czy metoda PM (ang. *Precedence Network Model*).

Klasyczne metody harmonogramowania nie umożliwiają jednak jednoczesnego uwzględnienia istotnych dla kierujących realizacją budowy kryteriów optymalizacji harmonogramów: minimalizacji czasu realizacji całego przedsięwzięcia i czasu przerw w pracy brygad oraz poszukiwania rozwiązań kompromisowych. Pierwsze kryterium optymalizacji jest charakterystyczne dla znanego w literaturze problemu harmonogramowania z ograniczeniami w dostępności zasobów (ang. *resource-constrained project scheduling problem – RCPSp*), natomiast drugie dla harmonogramowania z wyrównaniem zużycia zasobów (ang. *resource levelling problem – RLP*) (ze zdefiniowanym dyrektywnym terminem zakończenia przedsięwzięcia), gdzie wszelkie nierównomierności w pracy zasobów świadczą o braku zachowania ciągłości ich zatrudnienia. Zastosowanie tych metod może skutkować uzyskaniem harmonogramów niesatysfakcjonujących wykonawców i nie spełniających ich wymagań. Z drugiej strony, harmonogram opracowany z równomiernym zapotrzebowaniem na zasoby (zapewniający ciągłość pracy brygad) charakteryzuje się często nieakceptowalnie długim okresem realizacji przedsięwzięcia, co skutkuje koniecznością ponoszenia dodatkowych, dających się uniknąć, kosztów m.in. w ramach kosztów pośrednich budowy. Natomiast minimalizacja jedynie czasu wykonania obiektów budowlanych będzie prowadzić do złej organizacji brygad i poniesienia niepotrzebnych kosztów związanych z ich przestojami na budowie. Innym kryterium często brany pod uwagę przy ustalaniu harmonogramu robót jest dążenie do maksymalnego skrócenia czasu realizacji poszczególnych etapów robót czy realizacji obiektów budowlanych. Opóźnienia w zakończeniu realizacji poszczególnych obiektów mogą skutkować nałożeniem kar umownych na wykonawcę czy nawet utratą płynności finansowej inwestora. Wydłużony czas wykonania obiektów może także powodować wrażenie zleceniodawcy, że wykonawca nie posiada odpowiednich zasobów do realizacji przedsięwzięcia, czy skutkować zwiększeniem kosztów zależnych od czasu, np. dzierżawy maszyn i urządzeń. W przypadku realizacji uciążliwych inwestycji publicznych, np. remontów dróg, wydłużenie realizacji robót na

poszczególnych obiektach może wywoływać niezadowolenie opinii publicznej. Uogólniając, kryteria harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych można sklasyfikować na [27]–[30]:

- czasowe (minimalizacja terminu zakończenia realizacji przedsięwzięcia, minimalizacja średniego ważonego czasu przepływu czynności, minimalizacja maksymalnego opóźnienia wykonania czynności, minimalizacja średniego ważonego opóźnienia, minimalizacja liczby opóźnionych czynności),
- kosztowe (minimalizacja sumarycznych kosztów zatrudnienia ludzi i sprzętu, minimalizacja sumarycznych kosztów zużycia środków produkcji i materiałów, minimalizacja kosztów wykonania przedsięwzięcia, minimalizacja kosztów przerzutu pracowników na inny front robót),
- czasowo-kosztowe (minimalizacja kosztów z wyceną strat czasu spowodowaną późniejszym terminem zakończenia przedsięwzięcia, wydłużeniem czasu realizacji czynności przekroczeniem dopuszczalnych terminów zakończenia czynności, niewykorzystaniem potencjału wykonawczego inwestora),
- inne (maksymalizacja odporności harmonogramu na wpływ zjawisk losowych).

Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowych komputerów osobistych stało się możliwe wykorzystanie w większym zakresie metodyki badań operacyjnych i budowanie złożonych modeli matematycznych rozwiązywanych za pomocą informatycznych programów optymalizacyjnych. Znajdowanie optymalnych harmonogramów przedsięwzięć budowlanych ze względu na różne kryteria jest problemem złożonym, a zagadnienie harmonogramowania z ograniczeniami w dostępności zasobów (ang. *resource-constrained project scheduling problem*), jest problemem NP-trudnym. Dzięki zastosowaniu komputerów stało się możliwe znajdowanie optymalnych lub satysfakcjonujących rozwiązań złożonych modeli uwzględniających wiele czynników oraz ograniczeń, wcześniej niemożliwych do rozwiązania. Wraz z rozwojem algorytmów obliczeniowych i optymalizacyjnych powstaje wiele nowych metod rozwiązywania różnych specyficznych problemów harmonogramowania.

Dobór metod harmonogramowania powinien być dostosowany zatem do rodzaju przedsięwzięcia. W polskiej literaturze przedsięwzięcia budowlane zwyczajowo klasyfikuje się ze względu na sposób modelowania ich struktury organizacyjnej i stosowane metody harmonogramowania na dwa podstawowe rodzaje [4]:

- przedsięwzięcia typu kompleks operacji,
- przedsięwzięcia, które mogą być zorganizowane zgodnie z zasadami potokowych metod organizacji pracy.

Przedsięwzięcia określane mianem „kompleks operacji” składają się ze zbioru procesów budowlanych nierytmicznych i niepowtarzalnych o różnym charakterze i zakresie prac. Harmonizacja takich przedsięwzięć jest skomplikowana ze względu na złożoność i niejednorodność zarówno pod względem technologicznym, jak i rodzaju oraz zakresu robót [4].

Metody sieciowe są stosowane przede wszystkim do harmonogramowania przedsięwzięć typu kompleks operacji, tj. obejmujących procesy niecykliczne. Jednak w przypadku przedsięwzięć zawierających procesy powtarzalne (np. przedsięwzięcia o charakterze liniowym, wysokościowce, osiedla budynków mieszkalnych) stosowanie tych tradycyjnych metod nie daje satysfakcjonujących rezultatów. Modele takich przedsięwzięć są zbyt złożone, aby można było efektywnie stosować klasyczne podejście sieciowe. Co więcej, metody te nie uwzględniają możliwości przydziału zasobów do procesów i zapewnienia ciągłości ich pracy, co stanowi istotną przeszkodę w ich wykorzystywaniu. W celu harmonogramowania przedsięwzięć zawierających procesy powtarzalne opracowano metody specjalne np. metodę pracy równomiernej, metodę sprzężeń czasowych, metodę Line of Balance, czy Linear Scheduling Method.

Klasyczną metodą organizacji procesów powtarzalnych, zaliczaną do grupy potokowych metod organizacji pracy, jest metoda pracy równomiernej [5], [31]. Istnieją trzy odmiany tej metody opracowane do organizacji wykonania procesów na działkach:

- jednotypowych – o jednakowej wielkości, na których wykonuje się kolejne procesy w ciągu technologicznym stosując jednakowe technologie,
- jednorodnych – charakteryzujących się tożsamą technologią wykonania procesów na różnych działkach roboczych, mimo że ich zakres ilościowy może być różny na poszczególnych działkach, występuje proporcjonalność pomiędzy wielkością działek i pracochłonnością procesów,
- niejednorodnych – na których są realizowane procesy jednakową technologią na różnych działkach roboczych, lecz brak jest zależności wprost pomiędzy wielkościami działek i pracochłonnościami procesów lub zależność ta jest różna dla różnych procesów.

Metoda pracy równomiernej jest modyfikacją przemysłowej metody produkcji taśmowej dla potrzeb przedsięwzięć budowlanych. „Polega ona na podziale obiektów na pewną liczbę części o jednakowych ilościach robót, zwanych działkami roboczymi, powierzanych do wykonania stałym jednostkom organizacyjnym (zespołom, brygadam, zestawom maszyn), które przechodząc z jednej działki roboczej na następną wykonują stale taką samą pracę” [4], [5], [31]. Jeżeli planowane do realizacji obiekty budowlane mają niewielkie rozmiary, to mogą odgrywać bezpośrednio rolę działek roboczych.

Metoda pracy równomiernej posiada wiele cennych zalet między innymi: redukcja przerw w pracy brygad, redukcja czasu realizacji, klarowność struktury harmonogramu robót, stwarzanie dobrych warunków w celu zapewnienia ciągłości i równomierności zatrudnienia brygad i pracy maszyn, równomierności produkcji budowlanej oraz zużycia materiałów, wzrost wydajności brygad zgodnie tzw. krzywą uczenia się [4], [25]. Metoda pracy równomiernej posiada także mankamenty, między innymi: niemożność uwzględnienia dodatkowych ograniczeń, trudności w jej implementacji w przypadku niejednorodności procesów i działek roboczych, brak możliwości modyfikacji w sposób ciągły liczebności brygad, co prowadzi do różnorytmiczności, propagacja zakłóceń losowych na inne procesy, co skutkuje wystąpieniem przerw w pracy (aby temu zapobiec opóźnia się włączanie kolejnych ciągów procesów lub stosuje działki rezerwowe) [5], [32]. W przypadku procesów powtarzanych na działkach niejednorodnych istotny wpływ na czas realizacji przedsięwzięć ma kolejność zajmowania działek przez brygady. Problem ustalania optymalnej kolejności był przedmiotem badań m.in. Anafasjewa, Mrozowicza, Hejduckiego i Rogalskiej [33]–[35], co stanowiło podstawę do rozwoju metod sprzężeń czasowych (ang. *Time Coupling Methods*).

Do harmonogramowania procesów powtarzalnych w krajach zachodnich rozwijane są od wczesnych lat 40 ubiegłego wieku metody LOB (ang. *Line-of-Balance*) i jej odmiany. Zakres jej zastosowania jest zależny od specyficznych cech wznoszonych obiektów. Z tego względu, na potrzeby harmonogramowania, dokonuje się tam bardziej szczegółowej klasyfikacji przedsięwzięć obejmujących procesy powtarzalne. W literaturze zagranicznej najbardziej rozpowszechnioną klasyfikacją przedsięwzięć budowlanych jest ta przedstawiona w artykule [36]. Autorzy tego artykułu klasyfikują przedsięwzięcia budowlane jako: powtarzalne liniowe (ang. *repetitive linear*), powtarzalne nieliniowe (ang. *repetitive non-linear*) oraz niepowtarzalne (ang. *non-repetitive*). Przedsięwzięcia powtarzalne liniowe występują wtedy, gdy dysponuje się pewną liczbą działek roboczych o jednakowej wielkości, na których wykonuje się analogiczne procesy, stosując jednakowe technologie np. drogi, rurociągi, budynki wysokościowe. Przedsięwzięcia powtarzalne nieliniowe cechują się jednakową technologią wykonania procesów, mimo że ich zakres ilościowy może być różny na poszczególnych działkach roboczych np. osiedle domów jednorodzinnych o różnych powierzchniach. Przedsięwzięcia niepowtarzalne charakteryzują się brakiem analogii pomiędzy procesami wykonywanymi na różnych działkach roboczych oraz brakiem proporcjonalności w ilości prac w stosunku do wielkości działek roboczych np. szpitale, muzea, biblioteki.

Inną popularną klasyfikacją przedsięwzięć budowlanych jest systematyzacja przedstawiona w publikacji (Hegazy, Abdel-Monem, & Atef Saad, 2014). Wyróżnia ona przedsięwzięcia powtarzalne oraz niepowtarzalne. Przedsięwzięcia powtarzalne można sklasyfikować w trzech podstawowych grupach: liniowe (ang. *linear*) (np. autostrady, rurociągi, tunele), nieliniowe pionowe (ang. *non-*

linear vertical) (np. wysokościowce) i nieliniowe rozproszone (ang. *non-linear scattered*) (np. osiedla domów wolnostojących, naprawy mostów). Według jeszcze innej klasyfikacji wyróżnia się przedsięwzięcia, które są powtarzalne ze względu na cykliczność robót w projekcie (np. kompleks domów wolno stojących, obiekty obejmujące wiele powtarzalnych kondygnacji) oraz przedsięwzięcia, które są powtarzalne ze względu na ich układ geometryczny (np. autostrady, rurociągi) [38].

Kluczowym zagadnieniem planowania i projektowania realizacji przedsięwzięcia budowlanego jest dobór wykonawcy przedsięwzięcia (ang. *contractor selection*), jak i alokacja jego własnych brygad (lub dodatkowo dobór brygad podwykonawców).

W celu wyłonienia kompetentnego wykonawcy projektu budowlanego wykorzystywane są różne tryby takie jak: przetarg nieograniczony, przetarg ograniczony, prekwalfikacja wykonawców, licytacje elektroniczne czy negocjacje [39], [40]. W Polsce procedury pozyskiwania wykonawcy i zawierania umów powinny być zgodne z Kodeksem cywilnym [41]. W przypadku przedsięwzięć finansowanych środków publicznych, kwestie związane z wyborem wykonawców robót reguluje Ustawa Prawo zamówień publicznych [42].

Drugi problem (znany również w literaturze z zakresu badań operacyjnych pod nazwą zagadnienia rozmieszczenia, ang. *assignment problem*, lub alokacji zasobów, ang. *resources allocation*) polega na minimalizacji łącznego czasu lub kosztu wykonania wszystkich zadań przy założeniu, że każda jednostka organizacyjna jest przydzielona do realizacji innego procesu.

W celu zapewnienia sprawnego działania dobór ten powinien być zgodny z prakseologicznymi zasadami określającymi sposób postępowania: racjonalizacji, ekonomiczności, optymalnego wyniku i harmonizacji. Nadrzędną nad wszystkimi pozostałymi jest zasada harmonii w działaniu i głosi, że wyniki każdego działania będą tym lepsze, im lepiej będą ze sobą skoordynowane (zestrojone) uczestniczące elementy (ludzkie, techniczne) oraz okresy przebiegu związanych ze sobą czynności [43]. Prekursorem badań nad harmonizacją pracy był Karol Adamiecki, który doszedł do wniosku, że „harmonizacja wymaga zarówno harmonijnego doboru poszczególnych organów jak i zsynchronizowania ich wszystkich czynności”. Na tej podstawie stworzył zasadę harmonizacji pracy [3]: „trzeba dobierać organy zgodnie z ich charakterystycznymi wykresami i następnie trzeba, aby te organy działały w ścisłym z sobą związku tak, aby każda czynność odbyła się w swoim czasie”.

Połączenie dwóch podstawowych zagadnień: synchronizacji zadań (ustalania i uzgadniania terminów realizacji poszczególnych procesów) oraz doboru odpowiednich brygad do realizacji procesów budowlanych, pozwala na harmonizację wykonania procesów budowlanych, redukcję zbędnych przestojów i przerw w pracy oraz umożliwia pełne wykorzystanie potencjału produkcyjnego. Umożliwia to zaprojektowanie sprawnej realizacji przedsięwzięć budowlanych,

czyli takiej, w której osiągnane wyniki są współmierne do nakładów: pracy, materiałów, czasu czy też środków finansowych. Ujęcie w przedstawiony sposób planowania i projektowania realizacji przedsięwzięcia budowlanego daje możliwość właściwego działania, czyli skutecznego, prawidłowego, oszczędnego [43]. Dodatkowo, dzięki połączeniu dwóch osobnych problemów w jednym podejściu możliwe staje się osiągnięcie efektu synergii pracy zespołowej i zwielokrotnienie korzyści z tego płynących. Takie podejście wpisuje się również w ogólnoswiatowe trendy nakazujące poszukiwać bardziej holistycznego ujęcia rozważanych problemów.

Podstawową rolę harmonogramów stosowanych przy planowaniu i projektowaniu realizacji przedsięwzięć budowlanych, według Adamieckiego (uważanego za współtwórcę tego narzędzia planowania i kontroli realizacji procesów produkcyjnych), jest wskazywanie ukrytych rezerw czasowych spowodowanych niedostateczną harmonizacją procesów pracy, oraz minimalizacja przestojów i czasu oczekiwania. Harmonogramy stanowią narzędzie harmonizacji pracy i tym samym zapewniają lepsze wykorzystanie czasu pracy zasobów angażowanych do realizacji przedsięwzięć, poprzez redukcję strat czasu i zbędnych przestojów. Według Adamieckiego „choć rozporządzamy niewyczerpanym zapasem czasu, który sam przez się nic nie kosztuje, jest to jednak jeden z najdroższych materiałów, jakie zużywamy przy wyrobieniu produktów” [44], [45].

Monografia została podzielona na siedem rozdziałów. W następnym rozdziale – drugim – sformułowano problem naukowy oraz jej cel i zakres, a także metodykę przeprowadzonych badań. W rozdziale trzecim dokonano analizy stanu badań w zakresie harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych. W rozdziale czwartym zaprezentowano wyniki badania ankietowego dotyczącego procesu doboru kryteriów oceny harmonogramów budowlanych. Rozdział piąty zawiera opis i charakterystykę opracowanej metody harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego. Ta część monografii zawiera także identyfikację i formalizację matematyczną problemu wraz z algorytmem postępowania, będącym podstawą do sporządzenia komputerowego narzędzia wspomagającego metodę harmonizacji procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego. Weryfikacja uzyskiwanych wyników z wykorzystaniem systemu komputerowego stanowi jądro rozdziału szóstego. Monografia zakończona jest podsumowaniem, wnioskami oraz propozycją kierunków dalszych badań (rozdział siódmy).

2. Przedmiot, cel i zakres pracy

Przedmiotem pracy jest wspomaganie podejmowania decyzji w zakresie harmonizacji wykonania niejednorodnych procesów wieloobektowego przedsięwzięcia budowlanego. Problem naukowy polega na uwzględnieniu przy harmonogramowaniu tego typu przedsięwzięć preferencji decydenta w zakresie istotności kryteriów: minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięcia, minimalizacji przestoju w pracy brygad roboczych i minimalizacji czasu realizacji obiektów budowlanych.

W pracy założono, że przedsięwzięcie wieloobektowe posiada pewną specyficzną hierarchiczną strukturę:

- przedsięwzięcie budowlane,
- obiekty $p \in \{1, 2, \dots, o\}$,
- działki robocze $l_p \in \{1, 2, \dots, m_p\}$,
- procesy budowlane $j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Taka struktura przedsięwzięcia często występuje w praktyce w przypadku zamierzeń inwestycyjnych z zakresu inżynierii lądowej, np. polegających na budowie osiedla budynków wielorodzinnych (obiekty są poszczególnymi budynkami wielorodzinnymi, które są podzielone na działki robocze, na których są realizowane procesy budowlane). Optymalna kolejność wykonania obiektów jest jedną z niewiadomych podjętego w monografii zadania, podczas gdy kolejność realizacji działek roboczych w obiektach jest zazwyczaj uwarunkowana wymaganiami konstrukcyjnymi – co odpowiada powszechnej praktyce w sektorze budowlanym.

Zgodne z ideą potokowych metod organizacji budowy w jednym czasie tylko jeden proces może być realizowany na działce roboczej, tak aby pracownicy wykonujący go mogli w całości wypełnić front robót. Oczywiście, w przedsięwzięciach budowlanych zdarzają się także procesy, których jednoczesna realizacja na działce roboczej nie koliduje ze sobą np. wykonanie instalacji elektrycznej, centralnego ogrzewania oraz instalacji wodno-kanalizacyjnej. Z tego względu dla tego typu procesów zdefiniowano zbiory (oznaczone w rozdziale 5 jako $H_j \in \forall j \in V \setminus j$), które zawierają procesy mogące być jednocześnie realizowane na działce roboczej wraz z procesem j .

Zakres robót budowlanych prowadzonych na działkach budowlanych oraz zależności kolejnościowe pomiędzy nimi są modelowane za pomocą sieci czynności (sporządzonej techniką jednopunktową), która jest reprezentowana za pomocą grafu skierowanego $G = \langle V, E \rangle$ z jednym wierzchołkiem początkowym i jednym końcowym, w którym wierzchołki (elementy zbioru V) oznaczają procesy budowlane, a łuki grafu $E \subset V \times V$ przedstawiają zależności typu „rozpoczęcie po zakończeniu” pomiędzy procesami na działce roboczej.

Można wyróżnić cztery rodzaje uwzględnianych w pracy zależności pomiędzy procesami:

- powiązania technologiczne pomiędzy procesami budowlanymi na działce roboczej, opisane za pomocą łuków sieci grafu skierowanego,
- powiązania pomiędzy tymi samymi procesami wykonywanymi na kolejnych działkach roboczych, wynikające z kolejności realizacji działek i obiektów,
- powiązania pomiędzy procesami na tej samej działce, wynikające z możliwości wykonywania na każdej działce tylko jednego procesu budowlanego w tym samym czasie (jeśli nie należą do zbiorów H_j),
- powiązania pomiędzy procesami wykonywanymi przez tę samą brygadę, wynikające z jej dostępności.

Pracownicy budowlani w Polsce przechodzą szeroką edukację zawodową, co skutkuje uzyskiwaniem przez nich kilku kwalifikacji zawodowych dotyczących wykonywania różnych asortymentów robót budowlanych. Dzięki temu można przyjąć, że poszczególne brygady mogą wykonywać różne procesy budowlane (ale z bliskim powiązaniem pod względem wymagań kwalifikacyjnych), lecz nie w jednym czasie. Dodatkowo przyjęto założenie, że brygada przydzielona do wykonania danego procesu budowlanego wykonuje go na wszystkich działkach roboczych. Pozwala to na wykorzystanie efektu uczenia się brygad, a co za tym idzie zwiększenia ich wydajności. Czasy realizacji poszczególnych procesów przez brygady, ustalone na podstawie kalkulacji projektanta lub na podstawie ofert złożonych przez podwykonawców, mają charakter deterministyczny. Ponadto poszczególne brygady charakteryzują się stałymi składami osobowymi oraz zróżnicowanymi wydajnościami. Ze względu na założoną niejednorodność rozpatrywanych procesów budowlanych czasy ich wykonania na różnych działkach roboczych mogą się różnić. Dodatkowo, przedsięwzięcie posiada dyrektywny termin zakończenia realizacji wszystkich procesów, który może być utożsamiany z umownym terminem realizacji obiektów budowlanych.

Celem monografii jest opracowanie metody harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego w warunkach deterministycznych, umożliwiającej redukcję cyklu budowy poszczególnych obiektów i czasu realizacji całego przedsięwzięcia wieloobiektowego oraz przerw w pracy.

Ocena możliwych wariantów harmonogramu realizacji wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego dokonywana będzie przy jednoczesnym zastosowaniu następujących kryteriów:

- minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia,
- minimalizacja przestojów w pracy brygad roboczych,
- minimalizacja czasu realizacji obiektów budowlanych, pozostająca w relacji z redukcją przestojów w pracy na frontach robót.

Minimalizacja przestojów w pracy na działkach roboczych prowadzi do zwiększenia stopnia wykorzystania dostępnych frontów robót. W przypadku obiektów budowlanych obejmujących procesy realizowane kolejno (szeregowo) minimalizacja przerw w pracy na działkach roboczych jest tożsama z minimalizacją czasu realizacji wszystkich procesów na każdej działce roboczej (i tak może to jednak prowadzić do wydłużenia czasu realizacji całego obiektu). W przypadku gdy zależności między procesami są bardziej złożone i modelowane za pomocą sieci (i gdy możliwa jest jednoczesna realizacja kilku procesów na działce), redukcja przerw w realizacji robót na działce może prowadzić do wydłużenia czasu realizacji procesów na działce (i całego obiektu). W tym przypadku bardziej istotne jest zapewnienie ciągłości realizacji procesów krytycznych na działce, skrócenie czasu realizacji robót na działkach roboczych i w efekcie czasu realizacji obiektów, co prowadzi do zwiększenia stopnia wykorzystania dostępnych frontów robót i zwiększenia przerobu w czasie. Z tego względu w pracy jako trzecie kryterium przyjęto minimalizację czasu realizacji obiektów budowlanych, która jest powiązana z redukcją przerw w pracy na działkach roboczych.

Ocena dopuszczalnych harmonogramów będzie dokonywana za pomocą jednej z poniższych metod:

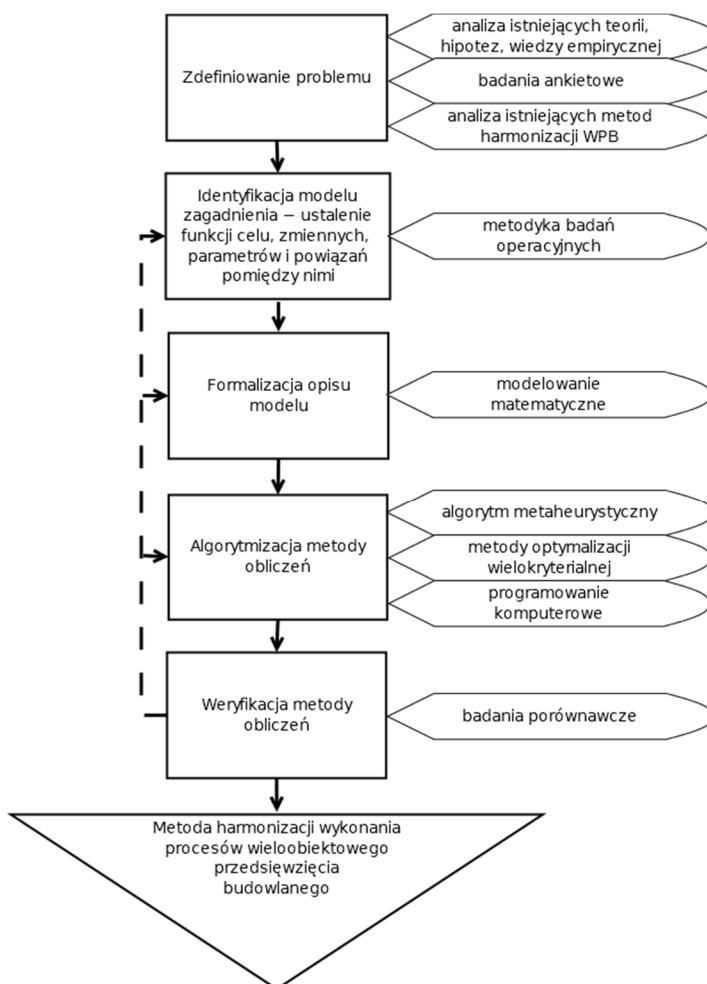
1. Dyrektywnego wskazania przez decydenta wag kryteriów w addytywnej funkcji użyteczności.
2. Grupowej metody wspomagania decyzji.
3. Interaktywnej metody wspomagania decyzji.

Tak postawiony **problem harmonizacji przedsięwzięć budowlanych** nie był dotychczas sformułowany i nie doczekał się metod rozwiązań. Istniejące próby poprawy harmonizacji pracy w przedsięwzięciach budowlanych albo dotyczyły obiektów jednotypowych (metoda LOB, metoda pracy równomiernej), albo były przedstawiane jako problemy jednokryterialne z dodatkowymi wymaganiami uwzględnianymi w postaci ograniczeń modelu matematycznego (metody sprzężeń czasowych). Osiągnięcie założonego celu pracy wiąże się z opracowaniem odpowiedniego modelu matematycznego harmonogramowania przedsięwzięcia wieloobektowego z przyjętą w publikacji jego hierarchiczną strukturą, ograniczeniami dotyczącymi kolejności realizacji robót w obiekcie oraz na działce roboczej, dodatkowymi ograniczeniami dotyczącymi m.in. terminu realizacji przedsięwzięć budowlanych i z uwzględnieniem dążenia do osiągnięcia trzech celów optymalizacji. W celu znalezienia najbardziej satysfakcjonujących rozwiązań tak ujętego problemu użycie tradycyjnych metod optymalizacyjnych, np. przeszukiwania wyczerpującego czy chciwego zbioru rozwiązań, wydaje się problematyczne. Dlatego w niniejszej monografii do znalezienia kompromisowych rozwiązań modelu użyto algorytmu metaheurystycznego – algorytmu optymalizacji rojem cząstek (ang. *Particle Swarm Optimization*, PSO).

Proponowane podejście może pozwolić na lepsze wykorzystanie posiadanego potencjału produkcyjnego przedsiębiorstw budowlanych i zapewnić

zsynchronizowanie w czasie pracy zatrudnianych brygad, szczególnie przy trudnościach z pozyskaniem wykwalifikowanej kadry w budownictwie. Opracowana metoda może zapewnić korzystną organizację wykonania procesów budowlanych w wieloobiektowych przedsięwzięciach budowlanych poprzez racjonalny dobór brygad roboczych i ustalenie terminów realizacji procesów. Poprzez uwzględnienie trzech kryteriów optymalizacji o różnej istotności rozwiązania będą lepiej dopasowane do preferencji decydenta, a co za tym idzie mogą być chętniej stosowane w praktyce.

Na rysunku nr 2.1. przedstawiono metodykę badań oraz wykorzystywane w pracy narzędzia i metody.



Rysunek 2.1. Metodyka badań oraz wykorzystywane w pracy narzędzia i metody

3. Analiza stanu badań w zakresie harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych

3.1. Klasyczne metody harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych

Próba opracowania odpowiednich narzędzi ułatwiających organizację pracy zbiorowej była jednym z pierwszych zagadnień podejmowanych przez pionierów tej nauki. Już w lutym 1903 roku w Towarzystwie Technicznym w Jekatierinosławiu (trzy miesiące przed wygłoszeniem przez Fredericka W. Taylora referatu pt. „Shop Management” – później wydanego w formie książkowej [46], co jest powszechnie przyjmowane za początek nauk o zarządzaniu [47]) Karol Adamiecki [10] przedstawił w formie odczytu koncepcję wykreślnej metody organizowania pracy zbiorowej w walcowniach. Uznaje się, że ta metoda Adamieckiego była pierwszym na świecie harmonogramem.

Najbardziej rozpowszechniona forma wizualizacji harmonogramów została opracowana przez Henry’ego Gantta w 1910 roku [48]. Wykres nazwany jego imieniem w wierszach przedstawia poszczególne zasoby, natomiast kolumny oznaczają jednostki czasu. Wykres Gantta (nazywany także wykresem belkowym) jest podstawowym sposobem przedstawiania harmonogramów wykorzystywanym przez większość programów wspomagających zarządzanie, takich jak: Microsoft Project, Primavera czy ProjectLibre.

Kolejnym etapem rozwoju metod wspomagających organizację pracy były późne lata pięćdziesiąte, kiedy to zaczęto używać teorii grafów do opracowywania nowych metod planowania. Sama teoria grafów miała swój początek w 1735 roku (wersja drukowana została wydana w 1741 roku [49]), kiedy Leonhard Euler rozwiązał zagadnienie mostów królewieckich za pomocą stworzonego przez siebie grafu. Te nowe metody planowania przedstawiające model przedsięwzięcia jako graf skierowany zostały nazwane metodami sieciowymi. Można wyróżnić trzy klasyczne metody sieciowe: ścieżki krytycznej (ang. *Critical Path Method*; CPM), PERT (ang. *Program Evaluation and Review Technique*) oraz PDM (ang. *Precedence Diagramming Method*).

Metoda PERT została opracowana przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych w latach 1956–1957 w ramach realizacji programu budowy rakiet balistycznych Polaris. Pierwsza publikacja naukowa dotycząca tej metody ukazała się w 1959 roku [50]. W metodzie PERT przedsięwzięcie jest modelowane za pomocą grafu skierowanego, którego wierzchołki stanowią zdarzenia, natomiast łuki reprezentują czynności sieci, których czasy wykonania są traktowane jako zmienna losowa. Zastosowano w niej tzw. dwupunktową technikę tworzenia sieci

(ang. *activity-on-arrow*). Istotą metody PERT jest określenie prawdopodobieństwa dotrzymania terminu dyrektywnego zakończenia przedsięwzięcia na podstawie analizy zmienności wykonania decydującego ciągu procesów (ścieżki krytycznej określonej dla wartości średnich zmiennych losowych czasów ich realizacji).

Metoda ścieżki krytycznej została opracowana w 1957 roku przez Morgana Walkera oraz Jamesa E. Kelly'ego i zastosowana w firmie DuPont do znalezienia najniższego kosztu produkcji. Pierwsze naukowe opracowanie dotyczące metody CPM ukazało się w 1959 roku [51]. Opracowana przez Kelly'ego i Walkera metoda została rozpowszechniona w budownictwie za sprawą prac Fondahla [52]. Podobnie jak metoda PERT, metoda CPM jest oparta na grafie skierowanym z wierzchołkami reprezentującymi zdarzenia oraz łukami opisującymi czynności. Choć metoda CPM została opracowana niezależnie, jest szczególnym przypadkiem metody PERT – takim, gdy wszystkie czasy wykonania procesów są deterministyczne.

O ile znaczenie praktyczne metod CPM i PERT z biegiem czasu zmniejszyło się, trzecia z klasycznych metod sieciowych – metoda PDM (ang. *The Precedence Diagramming Method*) nadal jest powszechnie używana [53], [54]. W 1961 roku Fondhal [52], chcąc uniknąć problemu NP-trudnego (ang. *a non deterministic polynomial time*) jakim jest narysowanie sieci dwupunktowej z minimalną liczbą sztucznych czynności, zaproponował model sieciowy sporządzany techniką jednopunktową (ang. *activity-on-node*). Z kolei pierwszy model sieciowy jednopunktowy z różnymi rodzajami relacji pomiędzy czynnościami: koniec-początek (ang. *Finish-to-Start*; FS), początek-początek (ang. *Start-to-Start*; SS), koniec-koniec (ang. *Finish-to-Finish*; FF), został zastosowany w programie firmy IBM [55]. Jednocześnie i niezależnie od prac Fondahla Bernard Roy opracował Metra Potential Method (MPM), która również była oparta na modelu jednopunktowym i zawierała minimalne i maksymalne opóźnienia czasu. Praktycznie te dwie metody: PDM i MPM, były takie same i dziś już ich się nie rozróżnia nazywając je metodą PDM [54].

Jednym z największych wyzwań występujących powszechnie w praktyce i stawianych badaczom w ramach organizacji pracy zbiorowej w inżynierii lądowej jest harmonizacja powtarzalnych przedsięwzięć. Ze względu na większą złożoność tych przedsięwzięć narzędzia tradycyjnie używane do planowania w budownictwie są nieodpowiednie do harmonizacji wykonania tego rodzaju projektów. Stąd też wiele publikacji naukowych jest poświęconych tematyce harmonizacji i harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, których przegląd został zawarty w następujących podrozdziałach niniejszej pracy.

3.2. Systematyka powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych

Zgodnie z przyjętym w polskiej literaturze podziałem przedsięwzięć budowlanych z uwagi na sposób modelowania można wyróżnić [4]:

- przedsięwzięcia typu kompleks operacji składające się ze zbioru procesów budowlanych o różnym charakterze i zakresie prac,
- przedsięwzięcia, które mogą być zrealizowane zgodnie z zasadami metody pracy równomiernej.

Wyróżnia się ponadto przedsięwzięcia typu produkcyjnego, realizowane w stałych lub tymczasowych zakładach produkcyjnych, do harmonogramowania których stosuje się metody wykorzystywane w przemyśle. Przedsięwzięciach te mogą być realizowane za pomocą metod potokowych, w których te same brygady robocze (w niezmiennym składzie osobowym) wykonują procesy budowlane na kolejnych obiektach lub ich wydzielonych częściach (działkach roboczych) w tej samej kolejności (cyklicznie, równomiernie i równolegle). Następny proces może być rozpoczęty po zakończeniu pracy poprzedniej brygady na danym obiekcie lub działce roboczej [4], [5], [31], [56].

Przedsięwzięcia, które mogą być realizowane za pomocą metod potokowych można podzielić na [4]:

- jednotypowe – występują, gdy można je podzielić na pewną liczbę działek o jednakowej wielkości, na których wykonuje się analogiczne konstrukcje oraz pozostałe zadania budowlane stosując jednakowe technologie,
- jednorodne – procesy znajdujące się w tych przedsięwzięciach cechują się jednakową technologią wykonania mimo, że ich zakres ilościowy może być różnych na poszczególnych działkach roboczych i jest proporcjonalny do ich wielkości,
- niejednorodne – są realizowane za pomocą jednakowej technologii, w których występują działki robocze o różnym zakresie ilościowym nakładów pracy, materiałów i sprzętu.

Podobny podział przedsięwzięć powtarzalnych można również znaleźć w literaturze anglojęzycznej w którym można wyróżnić przedsięwzięcia [36]: powtarzalne liniowe (ang. *repetitive linear*), powtarzalne nieliniowe (ang. *repetitive non-linear*) oraz niepowtarzalne (ang. *non-repetitive*). W Tabeli 3.1 podsumowano najistotniejsze cechy charakteryzujące poszczególne typy przedsięwzięć powtarzalnych.

Inny podział powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych został przedstawiony w publikacji [37]. Według niego przedsięwzięcia powtarzalne można sklasyfikować w trzech podstawowych grupach:

- liniowe poziome (ang. *linear horizontal*) – np. autostrady, rurociągi, tunele,

- nieliniowe pionowe (ang. *non-linear vertical*) – np. wysokościowce,
- nieliniowe rozproszone (ang. *non-linear scattered*) – np. osiedle domów wolnostojących, naprawy mostów.

Według jeszcze innej klasyfikacji [38] wyróżnia się przedsięwzięcia, które są powtarzalne ze względu na cykliczność prac (np. domy wolno stojące czy wysokościowce) oraz przedsięwzięcia, które są powtarzalne ze względu na układ geometryczny wznoszonych obiektów (np. autostrady i rurociągi).

Tabela 3.1. Typy przedsięwzięć powtarzalnych oraz ich cechy [za [36]]

Przedsięwzięcie	Powtarzalne liniowe	Powtarzalne nieliniowe	Niepowtarzalne
Nomenklatura anglojęzyczna	<i>repetitive linear</i>	<i>Repetitive non-linear</i>	<i>non-repetitive</i>
Wielkość działek roboczych	jednakowa	niejednakowa	niejednakowa
Ilość robót na działkach roboczych	jednakowa	jednakowa	niejednakowa
Wykorzystanie zasobów na działkach roboczych	jednakowe	niejednakowe	niejednakowe
Przepływ zasobów	równomierny	lekko wzburzony	wzburzony
Produkcja na działkę roboczą	jednakowa	niejednakowa	niejednakowa

W literaturze [57]–[59] można również odnaleźć systematykę wyróżniającą przedsięwzięcia powtarzalne na dwa rodzaje:

- typowe (ang. *typical*) – złożone z procesów, które posiadają taką samą ilość robót do wykonania i zużywają tyle samo zasobów na każdej powtarzalnej działce roboczej,
- nietypowe (ang. *non-typical* lub *atypical*) – złożone z procesów, które posiadają zmienną ilość robót do wykonania oraz wykorzystanie zasobów na każdej powtarzalnej działce roboczej.

Kolejny podział powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych został przedstawiony w artykule [60]. Wyróżnia on przedsięwzięcia powtarzalne:

- szeregowe (ang. *serial*) – każdy proces powtarzalny posiada tylko jeden proces poprzedzający i jeden następujący po nim,
- nieszeregowe (ang. *non-serial*) – procesy powtarzalne mogą mieć wiele procesów poprzedzających i następujących po nich.

Istnieje także jeszcze wiele innych klasyfikacji, które są uproszczeniem wyżej podanych lub ich kombinacją [61]–[63].

Przedsięwzięcia obejmujące powtarzalne procesy często w literaturze określa się mianem przedsięwzięć powtarzalnych, a nazwa ta nie wynika z powtarzalności

ich realizacji, bowiem przedsięwzięcia z natury są unikatowe, bądź celem ich realizacji jest unikatowy produkt.

3.3. Metodyka przeprowadzonych badań literaturowych

Kwerenda literaturowa została przeprowadzona według procedury zaczerpniętej z publikacji [64], [65]. Zakłada ona cztery kroki badań: zebranie materiałów źródłowych, analizę statystyczną zgromadzonych materiałów, zaklasyfikowanie materiałów do zdefiniowanych kategorii oraz analizę i ocenę zgromadzonych publikacji.

3.3.1. Materiały źródłowe

Zebranie materiałów źródłowych polegało na wpisaniu w wyszukiwarce bazy SCOPUS i Web od Science kombinacji słów „Schedul* AND construction AND repetitive” oraz wyszukaniu ich w tytułach, streszczeniach i słowach kluczowych (TITLE-ABS-KEY) zgromadzonych zasobów. Wyszukiwania zawężono do artykułów naukowych w języku angielskim, a wyłączono z nich publikacje książkowe oraz doniesienia konferencyjne. Następnie w poszukiwaniu pasujących do tematu badań publikacji przeszukiwano tytuły, streszczenia oraz słowa kluczowe wszystkich artykułów, które ukazały się w ośmiu najważniejszych czasopismach z zakresu Inżynierii przedsięwzięć budowlanych: *Journal of Construction Engineering and Management*, *Automation in Construction*, *Construction Management and Economics*, *Journal of Civil Engineering and Management*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, *Engineering, Construction and Architectural Management*, *International Journal of Project Management* i *International Journal of Construction Management*.

W wyniku przeprowadzonej kwerendy zidentyfikowano 216 artykułów dotyczących tematyki harmonizacji wykonania procesów budowlanych przedsięwzięć powtarzalnych. Po wstępnym zaznajomieniu się z wyselekcjonowanymi artykułami odrzucono 45 z nich ze względu na ich rozbieżność z tematem przeprowadzanego badania. Do pozostałych 171 artykułów dołączono najważniejsze publikacje polskojęzyczne dotyczące zagadnienia harmonizacji wykonania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Schemat przedstawiający proces selekcji publikacji na potrzeby przeprowadzanej kwerendy internetowej zamieszczono na rysunku 3.1.

3.3.2. Analiza statystyczna zgromadzonych materiałów

Pierwszy etap analizy statystycznej stanowiło zestawienie znalezionych materiałów z podziałem na czasopisma, w których się ukazały. Czasopismem, które miało największy wpływ na rozwój harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych jest *Journal of Construction Engineering and*

Management (55 publikacji). Okresem, w którym ukazało się najwięcej artykułów w tym czasopiśmie z rozważanego tematu, są lata 1998–2001. Drugim czasopiśmie co do liczby publikacji z tematyki pracy jest *Automation in Construction* z 20 artykułami. Najbardziej obfitym okresem tego czasopisma w publikacje z harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć powtarzalnych są lata 2009–2014. Szczegółowe zestawienie czasopism najwięcej publikujących w rozważanej tematyce zostało umieszczone na rysunku 3.2.

Autorem posiadającym najwięcej publikacji z zakresu harmonizacji wykonania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych jest Osama Moselhi z Concordia University. Opublikował on 12 artykułów z tego zakresu, które były cytowane 398 razy według bazy SCOPUS. Drugą osobą pod względem liczby publikacji z rozważanej tematyki jest Khaled El-Rayes z University of Illinois at Urbana-Champaign z 10 publikacjami cytowanymi w bazie SCOPUS 343 razy. Innymi autorami posiadającymi wiele publikacji z tej problematyki są: David Arditi (Illinois Institute of Technology), Xin Zou (North China Electric Power University), Tarek Hegazy (University of Waterloo), Gunnar Lucko (Catholic University of America), Onur Behzat Tokdemir (Middle East Technical University) oraz Lihui Zhang (North China Electric Power University). Szczegółowe zestawienie autorów rozwijających tematykę harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych znajduje się na rysunku 3.3.

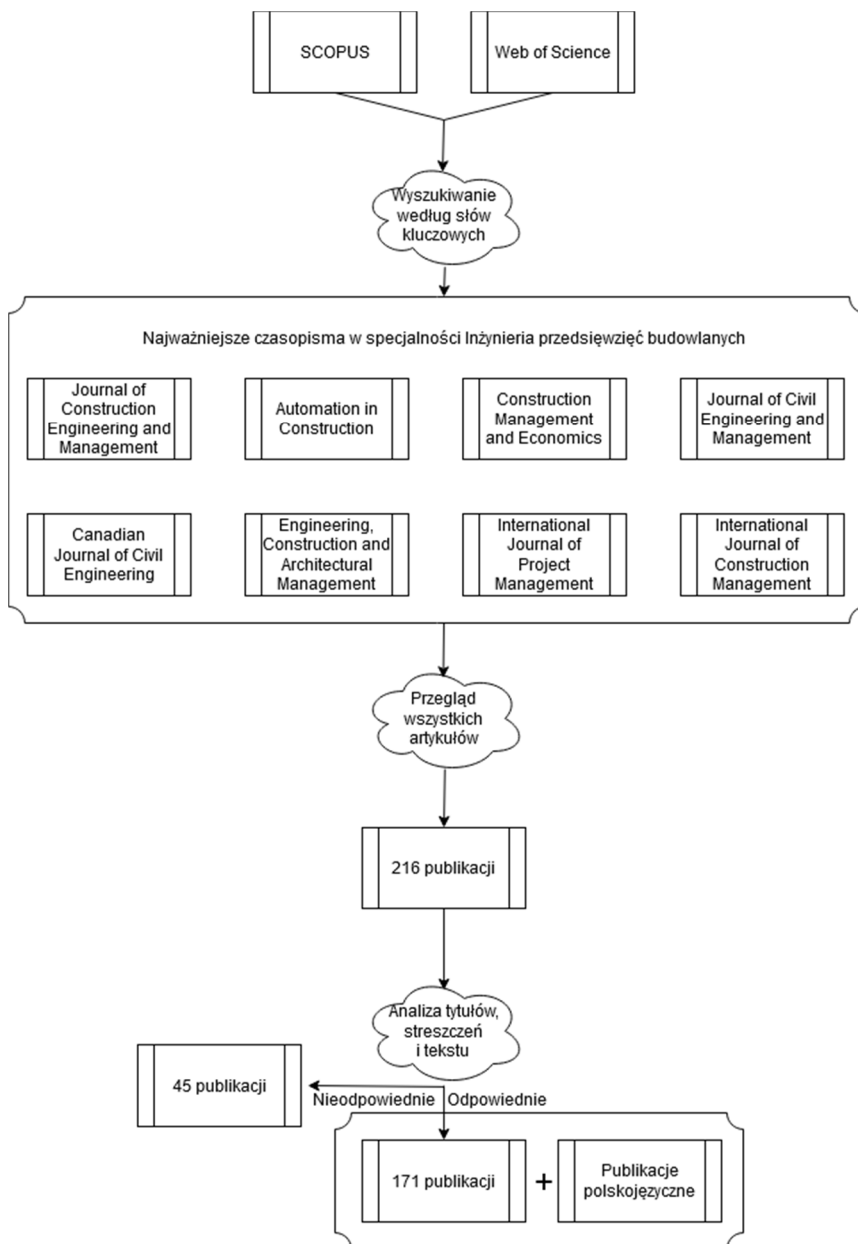
Publikacje dotyczące harmonizacji powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych pochodzą głównie ze Stanów Zjednoczonych Ameryki (56 artykułów). Kolejnym krajem wywierającym znaczący wpływ na rozwój metod i narzędzi służących harmonogramowaniu powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych jest Kanada z 22 publikacjami. Wiele takich publikacji pochodzi także z Tajwanu, Egiptu i Polski. Szczegółowe zestawienie artykułów z rozważanej problematyki ze względu na kraj pochodzenia znajduje się na rysunku 3.4.

3.3.3. Taksonomia znalezionych publikacji

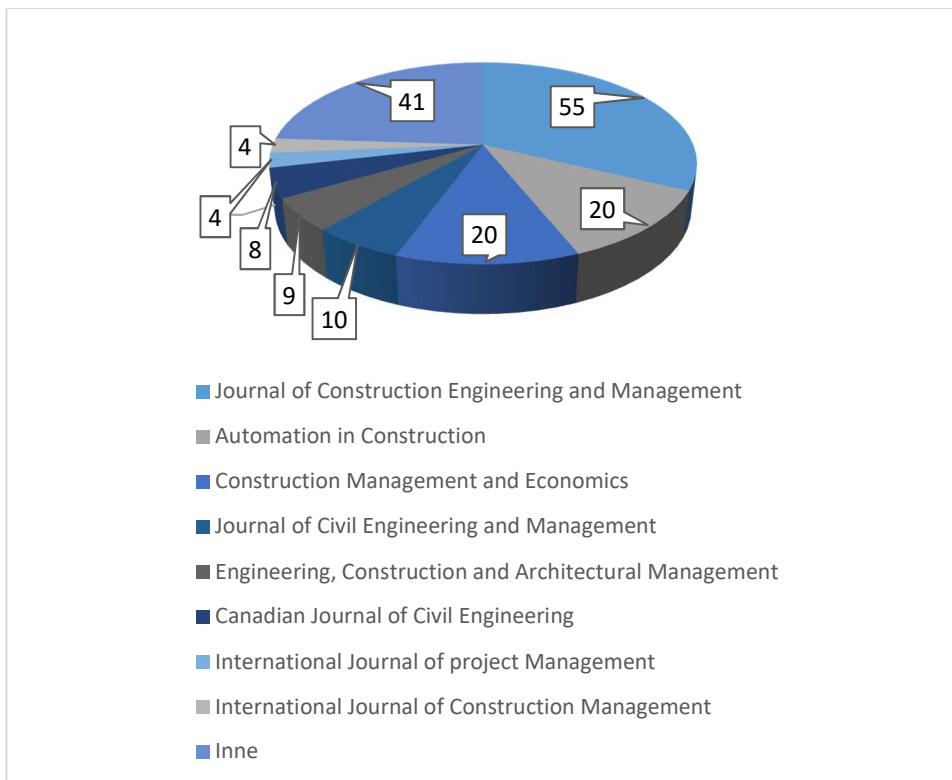
W celu uporządkowania znalezionych publikacji zostały one sklasyfikowane w następujących kategoriach:

- tradycyjne metody i narzędzia harmonogramowania przedsięwzięć powtarzalnych,
- harmonogramowanie budowlanych przedsięwzięć powtarzalnych zorientowane na zasoby,
- zwiększanie niezawodności oraz odporności harmonogramów na zdarzenia losowe,
- minimalizacja czasu wykonywania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych,
- minimalizacja kosztu realizacji powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego,

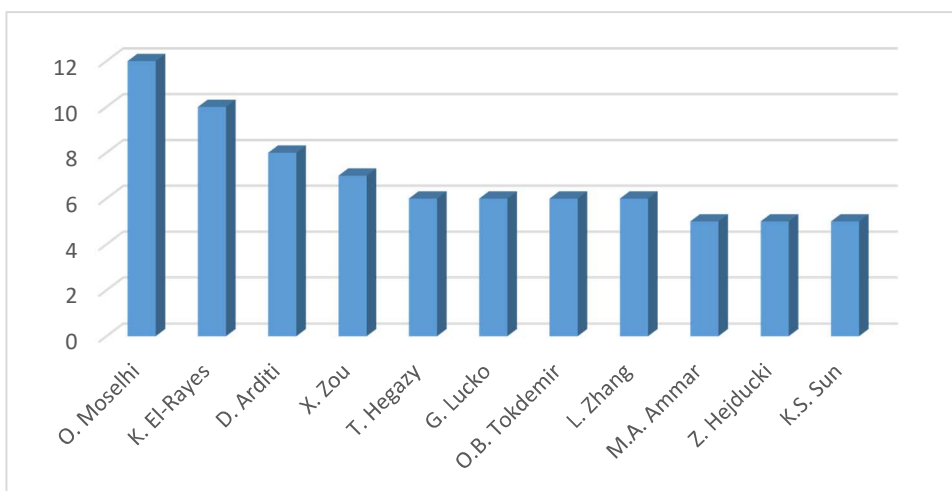
- pozostałe podejścia do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych.



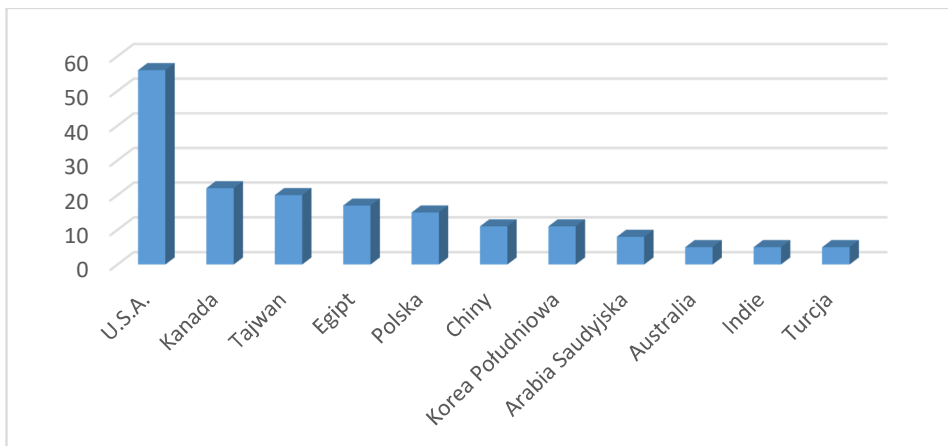
Rysunek 3.1. Schemat obrazujący proces zbierania materiałów na potrzeby studiów literaturowych



Rysunek 3.2. Zestawienie czasopism najczęściej publikujących w rozważanej tematyce



Rysunek 3.3. Zestawienie autorów najczęściej publikujących w rozważanej tematyce



Rysunek 3.4. Zestawienie krajów pochodzenia publikacji z rozważanej tematyki

Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii zostało zamieszczone w Tabeli A.1. w Załączniku A.

Oprócz prezentowanych w wyżej wymienionych pracach rozwinięć specyficznych modeli problemów harmonogramowania, do ich rozwiązania były stosowane różne podejścia i metody. Ze względu na fakt, że prezentowane problemy cechuje duża złożoność obliczeniowa (szczególnie dotyczy to problemów praktycznych), w celu rozwiązania zagadnienia często wykorzystuje się algorytmy metaheurystyczne. Taksonomię algorytmów metaheurystycznych przedstawiono na rysunku 3.5 [66], [67].

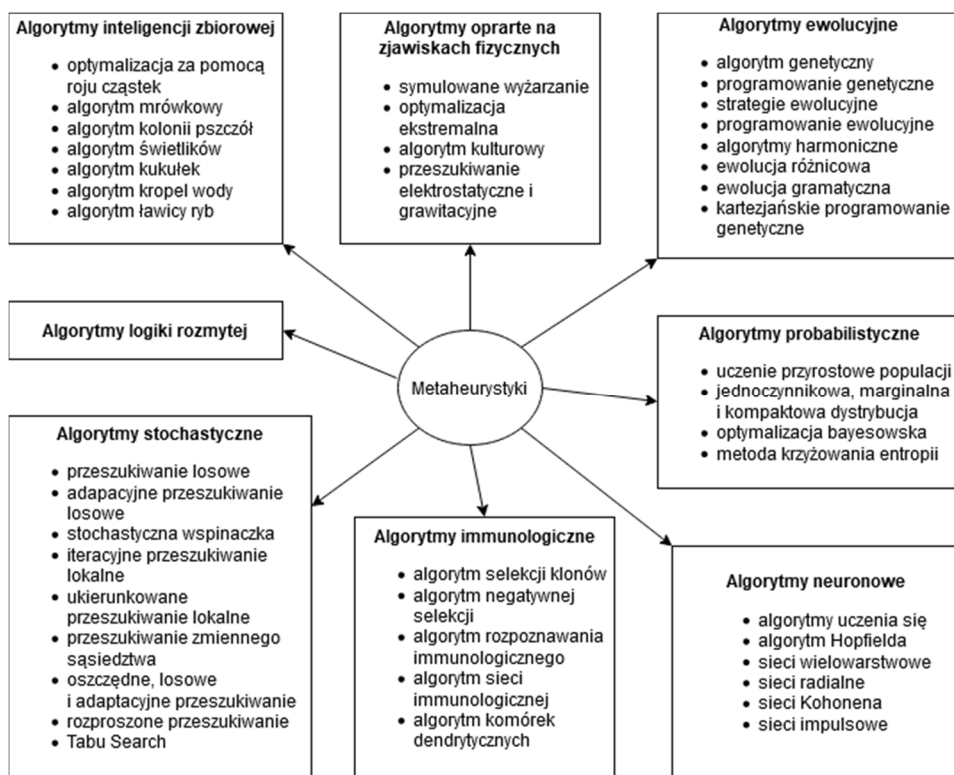
Warto zwrócić uwagę, że większość publikacji traktuje harmonogramowanie budowlanych przedsięwzięć budowlanych kompleksowo, z uwzględnieniem wielu ograniczeń i celów optymalizacji, i mogłoby znaleźć się w wielu zdefiniowanych kategoriach. Przydział artykułów do poszczególnych kategorii jest często subiektywny i wynika z analizy wskazywanych jako zasadnicze celów publikacji przez ich autorów.

3.3.4. Analiza i ocena zgromadzonych publikacji

3.3.4.1. Adaptacja tradycyjnych metod i narzędzi harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych

Część autorów analizowanych publikacji próbowała dostosować klasyczne narzędzia zarządzania przedsięwzięciami do planowania przedsięwzięć powtarzalnych. Już w 1984 roku Jaafari [68] dowodził słuszności stosowania metody CPM do planowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych i deprecjonował krytykę tej metody w zarządzaniu takimi przedsięwzięciami.

Jednak był to jeden z nielicznych głosów za stosowaniem metody CPM w przedsięwzięciach powtarzalnych – zdecydowana większość badaczy opowiadała się przeciwko temu [69]–[73]. O’Brien, Kreitzberg i Mikes [74] rozwinęli metodę CPM i dostosowali ją do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych i zobrazowali to na przykładzie budowy King Khalid Military City Housing. Dostosowywaniem metody CPM do przedsięwzięć liniowych zajmowano się również w pracy [75]. Z pracy Cole’a [71] wynika, że metoda CPM daje najlepsze wyniki dla przedsięwzięć niepowtarzalnych, natomiast dla przedsięwzięć powtarzalnych bardziej odpowiednie są inne metody, które określił mianem liniowych (np. Line of Balance). Rozwinięcia metody CPM do planowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych podejmowane było także w pracach [76]–[79].



Rysunek 3.5. Taksonomia algorytmów metaheurystycznych (na podstawie [66], [67])

Większość tradycyjnych metod wykorzystywanych do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych należy do grupy metod liniowych, które w odróżnieniu od innych klasycznych narzędzi planowania od początku zostały stworzone z myślą o wsparciu zarządzania w przedsięwzięciach

powtarzalnych. Jedną z nich jest metoda Line-of-Balance (LOB), która została opracowana w firmie Goodyear we wczesnych latach 40. XX wieku, a następnie zaadaptowana przez marynarkę Stanów Zjednoczonych we wczesnych latach 50. Wykres LOB przedstawia powtarzające się procesy jako pojedynczą linię na wykresie. W odróżnieniu od wykresu Gantta, który pokazuje czas realizacji procesu, wykres LOB (nachylenie jego odcinków względem osi czasu) narzuca wymaganą wydajność brygad realizujących procesy w celu spełnienia założonego terminu dyrektywnego. Wykres LOB wizualizuje także związki pomiędzy kolejnymi procesami.

Arditi i Albulak [80] wykorzystali metodę LOB do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Wskazali także zalety tej metody, takie jak: umożliwienie lepszego zobrazowania zależności i ograniczeń między procesami przedsięwzięcia niż w jakakolwiek innej technice harmonogramowania, możliwość modyfikowania wydajności (i tym samym składów) brygad w celu zapewnienia przepływu zasobów w najbardziej efektywny sposób. Wskazano także niedociągnięcia tej metody w trakcie stosowania w budownictwie, między innymi wrażliwość metody na niedokładne określenie wydajności procesów, którego negatywne skutki są powiększane z coraz większą powtarzalnością na kolejnych działkach roboczych. Sarraj [81] matematycznie sformalizował metodę LOB, przez co przestała być metodą tylko graficzną i nie było konieczności rysowania diagramu. Gouda, Hosny i Nassar [82] rozwinęli metodę LOB poprzez opracowanie algorytmu optymalizującego przydział wielozawodowych brygad z zachowaniem ciągłości ich pracy. Funkcjonalność nowej metody została zobrazowana na przykładzie budowy czterokilometrowego odcinka rurociągu ściekowego.

Arditi, Tokdemir oraz Suh [83] wskazali bariery ograniczające możliwość stosowania oraz zaproponowali kierunki doskonalenia tej metody. Były to między innymi: poprawa wizualizacji wykresów LOB, wdrożenie analizy kosztowej, wprowadzenie krzywych uczenia się oraz możliwości przyspieszenia realizacji wybranych procesów, zdefiniowanie nowego rodzaju krytyczności procesów, aplikacja sposobów radzenia sobie z procesami niepowtarzalnymi, ograniczeniami dostępnych zasobów oraz wynikających z kamieni milowych, zdefiniowanie powiązań między czasem i miejscem realizacji procesów oraz opracowanie nowego algorytmu umożliwiającego skrócenie czasu realizacji przedsięwzięcia. Opracowali także modyfikacje metody LOB odpowiadające na większość z postawionych wcześniej wyzwań [84], [85]. Ali i Elazouni [86] opracowali metodę CPM/LOB pozwalającą na maksymalizację zysku będącego funkcją wynagrodzenia oraz kosztów bezpośrednich, pośrednich, kosztu zatrudnienia dodatkowych zasobów oraz premii za wcześniejsze zakończenie budowy. Rozwój metody LOB w harmonizacji powtarzalnych procesów podejmowany był także w pracy [62], [87]–[91].

Inną rozpowszechnioną metodą liniową jest the Linear Scheduling Method (LSM). Chrzanowski i Johnston [69] zastosowali ją do harmonogramowania

przedsięwzięcia drogowego Research Triangle Park w Północnej Karolinie. Wskazali zalety tej metody, takie jak m.in. łatwość stosowania oraz kontrolowania progresu robót. Autorzy podkreślili także wady tej metody, a w szczególności trudność uwzględnienia procesów niepowtarzalnych, które sporadycznie występują także w przedsięwzięciach powtarzalnych. Ważnym rozwinięciem metody LSM było umożliwienie wyznaczenia i kontrolowania drogi krytycznej przedsięwzięcia zaproponowane w pracy [73]. Taki ciąg procesów (lub ich fragmentów), podobnie jak w metodzie CPM, znacząco ułatwia zarządzanie przedsięwzięciem budowlanym oraz rozszerza wachlarz możliwych zastosowań metody LSM.

W [72] Harris i Ioannou opracowali metodę RSM (ang. *the Repetitive Scheduling Method*), która wspomagała planowanie przedsięwzięć powtarzalnych. Wprowadzili oni pojęcie ciągu kontrolnego (ang. *controlling sequence*), definiowanego za pomocą punktów kontrolnych, który ma takie samo znaczenie praktyczne jak ścieżka krytyczna w metodzie CPM. Mattila i Park [92] wykazali, że metoda LSM Harmelinka i Rowingsa oraz metoda RSM definiują tę samą drogę krytyczną dla prostych przedsięwzięć powtarzalnych. Porównanie metod liniowych (RSM i LSM) z metodą LOB zostało zamieszczone w publikacji [93].

Yang i Ioannou [94] opracowali i oprogramowali algorytm metody RSM, dzięki czemu niepotrzebne stało się żmudne przygotowywanie konwencjonalnych graficznych modeli LOB oraz umożliwiło to kierownikom budów szybkie testowanie różnych wariantów realizacji. Rozmyte rozwinięcie metody RSM zaproponowali Maravas i Pantouvakis [95]. Możliwe wielkości działek oraz zróżnicowanie w wydajnościach brygad zostało opisane za pomocą zbiorów rozmytych. Dużą zaletą zaprezentowanego podejścia, w odróżnieniu od podejścia deterministycznego, jest uwzględnienie ryzyka przy planowaniu przedsięwzięć. Kolejne rozwinięcie metody RSM zaproponowano w publikacji [96].

W 1949 roku Dyżewski [31] przedstawił koncepcję Metody pracy równomiernej (MPR), którą następnie rozwijał Rowiński [5]. MPR jest adaptacją przemysłowej metody produkcji, a wszystkie procesy podstawowe przedsięwzięcia powinny być realizowane w czasie równym rytmowi pracy równomiernej bądź jego wielokrotności.

Hejducki i Mrozowicz [34], [35], [97], rozwijając podejście zaproponowane przez Afanaseva [33], opracowali metody sprzężeń czasowych. W tej grupie metod powiązania technologiczne, zasobowe, organizacyjne pomiędzy procesami i działkami roboczymi zostały zamodelowane w postaci sprzężeń czasowych. Modele TCM są zadaniami jednokryterialnymi minimalizującymi czas realizacji przedsięwzięć z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń: w TCM I – brak przestojów w pracy brygad roboczych, TCM II – brak przestojów w pracy na działkach roboczych, TCM III – sprzężenia pomiędzy frontami robót i środkami produkcji. TCM IV, V i VI uwzględniają minimum czasu i dodatkowe sprzężenia diagonalne i odwrotnie diagonalne. Opracowane

algorytmy proponowanych metod umożliwiają wyznaczenie optymalnych uszeregowień działek roboczych.

Innymi tradycyjnymi podejściami opracowanymi do harmonizacji powtarzalnych procesów budowlanych były m.in.: metoda RPM [70], metoda MLS [98], system POLO [99], metoda GSM [100], system UPSS [101] czy metoda BRSM [102].

3.3.4.2. *Harmonogramowanie budowlanych przedsięwzięć powtarzalnych zorientowane na zasoby*

Harmonogramy były pierwotnie rozwijane jako narzędzie harmonizacji pracy zbiorowej. Równomierna, nieprzerwana praca zasobów jest niezwykle istotna dla menedżera każdego przedsięwzięcia. Stąd tak duże zainteresowanie tą tematyką w harmonogramowaniu budowlanych przedsięwzięć budowlanych.

W harmonogramowaniu przedsięwzięć z uwzględnieniem zasobów można wyróżnić dwa podstawowe problemy: problem z ograniczonymi zasobami (ang. *resource-constrained project scheduling problem*; RCPSP) oraz problem wyrównania zasobów (ang. *resource levelling problem*; RLP). Jeśli podejmowanie problemu RCPSP było wyraźnie podkreślone w publikacji, to została ona przyporządkowana do tej kategorii analizowanej w niniejszym rozdziale, mimo faktu, że optymalizowane były różne inne kryteria.

Większość autorów publikacji podejmowało temat harmonizacji pracy zasobów dążąc do zapewnienia ciągłości ich zatrudnienia. Dla przykładu, El-Rayes i Moselhi [103] opracowali dwuetapowy algorytm harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. W pierwszym etapie algorytmu dąży się do spełnienia ograniczeń dostępności zasobów i relacji kolejnościowych przedsięwzięcia, a w drugim – do zapewnienia ciągłości pracy brygad. W tym celu dopuszczono umożliwienie przerywania realizacji procesów, aby zredukować czas wykonania projektu. Podobny dwuetapowy algorytm został wykorzystany do ustalenia optymalnego składu brygad [104]. Z kolei Bonnal *et al.* [105] zastosowali relacje logiczne Allena w celu ciągłej pracy brygad. Huang i Sun [106]–[108] stworzyli metodę planowania i harmonogramowania, w której zastosowano podejście polegające na identyfikacji grup powtarzalnych procesów. Każda grupa procesów powtarzalnych nie dzieli się na działki robocze, lecz grupy powtarzalnych procesów. Metoda ta pozwala zredukować czas realizacji przedsięwzięcia i zachować ciągłość pracy brygad. Do znalezienia rozwiązania problemu opracowano algorytm heurystyczny. Garcia-Nieves, Ponz-Tienda i Salcedo-Bernal [109] opracowali metodę harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych z ograniczonymi zasobami zapewniającym ciągłość ich pracy. Nowością w tej pracy jest uwzględnienie różnych możliwych trybów realizacji poszczególnych procesów przez brygady. Dzięki temu możliwe stało się lepsze planowanie realizacji powtarzalnych

przedsięwzięć. Ammar [59] opracował modyfikację metody LOB z minimalizacją czasu realizacji przedsięwzięcia oraz umożliwieniem nieciągłości realizacji powtarzalnych procesów przy jednoczesnym zachowaniu ciągłości pracy zasobów. Zapewnienie ciągłości pracy brygad w budowlanych przedsięwzięciach powtarzalnych było przedmiotem badań również w pracach [110]–[112].

Część badaczy przyjęła inną strategię alokacji zasobów i nie wprowadzała warunku ciągłości pracy, lecz analizowała efektywność zastosowania różnych sposobów redukcji przestoju. Przykładowo, Vanhoucke [113] opracował algorytm poszukujący optymalnego kompromisu pomiędzy czasem wykonywania przedsięwzięcia i ciągłością pracy zasobów. Kang *et al.* [114] opracowali model matematyczny wspomagający kierownictwo budowy w wyznaczeniu odpowiedniej liczby działek roboczych i minimalizujący straty spowodowane przerwami w pracy brygad. Altuwaim i El-Rayes [115] opracowali model matematyczny minimalizujący koszt przerw w pracy brygad (a jednocześnie ich czas trwania i czas realizacji przedsięwzięcia). Z kolei Tomczak i Jaśkowski [116] opracowali model matematyczny problemu redukcji przestoju w pracy zatrudnionych brygad własnych generalnego wykonawcy dzięki zatrudnianiu brygad podwykonawców. Hassan i El-Rayes [60] opracowali model harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć powtarzalnych w celu analizy i ilościowego określenia wpływu wszelkich nieoczekiwanych opóźnień w realizacji procesów na wielkość przestoju.

Podejście do wyrównywania zasobów zaproponowane zostało m.in. w pracy [117]. W tej publikacji do znalezienia rozwiązania problemu wykorzystano algorytm genetyczny, a użyteczność opracowanego podejścia przedstawiono na przykładzie budowy autostrady. Z kolei Damci, Arditi i Polat [118], [119] zaproponowali sposób wyrównywania zasobów stanowiący rozwinięcie metody LOB z wykorzystaniem pojęcia „naturalnego rytmu” (ang. *naural rhythm*). W tym sposobie ustala się optymalną liczebność brygady, zamiast charakterystycznego dla metody LOB stosowania wydajności. Efekty zastosowania tej metody była zobrazowana na przykładzie budowy rurociągu. Wyrównywaniem zużycia zasobów w metodzie LOB zajmował się również Ammar [120], który zaproponował podejście do poszukiwania kompromisu między czasem realizacji a stopniem wyrównania zapotrzebowania na zasoby.

Z problemem wyrównania zapotrzebowania na zasoby, w którym często minimalizuje się maksymalny poziom zatrudnienia zasobów, wiąże się problem ustalania składów liczbowych brygad. Dhanasekar [121] minimalizował zatrudnienie pracowników, rozumiane jako najmniejsza możliwa liczba pracowników niezbędna do wykonania przedsięwzięcia w zdefiniowanym terminie, z wykorzystaniem teorii kolejek. Zobrazował także korzyści ze stosowania swojego modelu na przedsięwzięciu składającym się z 320 obiektów.

Kolejnym zagadnieniem podejmowanym w literaturze przedmiotu jest problem harmonogramowania przedsięwzięć powtarzalnych z uwzględnieniem dostępności frontu robót. Problem ten analizowali m.in. Thabet i Beliveau [122],

którzy uwzględnili w proponowanej przez nich metodzie parametry żądania frontu robót, ciągłości pracy brygad roboczych oraz zróżnicowanie ich wydajności. Dodatkowo, autorzy uwzględniają ciągłość pracy i zmienną produktywnością brygad. Rozszerzeniem tej pracy poprzez dopuszczenie korzystania z różnych zbiorów zasobów dla różnych procesów jest publikacja [123]. Kwestię nadmiernej liczebności brygad na ograniczonej wielkości frontu robót i jej wpływu na wydajność jej pracy uwzględniono w [124]. W celu rozwiązania tego problemu opracowano niezdominowany genetyczny algorytm sortowania II (NSGAI), zmodyfikowany poprzez zintegrowanie go z mechanizmem wzorowanym na elektromagnetyzmie, NSGAI-EM.

Lu i Li [125] opracowali metodę RACPM (ang. *Resource-Activity Critical Path Method*), która integruje podejście ukierunkowane na procesy, znane z metody CPM z podejściem zorientowanym na zasoby. Yang i Chang [126] opracowali stochastyczny system wspomagający harmonogramowanie powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, uwzględniający ograniczenia w dostępności zasobów oraz niepewność związaną z łańcuchem dostaw. Poprawność zaproponowanego modelu zweryfikowano za pomocą analizy symulacyjnej Monte Carlo.

Problem harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych zorientowanych na zasoby podejmowano także w pracach [29], [127]–[131].

3.3.4.3. Zwiększanie niezawodności dotrzymania planowanych terminów realizacji

Część autorów publikacji z zakresu harmonogramowania przedsięwzięć powtarzalnych próbowało zwiększyć niezawodność dotrzymania planowanych terminów realizacji, poprzez bardziej precyzyjne modelowanie wydajności zatrudnionych brygad. Ma to szczególne znaczenie w przedsięwzięciach powtarzalnych, w których powtarzające się niedokładności i błędy kumulują się w znaczne rozbieżności między planowanym scenariuszem realizacji projektu a rzeczywistym przebiegiem realizacji.

Zauważono, że brygady przechodząc z jednej działki roboczej na kolejną wciąż wykonując te same procesy zwiększają swoją wydajność. Zjawisko to nazwano uczeniem się brygad. Pierwsze próby uwzględnienia tego zjawiska przedstawiono w pracach Naresha i Jahrena [132] z zakresu harmonogramowania budowy obiektów z zakresu inżynierii morskiej. Autorzy przeprowadzili analizę wrażliwości w celu wskazania procesów, które bardziej wpływają na czas realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Z kolei Lam, Lee i Hu [133] badali wpływ efektu uczenia się, ale także i zapominania, na czas realizacji przedsięwzięcia budowlanego oraz wskazali wiele korzyści płynących z ich uwzględnienia w planowaniu czasowym i kosztowym. Couto i Teixeira [134] do modelowania procesów uczenia się zastosowali dwa modele ze współzrędnymi

logarytmicznymi i badali ich użyteczność w planowaniu wykonania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Oba modele okazały się użyteczne, lecz wskazano obszary, które wymagają dalszego doskonalenia (m.in. prognozowanie wystąpienia nieprzewidzianych zdarzeń). Zhang, Zou i Kan [135] opracowali model przydziału brygad z uwzględnieniem efektu uczenia się spełniający ograniczenia ciągłości pracy brygad oraz nieprzekroczenia terminu dyrektywnego przedsięwzięcia. Jordan Srour, Kiomjian i Srour [136] opracowali narzędzie optymalizacyjne szacowania czasu wykonania procesów powtarzalnych z uwzględnieniem efektu uczenia się. Zastosowanie opracowanego narzędzia pozwoliło na obniżenie kosztów robocizny o 28%.

Rozwinięcia metody LOB poprzez uwzględnienie efektu uczenia się zaproponowano w pracach [137]–[139]. Biruk i Rzepecki [140] badali wpływ tego efektu na uzyskiwane wyniki w badaniach symulacyjnych.

W celu zwiększenia dokładności oszacowań czasów wykonania procesów powtarzalnych, przy modelowaniu wydajności pracy brygad uwzględniano również inne czynniki wpływające na jej wielkość, nie tylko efekt uczenia się. Przykładowo, Duffy et al. [141] opracowali program Velocity 1.0, w którym uwzględnili wpływ terminu realizacji oraz lokalizacji na wydajność pracy brygad realizujących powtarzalne procesy. Baqerin, Shafahi i Kashani [142] wykorzystali model oceny i prognozowania Weibull do szacowania wydajności pracy brygad i czasu wykonania procesów oraz przedsięwzięć powtarzalnych. Moreno *et al.* [143] opracowali metodę Fixed Start Scheduling – która, poprzez kontrolę terminów rozpoczynania realizacji procesów – ma zapewnić nieprzekraczanie terminu dyrektywnego zakończenia przedsięwzięcia. Rozpatrywana metoda została zastosowana do planowania realizacji dwóch przedsięwzięć, a jej wyniki zostały porównane z metodami CPM i PERT. Pozwoliła ona na zmniejszenie zmienności planowanego czasu realizacji przedsięwzięcia i zwiększyła prawdopodobieństwo jego wykonania przed terminem dyrektywnym. Zhang *et al.* [144] zaproponowali nową miarę odporności harmonogramu wyrażającą jego zdolność do absorpcji nieprzewidywanych zakłóceń losowych negatywnie oddziałujących na terminowość realizacji robót. Wyniki badań przeprowadzonych przez autorów potwierdziły konieczność oceny odporności harmonogramu jako istotnego czynnika przy planowaniu powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Lucko [145] opracował metodę PSM (ang. *Productivity Scheduling Method*) opartą na funkcjach osobliwych modelujących zmienną wydajność brygad realizujących procesy budowlane. Z kolei Su i Lucko [146] rozwinęli tę metodę wykorzystującą funkcje osobliwe do opisanego przydziału brygad do procesów, stopnia ich wykorzystania oraz harmonizacji pracy wielu brygad.

Wielu badaczy próbowało zwiększyć niezawodność dotrzymania planowanych terminów realizacji powtarzalnych procesów i odporność harmonogramów na zdarzenia losowe poprzez wprowadzenie buforów czasu w harmonogramach. Przykładowo, Rogalska i Hejducki [147] wprowadzili

bufory „feeding” oraz „project” (wprowadzone w koncepcji łańcucha krytycznego przez Goldratta) i badali wpływ ich wielkości na całkowity czas realizacji przedsięwzięcia. Z kolei Gonzalez, Alcaron i Molenaar [148] zastosowali bufory w celu minimalizacji negatywnego wpływu zmiennej wydajności pracy brygad. Zalety opracowanej przez nich koncepcji zostały przedstawione na dwóch przykładach. Bakry, Moselhi i Zayed [149] opracowali system optymalizujący harmonogram ze względu na czas i koszt w warunkach ryzyka. W celu zwiększenia niezawodności dotrzymania dyrektywnego terminu zakończenia harmonogramu wprowadzono bufory czasu. Dzięki zastosowaniu teorii zbiorów rozmytych do opracowania takiego harmonogramu nie są potrzebne analizy statystyczne danych historyczne z realizacji poprzednich przedsięwzięć. Lee, Lee i Son [150] wprowadzili trzy rodzaje buforów (czasu, miejsca i czynności) niwelujące błędy niedokładności w identyfikacji i opisie relacji pomiędzy procesami.

Problematyka zwiększania niezawodności dotrzymania planowanych terminów realizacji procesów powtarzalnych była również przedmiotem prac: [151]–[153].

3.3.4.4. Minimalizacja czasu wykonywania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych

Minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia jest kluczowym problemem harmonogramowania. Niedotrzymanie terminów umownych nie tylko wiąże się z płaceniem kar przez wykonawcę robót budowlanych, lecz także świadczy o złym zarządzaniu budową. Z tego względu minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia jest jednym z najczęściej podejmowanych zagadnień z zakresu wspomagania zarządzania powtarzalnymi przedsięwzięciami budowlanymi.

Szczególnie istotnym przy minimalizacji czasu realizacji budowlanego przedsięwzięcia powtarzalnego jest sposób rozwiązania tego problemu decyzyjnego i opracowywanych modeli. Stosowane są w tym celu algorytmy dokładne oraz coraz częściej algorytmy heurystyczne i metaheurystyczne – ze względu na dużą złożoność obliczeniową problemów praktycznych. Jednym z najpopularniejszych algorytmów wykorzystywanych do znajdowania pseudo optymalnych rozwiązań problemów harmonogramowania przedsięwzięć powtarzalnych są algorytmy ewolucyjne. Dla przykładu Leu i Hwang [154] wykorzystali algorytm genetyczny do znajdowania rozwiązań modelu minimalizującego czas produkcji prefabrykatów z uwzględnieniem współdzielenia zasobów (np. żurawi czy deskowań), dzięki czemu stało się możliwe lepsze wykorzystanie posiadanego potencjału produkcyjnego. Z kolei Nassar [155] wykorzystał algorytm genetyczny do optymalnego przydziału zasobów w harmonogramowaniu powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych w celu minimalizacji czasu jego realizacji i redukcji przerw w pracy brygad. Hsie

et al. [156] wykorzystali strategie ewolucyjne do rozwiązania opracowanego modelu, w którym dokonali podziału przedsięwzięcia na działki nie w sposób przestrzenny, lecz ze względu na nakład pracy. Model ten minimalizuje czas wykonania przedsięwzięcia z uwzględnieniem dostępności zasobów i zapewnieniem ciągłości ich pracy.

Niektórzy autorzy wykorzystywali proste heurystyki do znalezienia pseudooptymalnego rozwiązania problemów minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięć powtarzalnych. Przykładowo, Zhang, Li i Tam [157] wykorzystali procedurę permutacyjną opartą na drzewach do wyznaczenia wszystkich wariantów rozwiązania, a następnie prostą heurystykę do wyznaczenia rankingu poszczególnych rozwiązań. Ich metoda harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych uwzględnia ograniczoną dostępność zasobów oraz umożliwia uwzględnienie wielu wariantów realizacji procesów.

Z kolei Tran, Chou i Luong [158] wykorzystali do optymalizacji harmonogramu hybrydowy algorytm nazywany rozmytym podejściem do grupowania sztucznych kolonii pszczół (ang. *the fuzzy clustering artificial bee colony*). Wyniki badań eksperymentalnych wskazały, że proponowana metoda daje średnio najkrótszy czas realizacji przedsięwzięcia oraz najmniejsze odchylenie optymalnego rozwiązania spośród rozpatrywanych algorytmów wzorcowych.

Jedną ze strategii do rozwiązania problemu harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych jest sformułowanie zagadnienia w postaci modelu liniowego i rozwiązanie go za pomocą jednego z powszechnie dostępnych solverów. Taką metodę wybrali Liu i Wang [159], którzy minimalizowali czas realizacji przedsięwzięcia z uwzględnieniem wielozadaniowości brygad. Zastosowane podejście pozwoliło na poprawę ciągłości pracy brygad.

Russell i Caselton [160] sformułowali zagadnienie harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych w formie modelu zadania programowania dynamicznego. Przeprowadzili ponadto analizę różnych rozwiązań suboptymalnych w celu identyfikacji harmonogramów w większym stopniu spełniających oczekiwania decydenta.

Z kolei Biruk i Jaśkowski [161] zaadaptowali do modelowania problem przepływowy, znany z inżynierii produkcji powtarzalnych przedsięwzięć przemysłowych. Opracowany model rozwiązali za pomocą algorytmu najkrótszego cyklu Hamiltona. Autorzy wskazali także wiele korzyści płynących z zastosowanego podejścia.

Natomiast Fan i Tserng [162] zaimplementowali przy modelowaniu przedsięwzięć relacje miękkie pomiędzy procesami w celu minimalizacji czasu ich realizacji i zapewnienia ciągłości pracy zasobów. Z kolei Cho, Hong i Hyun [163] opracowali podejście zwiększające wykorzystanie dostępnych frontów robót w celu zwiększenia wydajności pracowników i jednoczesnego skrócenia czasu realizacji przedsięwzięcia. Bakry, Moselhi i Zayed [164] opracowali system

komputerowy wspomagający redukcję czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych. System ten dokonuje podziału procesów na mniejsze części i wskazuje fragmenty procesów, których skrócenie czasu realizacji przynieść może największy efekt. Do realizacji tych fragmentów można przydzielić dodatkowe zasoby lub zastosować jeden z następujących sposobów: nadgodziny pracownicze, pracę dwuzmianową, pracę w weekendy, zwiększenie liczby brygad. Z kolei Lee *et al.* [165] w celu redukcji czasu realizacji powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych wykorzystali metody TACT oraz enhanced-TACT (które są rozwinięciem metody LOB). W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że zastosowanie tych metod pozwala na skrócenie czasu wykonania analizowanych przedsięwzięć budowlanych o 25% (około 53 dni).

Minimalizacja czasu powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego była też głównym celem publikacji następujących autorów: Hassanein i Moselhi [166], Lucko, Said i Bouferguene [167], Podolski [168], Radziszewska-Zielina i Sroka [169], Suresh, Dutta i Jain [170], Zhang i Qi [171].

3.3.4.5. Minimalizacja kosztu realizacji powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego

Drugim istotnym kryterium optymalizacji harmonogramów budowlanych jest minimalizacja kosztu realizacji przedsięwzięcia. Poszukiwanie oszczędności na etapie realizacji przedsięwzięcia jest ważnym aspektem zarządzania i może znacząco wpływać na ocenę jakości opracowanych planów realizacyjnych. Z tego względu zagadnienie to było często podejmowane przez badaczy w wielu badaniach.

Do jednej z pierwszych prac z tego zakresu można zaliczyć artykuł [172]. Autorzy opracowali model programowania dynamicznego w celu minimalizacji kosztu realizacji przedsięwzięcia z uwzględnieniem wpływu pogody oraz krzywej uczenia się. Na przykładzie zilustrowano wpływ uwzględnionych czynników na koszt budowy i porównano z badaniami, w których optymalizowano czas realizacji przedsięwzięcia. Wykazano także, że minimalizacja czasu wykonania przedsięwzięcia nie gwarantuje osiągnięcia minimum kosztu realizacji budowy. Rozwinięciem tego podejścia, wspomagającym planistów w podejmowaniu decyzji, jest praca [173].

Hegazy i Wassef [174] w celu minimalizacji całkowitego kosztu realizacji przedsięwzięcia opracowali model uwzględniający synchronizację brygad i zapewnienie ciągłości ich pracy zintegrowany z metodami CPM i LOB. Do jego rozwiązania zastosowali algorytm ewolucyjny, a do prezentacji rozwiązań arkusz kalkulacyjny. Dzięki temu obsługa stworzonego narzędzia jest prosta, a znajdowane rozwiązania są bardzo bliskie optimum globalnego. Algorytm genetyczny został również wykorzystany do znajdowania rozwiązań modelu minimalizującego całkowite koszty (koszty bezpośrednie, pośrednie, kary

i premie umowne, koszty przerzutu brygad) realizacji zespołu obiektów [175]. Algorytm genetyczny był również jądrem systemu opisanego w pracy [176], opracowanego w celu minimalizacji kosztu realizacji przedsięwzięcia. W zaproponowanym podejściu, aby zapewnić większą elastyczność systemu przewidziano trzy tryby realizacji każdego procesu, różniące się czasem i kosztem. Genetyczny algorytm metaheurystyczny zastosowano również przy maksymalizacji zysku w ramach określonych warunków kredytowych w artykule [86]. Zaproponowane podejście stanowi rozszerzenie tradycyjnych narzędzi CPM oraz LOB i zostało zaimplementowane w programie MS Excel 2003. Przeprowadzona analiza wrażliwości modelu daje lepszy wgląd w relacje między limitami kredytowymi a wielkością przerw, liczby brygad, kosztów bezpośrednich, kosztów finansowania i całkowitego czasu trwania projektu w szerokim zakresie limitów kredytowych. Inne podejście do minimalizacji kosztu z zastosowaniem algorytmu genetycznego do minimalizacji kosztu zaproponowali Huang, Zou i Zhang [177]. Uwzględnili oni różne warianty wykonania procesów, relacje miękkie pomiędzy nimi oraz konieczność dotrzymania dyrektywnego terminu zakończenia realizacji przedsięwzięcia. W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że całkowity koszt realizacji budowy w dużej mierze zależy od przyjętej kolejności realizacji zadań oraz optymalna kolejność realizacji zadań harmonogramu w dużej mierze jest uzależniona od umownego terminu realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Problem optymalizacji zysku za pomocą algorytmu genetycznego był również przedmiotem badań Abdallaha i Alshahriego [178]. Wyniki uzyskane z analizy przypadku wykazały 21% wzrost zysku inwestora w stosunku do pierwotnego harmonogramu.

Z kolei Podolski i Sroka [179] w celu minimalizacji kosztu realizacji robót budowlanych zastosowali natomiast algorytm symulowanego wyżarzania połączonego z programowaniem liniowym. Przedstawili także weryfikację swojego sposobu rozwiązania problemu potwierdzającą wysoką efektywność zaproponowanego podejścia.

Fan, Sun i Wang [180] opracowali model minimalizujący całkowity koszt przedsięwzięcia z uwzględnieniem relacji miękkich pomiędzy procesami. W odróżnieniu od większości badań, które opierają się na założeniu, że kolejność robót nie może być zmieniana, autorzy przyjęli – zgodnie z praktyką budowlaną – że kolejność zajmowania działek roboczych przez brygady robocze nie jest predefiniowana. Dzięki temu stało się możliwe wygenerowanie jeszcze bardziej korzystnych harmonogramów przedsięwzięć budowlanych, które umożliwiają skrócenie czasu budowy i minimalizację całkowitego kosztu.

Problem harmonogramowania przedsięwzięć powtarzalnych w ujęciu kosztowym był także rozpatrywany w pracach [58], [181]–[183].

3.3.4.6. Pozostałe podejścia do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych

Wiele prac dotyczących harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć powtarzalnych obejmowało jeszcze wiele innych, nie wymienionych wcześniej, zagadnień. Dużo z tych prac dotyczy problemów optymalizacji wielokryterialnej harmonogramów. Adeli i Karim [184] opracowali model poszukiwania rozwiązań kompromisowych ze względu na czas i koszt realizacji za pomocą neuronowego modelu dynamicznego. Model uwzględniał także warunek ciągłości pracy oraz możliwość doboru ich składu. Ezeldin i Soliman [185] opracowali podejście minimalizujące czas i koszt realizacji przedsięwzięcia w warunkach ryzyka. Algorytm genetyczny zastosowano do znajdowania suboptymalnych rozwiązań, a programowanie dynamiczne do przeszukiwania sąsiedztwa najlepszych znalezionych wyników. Minimalizacja czasu, i/lub kosztu była przedmiotem badań również Longa i Ohsato [186]. Model przedstawiony w tej pracy uwzględniał konieczność zachowania ciągłości pracy brygad, umożliwiał definiowanie różnych atrybutów procesów (możliwy do przerywania, bądź nie) oraz różne relacje pomiędzy ich kosztami bezpośrednimi i czasami trwania. Podobny problem rozpatrywali Moselhi i Hassanein [187]. Hyari, El-Rayes i El-Mashaleh [188] poszukiwali kompromisu pomiędzy czasem a kosztami pośrednimi i kosztem całkowitym. Problem optymalizacji dwukryterialnej czasu i kosztu realizacji przedsięwzięcia powtarzalnego był również podejmowany w pracach [61], [189]–[194].

Hyari i El-Rayes [195], opracowali model harmonogramowania procesów powtarzalnych w celu maksymalizacji ciągłości pracy zasobów oraz minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięcia. Model ten składa się z trzech poziomów: w pierwszym oblicza się czas realizacji przedsięwzięcia oraz poziom ciągłości pracy zasobów, w drugim poszukuje pseudooptymalnych rozwiązań, a w trzecim tworzy się ranking rozwiązań ze względu na zdefiniowane wymagania decydenta. Ułatwia to decydentowi dokonanie wyboru harmonogramu, najlepszego ze względu na jego, często niezwerbalizowane, preferencje. Te same kryteria optymalizacji zostały przyjęte w pracy [196]. Opracowana metoda harmonogramowania składa się z czterech faz: wyznaczenia najwcześniejszych możliwych terminów rozpoczęcia procesów, obliczenia zapasów czasu, ścisłej ciągłości pracy oraz oceny wydajności. Przedstawione podejście umożliwia decydentom wsparcie i ułatwia im skuteczne generowanie wielu alternatywnych harmonogramów o minimalnym czasie realizacji dla powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych oraz analizowanie ich wpływu na całkowity koszt ich wykonania. Z kolei Ipsilandis [197] opracował model programowania liniowego minimalizacji kosztu opóźnienia dyrektywnego terminu zakończenia przedsięwzięcia oraz przerw w pracy brygad. Podobne kryteria (maksymalizacja zysku i minimalizacja przerw w pracy brygad) przyjęli

Liu i Wang [198]. Proponowana dwuetapowa metoda umożliwia wyznaczenie optymalnego harmonogramu z odpowiednim składem brygad dla zaspokojenia potrzeb finansowych wykonawców w problemie harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Ci sami autorzy [199] opracowali model programowania matematycznego problemu harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych oraz przydziału brygad do procesów. Model ten umożliwia zastosowanie różnych funkcji celu: minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięcia czy minimalizacji przerw w pracy brygad, z ograniczeniami m.in. limitu kosztu robót zleconych.

Z kolei Abd El Razek *et al.* [200] opracowali system komputerowy wspomagający wybór optymalnego rozwiązania uwzględniającego trzy kryteria: czas, koszt i jakość wykonania robót budowlanych. Te same kryteria zostały uwzględnione i optymalizowane w pracy [201] oraz wraz z ciągłością pracy w publikacji [38]. Wiele kryteriów (minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia, wyrównanie zużycia zasobów i redukcja przerw w realizacji procesów) zostało także uwzględnionych w pracy [202]. Zaletą zaprezentowanego tam modelu jest jego przejrzystość i czytelność. Model problemu harmonogramowania uwzględniający cztery kryteria (czas i koszt realizacji przedsięwzięcia, przerwy i opóźnienia w realizacji) przedstawiono w pracy [63]. Tomczak [203] przedstawił koncepcję metody harmonizacji wykonania niejednorodnych procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego w warunkach deterministycznych, umożliwiającą redukcję czasu realizacji i przerw w pracy z uwzględnieniem preferencji decydenta w zakresie istotności kryteriów optymalizacji. Opracowano model matematyczny optymalizacji doboru brygad i ustalania kolejności realizacji działań w wieloobiektowych przedsięwzięciach budowlanych. W celu zaprezentowania możliwości zastosowania opracowanej koncepcji rozwiązano przykład i przedstawiono dla niego optymalny dobór brygad i harmonogram pracy przydzielonych w sposób optymalny brygad. Proponowana metoda może pozwolić na lepsze wykorzystanie posiadanego potencjału produkcyjnego przedsiębiorstw budowlanych i zapewnić zsynchronizowanie w czasie pracy zatrudnianych brygad, szczególnie przy trudnościach z pozyskaniem wykwalifikowanej kadry w budownictwie. Wiele kryteriów optymalizacji (czas, koszt i przerwy w pracy) uwzględniono w pracy [204] przy założeniu warunków niedeterministycznych.

Z kolei Cheng, Feng i Chen [205] opracowali hybrydowy algorytm łączący podejście heurystyczne z genetycznym w celu minimalizacji kosztu jednostkowego lub maksymalizacji produktywności systemu produkcyjnego. System ten ma wspomagać inżynierów budowlanych w alokacji zasobów poprawiającej jakość planowania w przedsięwzięciach budowlanych.

Wielu autorów publikacji próbowało stworzyć kompleksowy system wspierający kierowników budów w zarządzaniu powtarzalnymi przedsięwzięciami budowlanymi. Przykładowo, Russell [206] opracował system

komputerowego wspomaganie zarządzania budowlami budynków wysokich w procesie harmonogramowania ich realizacji. Opracowany system łączy cechy modelowania sieciowego jednopunktowego oraz metod liniowych opisanych w rozdziale 3.4.4.1. Yi, Lee i Choi [207] stworzyli system wspomagający niedoświadczonych menadżerów budowlanych w budowie modelu sieciowego przedsięwzięcia oraz jego optymalizacji. Dzięki zastosowaniu opracowanego systemu czas realizacji budowy 18-piętrowego budynku został skrócony o 42%. Z kolei Huang i Sun [208] opracowali system wspomagający planowanie powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych uwzględniający: relacje kolejnościowe pomiędzy procesami, użycie różnych brygad do wykonania poszczególnych procesów, zapewnienie ciągłości brygad oraz uwzględnienie czasu i kosztu zatrudnienia brygad. System ten posiada przyjazny użytkownikowi interfejs i generował harmonogram zarówno w formie liczbowej, jak i cyklogramu rysowanego w programie AutoCad oraz model sieciowy wykonywany w programie MS Project. Tokdemir, Arditi i Balcik [209] opracowali system ALISS (ang. *Advanced Linear Scheduling System*), który wspomaga inżynierów w planowaniu przedsięwzięć powtarzalnych. System uwzględnia ograniczenia czasowe i w dostępności zasobów oraz frontu robót, a także generuje histogram i krzywą kumulacyjną kosztów. Kolejny system wspomagający planowanie powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych i uwzględniający miękkie relacje pomiędzy procesami opracowali Cho, Hong i Hyun [210]. System wspomagający zarządzanie przedsięwzięciami polegającymi na budowie tunelu przedstawili Abdallah i Marzouk [211]. Pozwala on oszacować czas i koszt planowanego przedsięwzięcia oraz podjąć decyzję kierownictwu budowy o wyborze harmonogramu kierowanego do realizacji na podstawie wielu kryteriów, w tym: minimalizacji czasu i kosztu realizacji przedsięwzięcia oraz maksymalizacji wykorzystania zasobów. Hajdasz [212] opracowała kompleksowy system MoCCAS (ang. *a monolithic construction computer aided system*) wspomaganie podejmowania decyzji w zarządzaniu powtarzalnymi przedsięwzięciami budowlanymi. Opracowany system pozwala na synchronizację pracy zasobów połączonych w zrównoważone zestawy produkcyjne, a także wspiera decydentów w tworzeniu scenariuszy w projektowaniu strategii wykonawczych.

Kavanagh [213] zbudował model symulacyjny oparty na teorii kolejek, który wspomaga zarządzanie czasem i kosztem powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Model uwzględnia dostępność brygad i sprzętu, krzywą uczenia się i pogodę.

Zhang, Tam i Shi [214] zaproponowali podejście wykorzystujące badania symulacyjne do planowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych, zwłaszcza przy małej dostępności zasobów i dużej liczbie relacji pomiędzy procesami. Jedną z największych korzyści płynących z zastosowanego podejścia jest lepsze wykorzystanie posiadanych zasobów.

Sawhney, Mund i Chaitavatputtiporn [215] wykorzystali sieci Petriego do planowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Dzięki temu stało się

możliwe uwzględnienie w harmonogramie: dynamicznego przydziału zasobów na budowę oraz łatwiejsze ujęcie stochastycznego charakteru procesów. Sieci Petriego zostały wykorzystane także w pracy [216] w celu wspomagania zarządzania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych i alokacji zasobów.

Dzeng, Wang i Tserng [217] zaproponowali system komputerowy standaryzacji planowania przedsięwzięć powtarzalnych realizowanych przez różnych wykonawców. Po zastosowaniu opracowanego systemu zmniejszyła się liczba błędów w planowaniu realizacji robót oraz zaoszczędzono dużo czasu kierownictwa budowy nad przygotowaniem harmonogramu przedsięwzięcia.

Han, Lee, Pena-Mora [218] opracowali podejście pozwalające na minimalizację wysiłku nieprzynoszącego wartości dodanej (ang. *non-value-adding effort*). Dzięki takiemu ujęciu problemu stało się możliwe bardziej skutecznie unikanie opóźnień w harmonogramie i przekroczeń kosztów w przedsięwzięciu.

Hegazy, Abdel-Monem i Saad [37] stworzyli system wspomagania podejmowania decyzji na etapie kontroli realizacji powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych poprzez automatyzację dokumentowania informacji powykonawczych. W porównaniu do tradycyjnych metod, w których harmonogram jest tylko pasywnym raportem (często wykorzystywanym do celów prezentacyjnych), opracowany system przekształca go w bogate medium do dokumentacji, wizualizacji, analizy i podejmowania lepszych decyzji.

Lucko, Gomes Araujo i Cates [219] zaadaptowali schematy (ang. *slip chart*) znane z przemysłu kosmicznego do wizualizacji planowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych. Rozszerzono te wykresy o cechy niezbędne w nowym zastosowaniu: zdefiniowano bufor, krytyczność procesów, zapasy czasu. Do poprawy wizualizacji harmonogramowania oraz ułatwienia planowania przedsięwzięć budowlanych został także wykorzystany system informacji geograficznej (ang. *geographic information system*; GIS) [57], [220]–[222].

Inne specyficzne problemy harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych były podejmowane także w pracach [223]–[226].

3.4. Podsumowanie

Zagadnienie harmonizacji procesów powtarzalnych w przedsięwzięciach budowlanych, ze względu na swoją złożoność i poziom trudności, było wielokrotnie podejmowane w literaturze przedmiotu. Popularność podejmowania tej tematyki w piśmiennictwie wynika z dwóch powodów: z jednej strony zagadnienie to stanowiło duże wyzwanie dla badaczy, przez co chętnie się go podejmowali, a z drugiej strony była ona podyktowana rzeczywistymi potrzebami budów, które nie posiadają odpowiednich narzędzi do zarządzania i planowania takich przedsięwzięć. W ramach dotychczas przeprowadzonych badań naukowcy rozwiązali wiele problemów szczegółowych z zakresu harmonizacji wykonania procesów w przedsięwzięciach powtarzalnych, między innymi: rozwój

tradycyjnych metod harmonogramowania oraz metod liniowych, lepsze wykorzystanie zasobów, wyrównanie zużycia zasobów, uwzględnienie ograniczonej dostępności zasobów, zwiększenie odporności harmonogramów, bardziej precyzyjne prognozowanie przebiegu wykonania przedsięwzięć, minimalizacja czasu i/lub kosztu realizacji, poprawa wizualizacji harmonogramów, rozwój modeli wielokryterialnych, wykorzystanie algorytmów metaheurystycznych, zwłaszcza genetycznych, w celu skrócenia czasu rozwiązywania złożonych modeli zagadnień praktycznych.

Z drugiej strony wydaje się, że w wielu obszarach omawianego zagadnienia wciąż występują braki i niedociągnięcia w opracowanych narzędziach wspomagających kierownictwo budów, między innymi:

- większość modeli ma charakter deterministyczny, przez co nie ujmuje ryzyka i niepewności w planowaniu,
- większość podejść nie uwzględnia preferencji decydenta,
- większość modeli nie uwzględnia odpowiedniej liczby kryteriów oceny,
- brak holistycznego ujęcia zagadnienia,
- ze względu na dużą liczbę czynników ryzyka wciąż jest utrudnione planowanie zgodne z rzeczywistością,
- uwzględnia się zazwyczaj predefiniowaną kolejność realizacji obiektów (działek),
- niewiele prac uwzględnia optymalizację czasu realizacji procesów na obiektach (działkach roboczych).

W związku z powyższym w niniejszej publikacji proponuje się system wspomagania harmonizacji wykonania procesów przedsięwzięć wieloobektowych uwzględniający preferencje decydenta oraz kryteria minimalizacji: czasu wykonania przedsięwzięcia, przerw w pracy brygad, czasu wykonania obiektów budowlanych. W celu rozwiązania opracowanego modelu stworzono algorytm optymalizacji rojem cząstek. Wydaje się, że opracowanie takiego narzędzia będzie stanowić realną pomoc w planowaniu powtarzalnymi przedsięwzięciami budowlanymi, zwłaszcza biorąc pod uwagę niedoskonałość i ograniczenia zastosowań obecnie istniejących narzędzi i rozwiązań.

4. Badania ankietowe procesu doboru kryteriów oceny harmonogramów budowlanych

W celu zidentyfikowania potrzeb praktycznych w zakresie harmonogramowania przedsięwzięć realizowanych metodami potokowymi oraz preferencji osób zarządzających przedsięwzięciami budowlanymi przeprowadzono badania ankietowe dotyczące ograniczeń realizacyjnych i kryteriów oceny harmonogramów budowlanych. Uzyskane informacje pozwoliły rozpoznać stosowane w praktyce kryteria oceny harmonogramów budowlanych oraz uwzględnić je w opracowanej metodzie harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego.

Badania ankietowe przeprowadzono wśród siedemdziesięciu czterech osób pełniących funkcje kierownicze w przedsiębiorstwach budowlanych. Ankieta zawierała trzydzieści siedem pytań o charakterze otwartym, półotwartym jak i zamkniętym. Pytania zostały pogrupowane w następujące podrodziały:

- pytania metryczkowe,
- pytania wprowadzające,
- zagadnienie przerw w pracy brygad,
- organizacja pracy na budowie,
- terminowość realizacji inwestycji,
- dobór brygad do realizacji zadań.

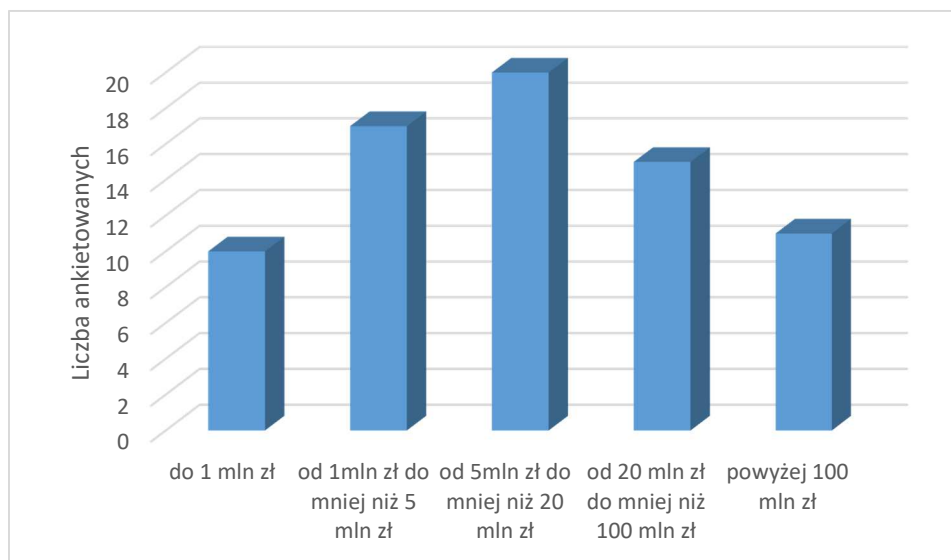
Ze względu na zmienne warunki prowadzonych przedsięwzięć budowlanych oraz ich zróżnicowany charakter, w trakcie budowy kwestionariusza dołożono wszelkich starań w celu umożliwienia ankietowanym na pełną swobodę wypowiedzi – sugerując i zachęcając do wyrażania dłuższych uwag w formie pisemnej.

Zestaw pytań ankietowych oraz wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w Załączniku B, Tabeli C.1 w Załączniku C oraz na rysunkach 4.1–4.8.

Ankietowani menedżerowie najczęściej zajmują stanowiska inżyniera budowy (38% respondentów), kierownika budowy (20%), albo robót (19%) od roku do pięciu lat (36%). Prowadzone przez nich budowy są zróżnicowane pod względem wielkości, przy czym najczęściej wartość kontraktu mieści się w przedziale od 5 do 20 milionów złotych (rys. 4.1.).

80% ankietowanych używa harmonogramu jako narzędzia wspomagającego zarządzanie realizacją przedsięwzięcia budowlanego. W zdecydowanej większości przypadków (57%) kierownik budowy jest osobą odpowiedzialną za przygotowanie harmonogramu wykonania budowy. Czasami planowaniem realizacji budowy i przygotowaniem harmonogramu zajmują się także kierownicy robót (17%), dział przygotowania produkcji (15%), bądź inwestor (10%). Najczęściej wymienianymi powodami opracowania harmonogramów jest synchronizacja pracy brygad (40%) oraz ułatwienie pracy kierownictwa budowy

(40%), co jest zgodne z przywołanymi we wstępie teoretycznymi założeniami harmonizacji pracy. Inne powody tworzenia harmonogramów również związane są z założonymi zadaniami harmonogramów: ustalenie terminów zatrudnienia podwykonawców/brygad (38%), podstawa do opracowania planów dostaw (32%). Część zarządzających budowlami traktuje harmonogram jako formalny obowiązek albo narzucony przez inwestora (37%), albo wynikły z procedur przetargowych (25%).



Rysunek 4.1. Odpowiedzi na pytanie: Jaka jest przeciętna wartość kontraktu (wyrażona w milionach złotych) przy realizacji którego Pan/Pani uczestniczy?

70% respondentów stosujących harmonogramy w pracy aktualizuje je bądź w sposób zaplanowany z ustaloną ogólnie częstotliwością (raz na miesiąc lub raz na dwa miesiące – 18%, raz na tydzień lub raz na dwa tygodnie – 16%) bądź na bieżąco (23%), czy też w miarę potrzeb (9%).

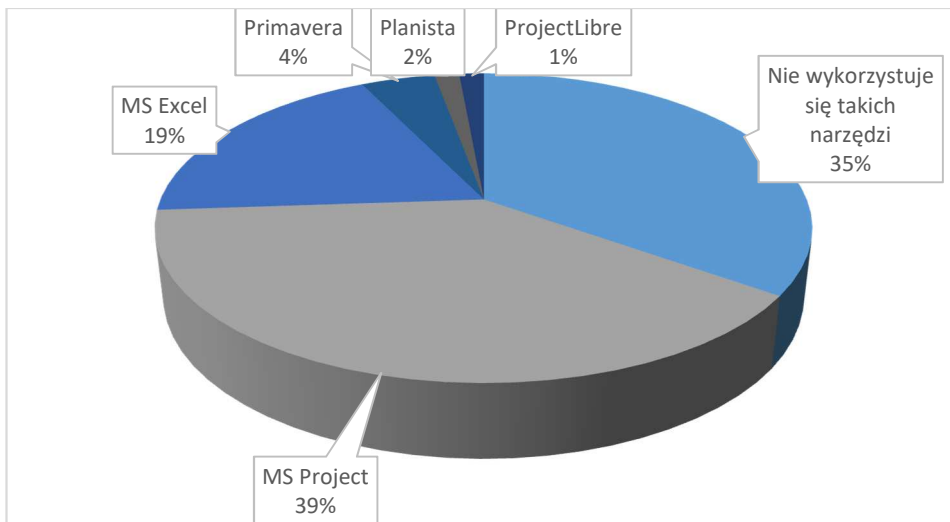
68% uczestników badania ankietowego podejmuje działania naprawcze w przypadku wystąpienia opóźnień względem terminów ustalonych za pomocą harmonogramu. Te działania naprawcze najczęściej związane są z zatrudnieniem dodatkowych zasobów (zatrudnienie podwykonawców – 37%, przesunięcie brygad z innych budów – 34%). Zdarzają się także działania korekcyjne względem wcześniej przyjętych planów polegające na zmianie technologii wykonania robót budowlanych (15%) albo na zastosowaniu bardziej wydajnych maszyn (10%).

Jedynie 60% ankietowanych używa oprogramowania służącego do wspomagania harmonogramowania robót. Najpopularniejszymi takimi

narzędziami są: MS Project, MS Excel (który nie jest programem intencjonalnie dedykowanym do wspomagania zarządzania projektami) oraz Oracle Primavera (rys 4.2.).

Zachowanie ciągłości pracy brygad zostało określone przez ankietowanych jako bardzo ważne (58%) bądź ważne (38%) (rys. 4.3.) w procesie oceny harmonogramów. Jako przyczyny istotności tego kryterium wskazano wzrosty kosztów budowy związane z: ponoszeniem kosztów przerzutu brygad na inne budowy (43%), koniecznością wypłaty wynagrodzenia dla pracowników nie rozliczanych ryczałtem (40%), ponoszeniem kosztów pośrednich / zależnych od czasu mimo przerwy w pracy (31%). Innymi wymienianymi powodami były: niebezpieczeństwo rozpoczęcia realizacji nowego zlecenia przez podwykonawcę na innej budowie (25%), obniżenie wydajności pracy po przerwie (22%) czy wzrost zagrożenia przekroczenia terminu umownego (17%). Dodatkowe koszty związane z występowaniem przerw w pracy brygad ponosi 84% ankietowanych. Zapewne z tego powodu respondenci deklaruwali, że przerwy na ich budowach występują: rzadko (47%), czasami 29 (39%) oraz nigdy (9%). Jeśli już przerwy w pracy brygad wystąpią pracownikom przydzielą się inne, drugorzędne zadania (50%), albo przenosi się ich na inne budowy (47%) lub rozbija się istniejące brygady i dołącza pracowników do innych zadań (19%). Większość ankietowanych miała problem ze wskazaniem wpływu przerw w pracy na morale pracowników (46%). Jeśli takie zależności zostały zadeklarowane, zarządzający budowami wskazywali, że przerwy w pracy wpływają na pracowników raczej negatywnie (22%) lub negatywnie (17%). Jedynie 10% ankietowanych wskazało raczej pozytywny wpływ przestojów w pracy na nastrój pracowników.

Większość ankietowanych stwierdziła, że nie używa żadnych metod organizacji pracy na budowie (92%). Jedynie 7% osób wskazała metodę pracy równomiernej, a 3% metodę Line of Balance jako wykorzystywane narzędzia do wspomagania organizacji pracy na budowie (rys. 4.4.). Brak wykorzystywania narzędzi wspomagających organizację pracy nie idzie w parze z deklarowaną ważnością zachowania ciągłości pracy na froncie robót: 41% ankietowanych odpowiedziało, że zachowanie ciągłości pracy na froncie robót i minimalizacja czasu realizacji robót na działce jest ważne, a 29% – że jest bardzo ważne (rys. 4.3). Jako najważniejsze przyczyny istotności tego kryterium oceny harmonogramów wskazano wydłużenie czasu realizacji całej budowy (62%) oraz ponoszenie kosztów zależnych od czasu (50%). Ważnymi powodami okazały się także niezadowolenie opinii publicznej (16%) oraz wrażenie inwestora, że wykonawca nie posiada odpowiednich zasobów (19%). Pomimo tego, że zarządzający budowami nie stosują metod organizacji pracy na budowie to przerwy w pracy na froncie robót występują rzadko (47%), czasami (42%), bądź nigdy (8%).



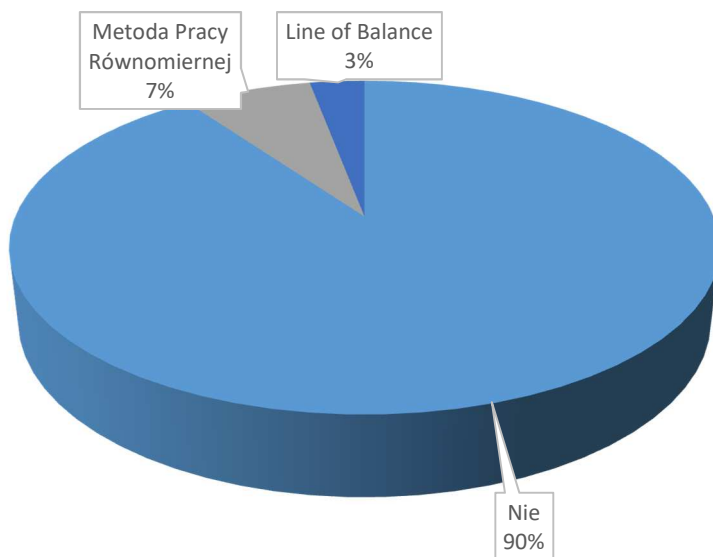
Rysunek 4.2. Odpowiedzi na pytanie: Jakie narzędzia są stosowane do wspomagania harmonogramowania robót?



Rysunek 4.3. Określenie ważności kryteriów oceny harmonogramów przez ankietowanych

W 43% budów inwestor nie kontroluje postępu robót. Jeśli zaawansowanie robót jest monitorowane przez inwestora, najczęściej dokonuje tego poprzez nadzór inwestorski (46%), wizytacje lokalne (17%), bądź narady budowy (8%).

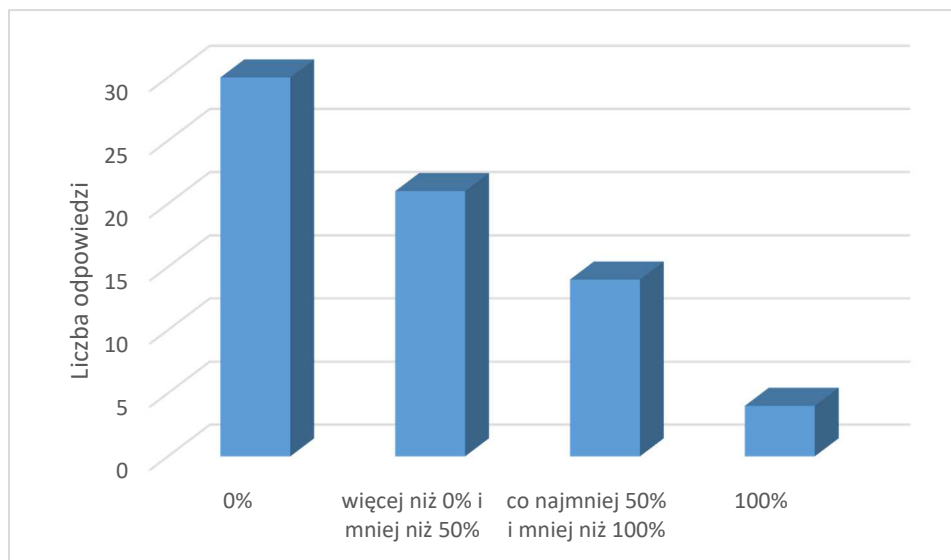
Dochowanie terminu realizacji inwestycji jest bardzo ważnym (69% respondentów) oraz ważnym (23%) kryterium ewaluacji jakości harmonogramów budowlanych dla ankietowanych ekspertów (rys. 4.3). Głównym czynnikiem determinującym ważność tego kryterium są dodatkowe, dające się uniknąć, wydatki związane z karami umownymi (77%) oraz ze wzrostem kosztów zależnych od czasu (54%). Innymi ważnymi powodami dążenia do dochowania terminu umownego realizacji budowy są: obniżenie reputacji firmy (32%), brak premii (20%), umożliwienie wykonania robót zgodnie z przewidzianą technologią w sprzyjających warunkach atmosferycznych, bez potrzeby wykorzystywania innych, szybszych i droższych technologii (6%). Osiągnięcie indywidualnego celu i satysfakcji z dobrze zrealizowanego przedsięwzięcia (3%) zostało także wskazane przez 3% ankietowanych jako czynnik inspirujący do ukierunkowywania działań na placu budowy w celu dochowania terminu umownego realizacji inwestycji.



Rysunek 4.4. Odpowiedzi na pytanie: Czy stosuje Pan/Pani metody organizacji pracy na budowie?

W inwestycjach realizowanych przez 42% ankietowanych zawsze udaje się dochować terminu wykonania zlecenia. Z kolei na budowach kierowanych przez 32% badanych niedochowanie terminu umownego zdarza się na mniej niż 50% kontraktów, a u 20% ankietowanych opóźnienia w realizacji inwestycji

zdarzają się na co najmniej 50% i mniej niż 100% przypadków. U 6% badanych umowny termin zakończenia robót budowlanych nigdy nie jest zachowany (rys. 4.5.). Wydłużenie realizacji czasu realizacji kontraktu zwykle trwa od 10 do 20% pierwotnego czasu wykonania budowy (56%). 24% osób odpowiedziało, że przeciętne opóźnienie wynosi mniej niż 10% planowanego czasu realizacji (24%), a 12% stwierdziło że wydłużenie czasu robót budowlanych wynosi co najmniej 20% i mniej niż 50% czasu planowanego. W celu uniknięcia opóźnień w wykonaniu przedsięwzięć i robót budowlanych angażuje się dodatkowe zasoby (66%), zmienia organizację pracy (47%) albo technologię robót (19%). Kary za opóźnienia w realizacji kontraktu wynoszą: 10 000 zł i więcej za dzień opóźnienia (20%), co najmniej 0,5% wartości kontraktu za dzień opóźnienia (17%), więcej niż 0% i mniej niż 0,5% (17%), co najmniej 2000 zł i mniej niż 10 000 zł (16%), do 2000 zł (8%). W ankiecie celowo umożliwiono podawanie wartości nominalnych kar oraz jako wartość procentową wartości kontraktu, ponieważ ankietowani dysponowali zróżnicowaną wiedzą w tym zakresie.

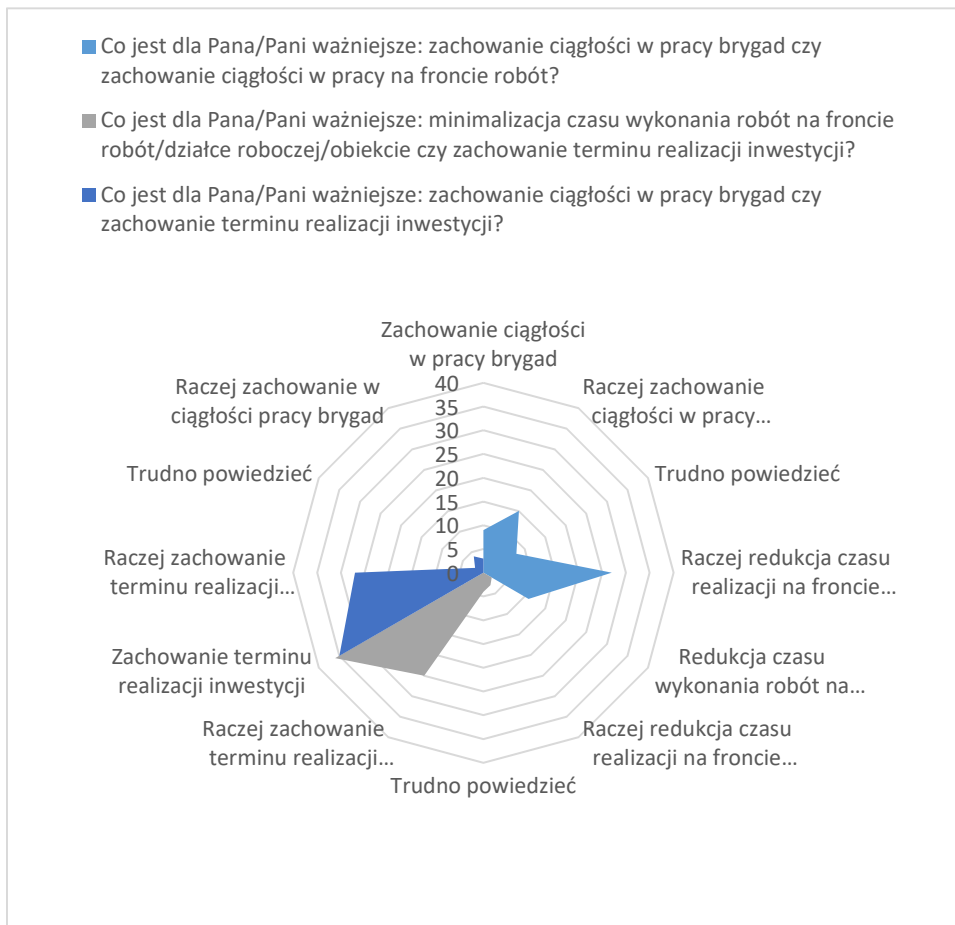


Rysunek 4.5. Częstotliwość niedotrzymywania terminu umownego realizacji inwestycji w % liczby realizowanych przedsięwzięć

Za zakończenie budowy przed terminem określonym w umowie kadra menadżerska tych inwestycji najczęściej nie dostaje premii (44%). W przypadku, gdy takie premie dla kierownictwa budowy są przyznawane wynoszą do 5% wartości kontraktu (21%), do 2,5% (3%) lub do 20% zysku (3%). Premie za skrócenie czasu realizacji kontraktu (względem terminu umownego) najczęściej stanowią 0% uposażenia podstawowego kierownictwa budowy

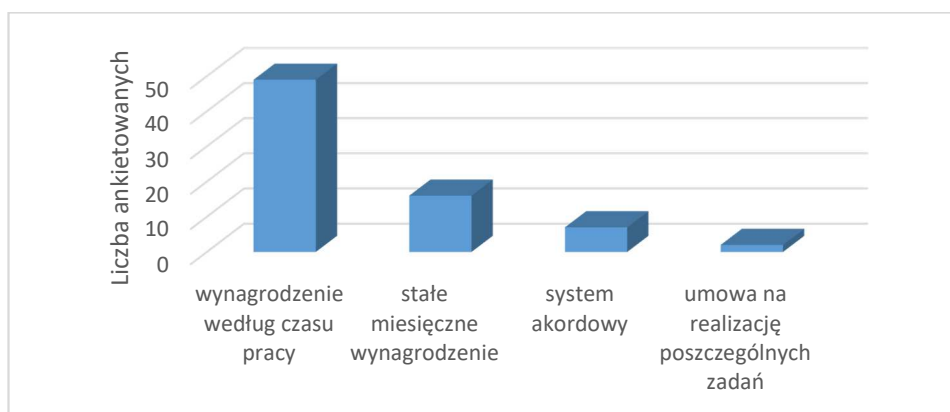
(51% odpowiedzi), więcej niż 0% i mniej niż 10% (9% odpowiedzi), co najmniej 10 % i mniej niż 20% (19% odpowiedzi), 20% i więcej (9% odpowiedzi).

Z porównania ważności kryteriów oceny harmonogramów między sobą wynika, że kryterium dotrzymania umownego terminu realizacji przedsięwzięcia jest uznawane za zdecydowanie ważniejsze od zachowania ciągłości pracy na froncie robót (50%) i zachowania ciągłości pracy brygad (48%), bądź raczej ważniejsze, odpowiednio – 37% i 35%. W porównaniu istotności zachowania ciągłości w pracy brygad i minimalizacji czasu wykonania robót na froncie robót odpowiedzi są zróżnicowane: dla 38% ankietowanych ważniejsza jest ta druga opcja, a dla 21% raczej i 15% badanych zdecydowanie istotniejsza jest pierwsza z opcji (rys 4.6.).



Rysunek 4.6. Porównanie ważności kryteriów oceny harmonogramów przez ankietowanych

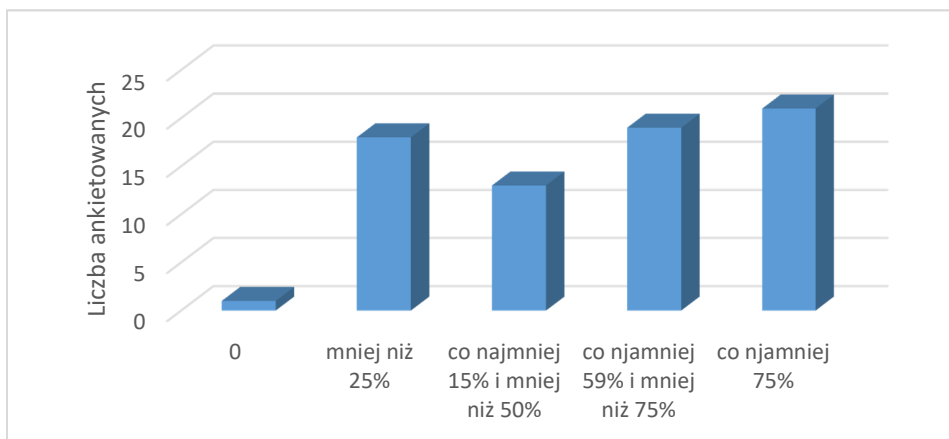
Ankietowani stwierdzili, że w ich przedsiębiorstwach najczęściej istnieją stałe składy brygad roboczych (32%), czasami także brygady obejmują kilka zespołów o stałym składzie (13%), bądź funkcjonuje system mieszany (28%). Jedyne 7% badanych przyznało, że w ich przedsiębiorstwach nie istnieją stałe składy brygad roboczych (7%). Brygady te najczęściej są branżowe (40%), specjalistyczne (23%), wielobranżowe (22%) oraz kompleksowe (10%). Pracownicy najczęściej otrzymują wynagrodzenie według czasu pracy (67% odpowiedzi; pracownicy posiadają umowy o pracę, a wysokość wynagrodzenia jest zależna od przepracowanej liczby godzin w miesiącu, ustalonej na podstawie ewidencji czasu pracy), albo stałe wynagrodzenie miesięczne (22%). Mniej popularnymi formami rozliczania się z pracownikami są: system akordowy (10%) oraz umowa na realizację poszczególnych zadań (3%) (rys 4.7.).



Rysunek 4.7. Sposoby rozliczania się z pracownikami w badanych przedsiębiorstwach budowlanych

Jedynie 1% wszystkich budów jest realizowanych bez wsparcia podwykonawców. Stopień zaangażowania podwykonawców w realizację przedsięwzięć (mierzony udziałem wartości wykonanych robót w wartości całego kontraktu) jest bardzo zróżnicowany: mniej niż 25% robót jest wykonywanych przez podwykonawców w przypadku 25% inwestycji, co najmniej 25% i mniej niż 50% procesów w 18% budów, co najmniej 50% i mniej niż 75% robót w 26% przedsięwzięć oraz co najmniej 75% procesów budowlanych jest realizowanych przez podwykonawców w 29% przypadków (rys 4.8.).

Wyniki przeprowadzonych badań ankietowych, mimo niewielkiego zakresu, pozwalają na rozpoznanie preferencji osób należących do kadry kierowniczej budów oraz na wyciągnięcie podstawowych wniosków i opracowanie wymagań, które są niezbędne przy budowie systemu wspomagającego harmonizację wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego. Są one następujące:



Rysunek 4.8. Odpowiedzi na pytanie: Jaką część zlecenia w przedsięwzięciach w których bierze Pan/Pani udział wykonują podwykonawcy (mierzony w % wartości wykonanych prac)?

- w trakcie oceny użyteczności harmonogramu decydenci stosują zróżnicowane kryteria, dlatego też w systemach wspomagających harmonizację pracy należy wykorzystywać metody analizy wielokryterialnej,
- ważność poszczególnych kryteriów jest uzależniona od indywidualnych preferencji decydentów, przy budowie funkcji celu należy uwzględnić ich zmienność,
- zarówno zachowanie terminu inwestycji, skrócenie czasu jej realizacji przedsięwzięcia i obiektów, jak i ciągłości w pracy brygad i na froncie robót uznane zostały za bardzo ważne przez ankietowane kierownictwo budów, a więc powinny zostać uwzględnione w projektowanym systemie,
- możliwość modelowania różnych warunków i ograniczeń (dochowanie umownego terminu realizacji inwestycji, wielozadaniowość brygad) oraz indywidualne podejście systemu do wyrażenia preferencji decydenta (zróżnicowane metody ustalania kryteriów oceny) będą decydować o użyteczności opracowanej metody.

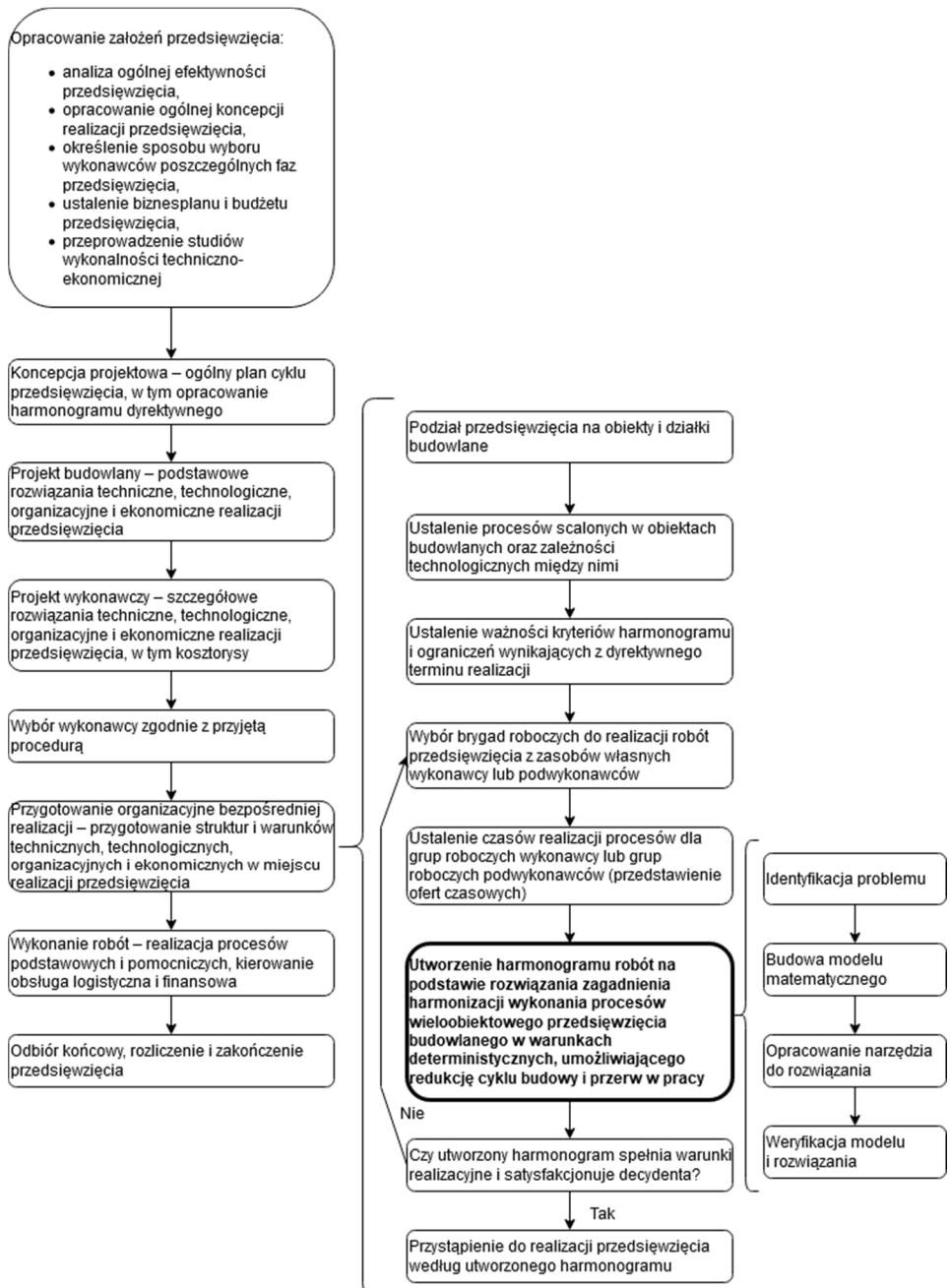
Otrzymane rezultaty z przeprowadzonych badań potwierdzają trafność wyboru przyjętej tematyki monografii. Opracowana metoda harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego może stanowić narzędzie dostosowane do preferencji i wymagań osób stanowiących kadre zarządczą budów. W wyniku przeprowadzonego badania ankietowego zidentyfikowano brak narzędzi wspomagających harmonizację procesów. Wyniki badań ankietowych pozwoliły w dalszej części dysertacji na przyjęcie odpowiednich ograniczeń i założeń modelu harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego.

5. Eksplikacja opracowanej metody harmonizacji wykonania procesów wieloobektowego przedsięwzięcia budowlanego

Obecnie stosowane w praktyce metody harmonogramowania robót budowlanych – co potwierdzają przeprowadzone badania ankietowe omówione w rozdziale IV – bazują przede wszystkim na doświadczeniu i intuicji osoby sporządzającej harmonogram. Osoba ta dysponuje jedynie prostymi narzędziami w postaci metod opartych na teorii grafów, które nie uwzględniają wielu aspektów niezbędnych w analizie ustalania terminów i kolejności realizacji procesów oraz alokacji zasobów [83], [90], [146], [149], [203]. W proponowanej w pracy metodzie harmonizacji wykonania powtarzalnych procesów przedsięwzięć wieloobektowych osobę projektującą harmonogram robót będzie wspomagał system komputerowy, umożliwiający ocenę wariantów harmonogramów na podstawie kryteriów i ich istotności ustalonych na podstawie preferencji decydenta.

Umiejscowienie opracowanej metody w kolejnych fazach realizacji przedsięwzięcia budowlanego przedstawiono na rysunku 5.1. Po wyborze systemu realizacji oraz samego wykonawcy przedsięwzięcia budowlanego następują fazy, do wspomagania których została opracowana w pracy metoda i system komputerowy tj.: etapy związane z przygotowaniem realizacji inwestycji: organizowaniem robót i przygotowaniem do ich realizacji. Głównymi etapami opisanej metody są:

1. Identyfikacja struktury przedsięwzięcia, tj. podział na obiekty i działki robocze, wynikającej z uwarunkowań architektonicznych, konstrukcyjnych, czy technologicznych, (np. uwzględnienie dylatacji bądź dopuszczalnych lokalizacji przerw roboczych).
2. Scalenie robót budowlanych w pakiety robót (procesy/pozycje scalone, pozycje harmonogramu) na działkach roboczych oraz ustalenie zależności technologicznych między nimi.
3. Ustalenie ważności kryteriów harmonogramu za pomocą proponowanych procedur I, II lub III (opisanych w rozdz. 5.3.3.), dostępnych w opracowanym programie komputerowym, i uwzględnienie ograniczeń wynikających z dyrektywnego terminu realizacji.
4. Dobór brygad roboczych do realizacji poszczególnych procesów przedsięwzięcia z zasobów własnych wykonawcy lub podwykonawców, z uwzględnieniem możliwej ich wielozadaniowości.
5. Ustalenie czasów realizacji procesów wykonywanych przez poszczególne brygady robocze wykonawcy lub podwykonawców (ustalanych na podstawie ich ofert).



Rysunek 5.1. Fazy realizacji przedsięwzięcia budowlanego z wyszczególnieniem etapów proponowanej metodyki (na podstawie [8], [25])

6. Utworzenie harmonogramu robót – z zastosowaniem opracowanego programu komputerowego – na podstawie rozwiązania zagadnienia harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego w warunkach deterministycznych, umożliwiającego redukcję cyklu budowy i przerw w pracy brygad oraz na obiekcie budowlanym.
7. Weryfikacja przez decydena otrzymanego rozwiązania, polegająca na ocenie uzyskanego harmonogramu pod kątem uwzględnienia wszystkich rzeczywistych ograniczeń oraz stopnia spełnienia jego preferencji. W przypadku otrzymania niezadowolającego rezultatu należy wrócić do punktu czwartego metody. W sytuacji zaakceptowania przez decydena otrzymanego harmonogramu można przystąpić do fazy realizacji robót budowlanych.

5.1. Identyfikacja i formalizacja modelu zagadnienia

Wynikiem procesu projektowania jest harmonogram realizacji przedsięwzięcia. Rozpatrywane przedsięwzięcie budowlane posiada już przytoczoną we wcześniejszych rozdziałach, hierarchiczną strukturę:

- przedsięwzięcie budowlane,
- obiekty budowlane, które zostały opisane za pomocą zbioru $P = \{1, 2, \dots, p, \dots, o\}$,
- działki robocze, które na każdym obiekcie p tworzą zbiór $L_p = \{1, 2, \dots, l_p, \dots, m_p\}$, stąd też zbiór działek realizowanych w całym przedsięwzięciu budowlanym (dla ustalonej permutacji obiektów) można zapisać jako zbiór $L = \{1, 2, \dots, m_1, \dots, m_1 + m_2, \dots, m\}$, gdzie $m = m_1 + m_2 + \dots + m_o$ stanowi liczbę wszystkich działek w przedsięwzięciu,
- oraz procesy budowlane niezbędne do zrealizowania na każdej działce roboczej, należące do zbioru $j \in V = \{1, 2, \dots, n\}$.

Zakres robót na działkach roboczych oraz zależności kolejnościowe między nimi są modelowane za pomocą sieci sporządzonej techniką jednopunktową (ang. *activity-on-node*). W technice tej procesy przedsięwzięcia oraz zależności kolejnościowe pomiędzy nimi są przedstawione za pomocą grafu skierowanego:

$$G = \langle V, E \rangle, \quad (5.1)$$

z jednym wierzchołkiem początkowym i jednym końcowym. W grafie tym wierzchołkami są procesy należące do zbioru V . Z kolei łuki grafu $E \subset V \times X$ przedstawiają relacje kolejnościowe typu rozpoczęcie po zakończeniu pomiędzy

tymi procesami, odpowiadające zależnościom technologicznym bądź organizacyjnym występującym pomiędzy nimi w przedsięwzięciu. Zapis relacji pomiędzy procesami znajduje się w macierzy $[v_{ij}]$. Jeżeli występuje zależność technologiczna lub organizacyjna pomiędzy procesem i oraz procesem j oraz realizacja procesu i bezpośrednio poprzedza realizację procesu j ($i \prec j$) to $v_{ij} = 1$. W każdym pozostałym przypadku $v_{ij} = 0$. Definiuje to w sposób jednoznaczny konieczność zakończenia realizacji procesu $i \in V$ przed rozpoczęciem procesu $j \in V$, jeśli ze względu na relacje technologiczne bądź organizacyjne pomiędzy tymi procesami występuje zależność $i \prec j$.

Niezwykle rzadko zdarza się, aby kolejność realizacji działań w obiekcie była dowolna. Zazwyczaj sekwencja wykonania działań roboczych w obiekcie budowlanym jest ustalona i wynika z konstrukcji obiektu lub uwarunkowań technologiczno-organizacyjnych. Dlatego też, w pracy założono, że kolejność realizacji działań roboczych w obiekcie budowlanym jest zdefiniowana przez decydenta i odpowiada numeracji elementów w zbiorach $L_p = \{1, 2, \dots, l_p, \dots, m_p\}$. Z kolei kolejność realizacji obiektów budowlanych (permutacja obiektów) nie jest predefiniowana i stanowi jedną ze zmiennych decyzyjnych podejmowanego zadania. Wobec tego, każda dopuszczalna kolejność realizacji obiektów będzie stanowić permutację c zbioru P . Zbiór wszystkich możliwych permutacji zbioru P zapisuje się symbolem P_c . Z kolei kolejność wykonania obiektu budowlanego p w permutacji c oznacza się za pomocą zmiennej całkowitoliczbowej c_p . Dodatkowo, w celu implementacji komputerowej opracowanej metody, wprowadzono zmienne w postaci:

$$c_p' \in [0, |P|], \quad \forall p \in P. \quad (5.2)$$

Zmienne c_p' , uszeregowane rosnąco (od najmniejszej do największej wartości), odpowiadają kolejności wykonania obiektów budowlanych p w permutacji $c - c_p$, co można zapisać następująco:

$$c_p' < c_q' \Rightarrow c_p < c_q, \quad \forall p, q \in P, \quad (5.3)$$

Taki sposób kodowania zmiennych jest odwrotnością znanego w literaturze podejścia priorytetowego dla dużych wartości (ang. *Great Value Priority*) [227].

Ze względu na możliwe zróżnicowanie wielkości obiektów budowlanych, a więc i wymaganych nakładów rzeczowych niezbędnych do realizacji, zagadnienia związane z ich badaniem powinny uwzględniać priorytety

poszczególnych obiektów budowlanych. W pracy te wagi oznaczono jako g_p . Można je wyznaczyć ze wzoru:

$$g_p = \frac{A_p}{\sum_{p \in P} A_p}, \quad \forall p \in P, \quad (5.4)$$

gdzie A_p oznacza charakterystyczną wielkość cechującą obiekt p , np. powierzchnia całkowita, powierzchnia użytkowa, kubatura, nakład pracy ludzkiej.

Cechą charakterystyczną produkcji budowlanej jest występowanie długotrwałych przerw technologicznych, zazwyczaj wiązanych z dojrzewaniem betonu. Przerwy te, konieczne do uwzględnienia w sieci zależności i w analizie czasowej przedsięwzięcia, są traktowane jako procesy niezużywające zasobów, ale ograniczają dostępność działki roboczej i opóźniają realizację kolejnych procesów z sieci zależności na tej działce. Ze względu na nieangażowanie zasobów, w odróżnieniu od innych procesów, występowanie przerwy technologicznej na jednej działce nie wpływa na przerwę technologiczną na sąsiedniej działce roboczej. W celu uwzględnienia przerw technologicznych w opracowywanym modelu matematycznych zdefiniowano ich zbiór w postaci $V^{tb} : V^{tb} \subset V$, do którego należą procesy będące przerwami technologicznymi.

Wszystkie brygady mogące realizować procesy budowlane w rozpatrywanym przedsięwzięciu tworzą zbiór R , a brygady mogące wykonywać proces $j \in V$ stanowią zbiór R_j , przy czym $R_j \subset R$. Warto zauważyć, że dopuszcza się wielozadaniowość brygad, czyli brygada r może należeć do wielu zbiorów R_j . Jest to możliwe dzięki uzyskiwaniu przez pracowników budowlanych kilku kwalifikacji zawodowych w procesie kształcenia. Zarządzający budowami chętnie korzystają z tego faktu, zwłaszcza w odniesieniu do brygad własnych generalnego wykonawcy przedsięwzięcia, i często te same brygady są przydzielane do realizacji różnych asortymentów robót. Oczywiście założenie to powoduje ograniczenia wynikające z dostępności brygad realizujących różnorodne procesy. Jedna brygada w tym samym czasie może realizować tylko jeden proces.

Jak wykazano w rozdziale IV, zarządzający budowami uważają redukcję przerw w pracy brygad za jedno z ważniejszych kryteriów oceny harmonogramów. Jednak w zależności od struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia kierownictwo może być zainteresowane minimalizacją przerw w pracy wszystkich brygad, bądź tylko wybranych, na przykład własnych, zespołów roboczych. W celu umożliwienia modelowania minimalizacji przerw

w pracy tylko wybranych brygad zdefiniowano zbiór $R^s : R^s \subset R$, w skład którego wchodzi brygady, których przestoje w pracy nie są minimalizowane.

Skład liczbowy brygady powinien być dobrany do realizacji procesu budowlanego w taki sposób, aby jej wielkość frontu pracy była zbliżona do wielkości frontu robót na działce roboczej (front robót jest to część działki roboczej, na której brygada robocza wykonuje w określonym czasie założony proces budowlany). Stąd wynika kolejne założenie, że w jednym czasie na jednej działce roboczej może być wykonywany tylko jeden proces. Oczywiście, charakter realizowanych procesów w budownictwie jest bardzo zróżnicowany i występują procesy, których jednoczesne wykonywanie na jednej działce roboczej nie koliduje ze sobą. Z tego względu zdefiniowano zbiory H_j , które zawierają w sobie wszystkie procesy mogące być realizowane jednocześnie z procesem j .

Ze względu na efekt uczenia się brygad (ich wydajność wzrasta, gdy mają możliwość powtarzania zadań na kolejnych działkach roboczych) przyjęto, że brygadę przydziela się do realizacji procesu na wszystkich działkach w przedsięwzięciu. Decyzje o przydzieleniu brygady r do wykonania procesu j są modelowane za pomocą zmiennych, których wartość liczbową odpowiada numerowi brygady wykonującej proces j :

$$x_j = \lceil x_j' \rceil, \quad (5.5)$$

gdzie poprzez oznaczenie $\lceil * \rceil$ rozumie się zaokrąglenie wartości w górę do jedności, a zmienna ciągła x_j' jest zdefiniowaną następująco:

$$x_j' \in [0, |R_j|], \quad j \in V. \quad (5.6)$$

Warto zwrócić uwagę, że numery brygad nie są globalne, lecz lokalne, tzn. każdy proces j ma przypisany zbiór brygad $R_j \subset R$ o własnej numeracji od 1 do jego liczebności (moc zbioru R_j).

Oprócz zmiennych całkowitoliczbowych x_j w modelu wprowadzono również zmienne binarne postaci:

$$x_{jr} = \begin{cases} 1, & \text{gdy proces } j \in V \text{ jest wykonywany przez brygadę } r \in R_j, \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku,} \end{cases} \quad (5.7)$$

w oznaczeniach których stosuje się globalne numery brygad. Oczywiście istnieje prosta zależność pomiędzy zmiennymi x_j oraz x_{jr} . Wprowadzenie dwóch

zmiennych modelujących te same decyzje wynikało z wymagań opracowanego systemu oraz prostoty jego obsługi.

Z założenia o przydziale brygady do realizacji danego procesu na wszystkich działkach wynikają zależności między procesami o charakterze organizacyjnym. Mianowicie, wykonanie procesu wykonywanego na działce k bezpośrednio poprzedzającej działkę l (dla przyjętej kolejności zajmowania działek roboczych w obiekcie) musi się zakończyć zanim rozpocznie się realizacja tego samego procesu na działce l .

W pracy uwzględniono cztery rodzaje zależności pomiędzy procesami:

- powiązania technologiczne pomiędzy procesami budowlanymi na działce roboczej, opisane za pomocą łuków sieci grafu skierowanego,
- powiązania pomiędzy tymi samymi procesami wykonywanymi na kolejnych działkach roboczych, wynikające z kolejności realizacji działek i obiektów,
- powiązania pomiędzy procesami na tej samej działce, wynikające z możliwości wykonywania na każdej działce tylko jednego procesu budowlanego w tym samym czasie (nie dotyczy to procesów $j: j \in V \wedge j \in H_j$),
- powiązania pomiędzy procesami wykonywanymi przez tę samą brygadę, wynikające z jej dostępności.

Wszystkie te zależności są typu „rozpoczęcie po zakończeniu poprzednika”. Jednym z głównych zadań harmonogramowania jest ustalenie terminów rozpoczęcia realizacji poszczególnych procesów przedsięwzięcia. Terminy te, ustalane dla każdego procesu $j \in V$ na każdej działce $l \in L$, są modelowane jako zmienna całkowitoliczbowa s_{jl} , przy czym:

$$s_{jl} \geq 0, \quad \forall j \in V, \forall l \in L. \quad (5.8)$$

Terminy rozpoczęcia realizacji poszczególnych procesów przedsięwzięcia wyznaczane są wpieryw dla procesu j na każdej działce od 1 do l , a następnie dla kolejnego realizowanego procesu na działkach od 1 do l .

Przez wzgląd na zróżnicowanie liczebności brygad, ich doświadczenia i umiejętności w realizacji poszczególnych asortymentów robót oraz różnice w nakładach czasu pracy na poszczególnych działkach roboczych (zawsze dąży się do tworzenia działek o takim samym nakładzie pracy do wykonania, ale nie zawsze jest to możliwe ze względu na uwarunkowania projektowe i technologiczne) czasy wykonania procesów na różnych działkach przez różne brygady mogą się od siebie różnić. Stąd też wykonawca $r \in R_j$ będzie realizować proces j na działce l w czasie t_{jlr} .

Faktyczny czas wykonywania poszczególnych procesów przedsięwzięcia budowlanego D_{jl} dla danego rozwiązania jest zmienną zależną od zmiennej x_{jr} oraz czasu t_{jlr} wykonywania danego procesu j na działce l przez brygadę r . Zależność tę można zapisać w postaci równania:

$$D_{jl} = x_{jr} \cdot t_{jlr}, \quad \forall j \in V, \forall l \in L, \forall r \in R. \quad (5.9)$$

Faktyczne terminy zakończenia realizacji poszczególnych procesów przedsięwzięcia budowlanego zależą od wartości zmiennych D_{jl} oraz s_{jl} . Termin zakończenia wykonywania procesu $j \in V$ na działce $l \in L$ oznaczono jako f_{jl} .

Termin dyrektywny zakończenia realizacji przedsięwzięcia budowlanego jest zawsze odgórnie narzucony, czy to przez umowę między wykonawcą robót budowlanych a inwestorem, czy przez instytucję finansującą inwestycję czy przez dział produkcji podstawowej przedsiębiorstwa. Z tego względu w pracy termin zakończenia realizacji przedsięwzięcia jest ograniczony za pomocą dyrektywnie ustalonego terminu T .

W celu możliwości przeszukiwania przestrzeni rozwiązań i znajdowania suboptymalnego rozwiązania modelu matematycznego algorytm musi mieć możliwość przesuwania procesów na osi czasu (ustalania terminów rozpoczęcia później niż w terminach najwcześniejszych). W przyjętym rozwiązaniu ta możliwość jest realizowana przez zmienne:

- Całkowitoliczbową y_p , która określa liczbę dni, o którą należy opóźnić realizację pierwszego procesu obiektu p (w stosunku do terminu najwcześniejszego). Wyznaczana jest dla każdego, za wyjątkiem pierwszego, obiektu przedsięwzięcia. Wprowadza się również zmienną o charakterze ciągłym y_p' . Istnieje prosta zależność pomiędzy zmienną y_p' i wartością y_p opisaną równaniem:

$$\lceil y_p' \rceil = y_p, \quad \forall p \in P. \quad (5.10)$$

Zmienna y_p' może przybierać wartości z zakresu $[0, Y_p]$, gdzie Y_p oznacza horyzont czasowy dla zmiennych y_p' i y_p .

- Całkowitoliczbową z_j , która określa liczbę dni, o którą należy opóźnić realizację procesu $j=1$ na pierwszym realizowanym obiekcie (w stosunku do terminu najwcześniejszego). Wyznaczana jest dla każdego, za wyjątkiem pierwszego, procesu w sieci zależności.

Wprowadza się również zmienną o charakterze ciągłym z_j' . Istnieje prosta zależność pomiędzy zmienną z_j' i wartością z_j opisana równaniem:

$$\lceil z_j' \rceil = z_j, \quad \forall j \in V. \quad (5.11)$$

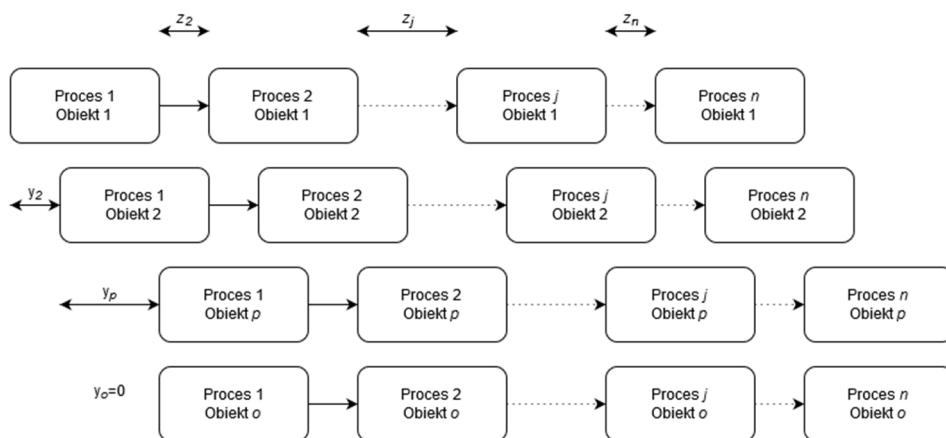
Zmienna z_j' może przybierać wartości z zakresu $[0, Z_j]$, gdzie Z_j oznacza horyzont czasowy dla zmiennych z_j' i z_j .

Zmienne y_1 oraz z_1 nie są określone dla pierwszej działki i pierwszego procesu, ponieważ, ze względu na warunek brzegowy:

$$s_{11} = 0, \quad (5.12)$$

realizacja pierwszego procesu na pierwszej działce roboczej rozpoczyna się w terminie 0.

Schemat działania zmiennej y_p oraz z_j przedstawiono na rysunku 5.2.



Rysunek 5.2. Schemat przedstawiający działanie zmiennych y_p oraz z_j (na rysunku pominięto zależności o charakterze organizacyjnym oraz procesy na działkach roboczych poszczególnych obiektów)

Zestawienie parametrów oraz zmiennych wykorzystanych w opracowanym modelu zawarto w Tabeli 5.1.

Ocena możliwych wariantów harmonizacji wykonania procesów przedsięwzięcia budowlanego będzie dokonywana przy zastosowaniu następujących kryteriów:

- minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięcia,

- minimalizacji przestoju w pracy brygad roboczych,
- minimalizacji czasu realizacji obiektów budowlanych, pozostająca w korelacji z redukcją przestoju w pracy na frontach.

Kryteria te nie są zbieżne, co oznacza, że kryteriom tym rozpatrywanym osobno mogą odpowiadać wyniki odległe od siebie w przestrzeni rozwiązań. Przykładowo, minimalizacji przestoju w pracy brygad roboczych może odpowiadać bardzo długi, nawet przekraczający termin dyrektywny, czas realizacji przedsięwzięcia. Dlatego uzasadnione jest rozpatrywanie wszystkich kryteriów jednocześnie i użycie narzędzi optymalizacji wielokryterialnej do wyznaczenia najlepszego (w najwyższym stopniu spełniającego wymagania decydenta) harmonogramu przedsięwzięcia budowlanego.

Tabela 5.1. Używane w modelu oznaczenia zmiennych, parametrów oraz zbiorów

Zmienna	Rodzaj	Opis
c_p	całkowitoliczbowa	oznacza kolejność wykonania obiektu budowlanego p w permutacji c
c_p'	ciągła	modeluje kolejność wykonania obiektu budowlanego p w permutacji c
x_j	binarna	odzwierciedla decyzję o przydzieleniu brygady r do wykonania procesu j
x_j'	ciągła	odzwierciedla decyzję o przydzieleniu brygady r do wykonania procesu j
y_p	całkowitoliczbowa	określa liczbę dni, o którą należy opóźnić realizację pierwszego procesu obiektu p (w stosunku do terminu najwcześniejszego)
y_p'	ciągła	określa liczbę dni, o którą należy opóźnić realizację pierwszego procesu obiektu p (w stosunku do terminu najwcześniejszego)
z_j	całkowitoliczbowa	określa liczbę dni, o którą należy opóźnić realizację procesu $j = 1$ na pierwszym realizowanym obiekcie (w stosunku do terminu najwcześniejszego)
z_j'	ciągła	określa liczbę dni, o którą należy opóźnić realizację procesu $j = 1$ na pierwszym realizowanym obiekcie (w stosunku do terminu najwcześniejszego)
s_{jl}	całkowitoliczbowa	termin rozpoczęcia realizacji procesu j na działce l

c. d. Tabeli 5.1. Używane w modelu oznaczenia zmiennych, parametrów oraz zbiorów

Zmienna	Rodzaj	Opis
D_{jl}	całkowitoliczbowa	faktyczny czas realizacji procesu j na działce l
f_{jl}	całkowitoliczbowa	termin zakończenia realizacji procesu j na działce l
Parametr	Opis	
g_p	waga obiektu budowlanego p	
t_{jlr}	czas wykonywania procesu j na działce l przez brygadę r	
T	dyrektywny termin zakończenia realizacji przedsięwzięcia	
Y_p	oznacza horyzont czasowy dla zmiennych y_p' i y_p	
Z_j	oznacza horyzont czasowy dla zmiennych z_j' i z_j	
Zbiory	Opis	
P	zbiór obiektów budowlanych	
L	zbiór działek roboczych	
V	zbiór procesów przedsięwzięcia	
V^{tb}	zbiór przerw technologicznych	
R	zbiór brygad roboczych	
H_j	zbiór procesów mogących być realizowanych jednocześnie z procesem j	
R_j	zbiór brygad roboczych mogących realizować proces j	
R^s	zbiór brygad, których przestoje w pracy nie są minimalizowane	

Problem harmonizacji wykonania procesów wieloobektowego przedsięwzięcia budowlanego można zapisać w postaci następującego modelu matematycznego:

- minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia, co odpowiada minimalizacji terminu zakończenia ostatniego procesu przedsięwzięcia n na ostatniej działce m (dla określonej permutacji c obiektów, która stanowi również zmienną modelu):

$$\min C_1 = f_{nm}, \quad (5.13)$$

- minimalizacja przestojów w pracy brygad roboczych, co odpowiada minimalizacji różnicy zakończenia i rozpoczęcia pracy przez każdą brygadę (nie należącą do zbioru R^s) pomniejszoną o czas realizacji wszystkich realizowanych procesów (za wyjątkiem przerw technologicznych):

$$\begin{aligned} \min C_2 &= \sum_{r \in R/R^s} (f_{jm} \cdot x_{jr} - s_{j1} \cdot x_{jr}) - \sum_{l \in L} \sum_{j \in V/V^{tb}} D_{jl}, \\ \forall (f_{jm} \cdot x_{jr}) &: f_{jm} \cdot x_{jr} \geq f_{km} \cdot x_{kr} \wedge k, j \in V/V^{tb}, \\ \forall (s_{g1} \cdot x_{gr}) &: s_{g1} \cdot x_{gr} \leq s_{h1} \cdot x_{hr} \wedge x_{gr} \neq 0 \wedge g, h \in V/V^{tb}, \end{aligned} \quad (5.14)$$

- minimalizacja czasu realizacji obiektów budowlanych, co odpowiada ważonej różnicy między zakończeniem i rozpoczęciem pracy na każdym obiekcie budowlanym:

$$C_3 = \sum_{p \in P} g_p \cdot (f_{nm_p} - s_{1l_p}), \quad (5.15)$$

przy spełnieniu następujących ograniczeń modelu:

- możliwość przydziału tylko jednej brygady do każdego z procesów oraz konieczność wykonania każdego z procesów:

$$\sum_{r \in R_j} x_{jr} = 1, \quad \forall j \in V, \quad (5.16)$$

- przedsięwzięcie rozpoczyna się w terminie zerowym:

$$s_{11} = 0, \quad (5.17)$$

- termin realizacji całego przedsięwzięcia mieści się w dyrektywnym terminie przedsięwzięcia:

$$f_{nm} \leq T, \quad (5.18)$$

- spełnienie wymagań następstwa procesów, wynikających z powiązań pomiędzy procesami budowlanymi na działce roboczej i opisanego za pomocą łuków sieci grafu skierowanego:

$$f_{il} \cdot v_{ij} \leq s_{jl} \cdot v_{ij}, \quad \forall i, j \in V, \forall l \in L, \quad (5.19)$$

- spełnienie wymagań następstwa procesów wynikających z powiązań pomiędzy tymi samymi procesami wykonywanymi na kolejnych działkach roboczych w tym samym obiekcie:

$$f_{jl_p} \leq s_{jl_p}, \quad \forall j \in V/V^{tb}, \forall l \in L_p, \forall p: p \in P, \quad (5.20)$$

- spełnienie wymagań następstwa procesów wynikających z powiązań pomiędzy tymi samymi procesami wykonywanymi na kolejnych obiektach budowlanych dla każdej ich permutacji:

$$\begin{aligned}
& \forall j \in V / V^{tb}, \forall m_{c_p} : c_p \neq m \wedge m_{c_p} \in L_{c_p}, \\
& f_{jm_{c_p}} \leq s_{jl_{c_{p+1}}}, \quad \forall l_{c_{p+1}} : l_{c_{p+1}} = 1 \wedge l_{c_{p+1}} \in L_{c_{p+1}}, \\
& \forall p, p+1 : p, p+1 \in P \wedge p \neq o, \forall c \in P_o,
\end{aligned} \tag{5.21}$$

- spełnienie wymagań następstwa procesów wynikających z powiązań pomiędzy procesami na tej samej działce i wynikających z możliwości wykonywania na każdej działce tylko jednego procesu budowlanego w tym samym czasie (jeśli nie należą do zbiorów H_j):

$$\begin{aligned}
& f_{il} \leq s_{jl}, \\
& f_{jl} \leq s_{kl}, \quad \forall i, j, k \in V / H_j, l \in L,
\end{aligned} \tag{5.22}$$

- spełnienie wymagań następstwa procesów wynikających z powiązań pomiędzy procesami wykonywanymi przez tę samą brygadę i wynikających z jej dostępności:

$$\begin{aligned}
& (s_{il} + D_{il}) \cdot x_{ir} \leq s_{jl} \cdot x_{jr} \vee (s_{jl} + D_{jl}) \cdot x_{jr} \leq s_{il} \cdot x_{ir}, \\
& \forall r : r \in R_i \wedge r \in R_j, \forall i, j \in V, l \in L.
\end{aligned} \tag{5.23}$$

Ograniczenie (5.23) jest zapisane w postaci nieliniowej. Algorytm metaheurystyczny wykorzystywany do rozwiązania zadania w niniejszej pracy potrafi znaleźć rozwiązanie także problemów z nieliniowymi ograniczeniami. W przypadku chęci zapisania ograniczenia (5.23) w postaci liniowej należałoby wprowadzić zmienną binarną y_{ukvl} , która jest równa 1 gdy, proces u na działce k jest realizowany przed procesem v na działce l , oraz równym 0, kiedy proces v na działce l jest realizowany przed procesem u na działce k . Ograniczenie (5.23) przyjęłoby wówczas postać:

$$\begin{aligned}
& s_{u,k} + D_{u,k} \leq s_{v,l} + M \cdot (1 - y_{u,k,v,l}) + M \cdot (2 - x_{u,r} - x_{v,r}), \\
& s_{v,l} + D_{v,l} \leq s_{u,k} + M \cdot y_{u,k,v,l} + M \cdot (2 - x_{u,r} - x_{v,r}), \\
& \forall (u, v) \in J_r, \forall r \in R_j, \forall k, l \in L
\end{aligned} \tag{5.24}$$

gdzie J_r jest zbiorem par procesów (u, v) dla których należy sprawdzić warunki niejednoczesności wykonania. Do zbiorów par procesów J_r należą wszystkie

procesy na wszystkich działkach roboczych mogące być potencjalnie wykonywane przez wykonawcę $r : (u, v) \in J_r \Leftrightarrow u \in V \wedge v \in V \ u < v$.

Podejmowane w monografii zadanie można sformułować następująco: znaleźć takie $c \in P_o$ (kolejność realizacji obiektów budowlanych), $x_{jr} \ \forall j \in V, \forall r \in R$ (dokonać przydziału brygady do realizacji procesów budowlanych) oraz $s_{jl} \ \forall j \in V, \forall l \in L$ (ustalić terminy realizacji procesów budowlanych), aby czas realizacji całego przedsięwzięcia (5.13) i poszczególnych obiektów (5.15) oraz przerwy w pracy brygad (5.14) były minimalne, przy jednoczesnym dochowaniu terminu dyrektywnego (5.18), alokacji tylko jednej brygady do każdego procesu (5.16) rozpoczęciu realizacji przedsięwzięcia w terminie zerowym (5.17) i spełnieniu wymagań wynikających z powiązań pomiędzy procesami budowlanymi na działce roboczej (5.19), pomiędzy tymi samymi procesami wykonywanymi na kolejnych działkach roboczych w tym samym obiekcie (5.20) oraz pomiędzy kolejnymi obiektami w danej permutacji (5.21). Zachowane powinny być również zależności pomiędzy procesami na tej samej działce, wynikające z możliwości wykonywania na każdej działce tylko jednego procesu budowlanego w tym samym czasie (5.22) oraz powiązań pomiędzy procesami wykonywanymi przez tę samą brygadę, wynikające z jej dostępności (5.23).

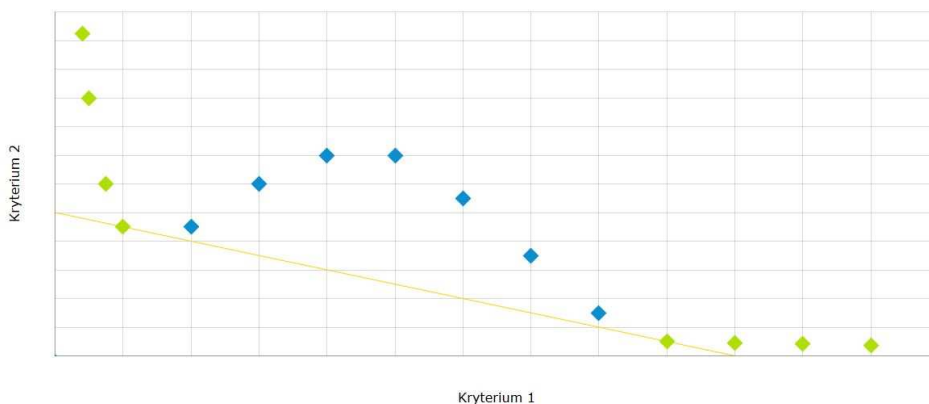
Zdefiniowany powyżej problem posiada bardzo dużą złożoność, co wynika z olbrzymiej przestrzeni poszukiwań, bardzo dużej liczby ograniczeń, ale także niewielkiej liczby rozwiązań dopuszczalnych. Taka struktura problemu, połączona z wielkością problemów występujących w rzeczywistości, jest niemal nierozwiązywalna za pomocą znanych algorytmów wyznaczających rozwiązania dokładne (np. metoda podziału i ograniczeń). Dlatego w pracy problem zostanie rozwiązany za pomocą algorytmu optymalizacji rojem cząstek, należącym do klasy algorytmów metaheurystycznych.

5.2. Metoda rozwiązania

Pomiędzy zdefiniowanymi w równaniach (5.13) – (5.15) kryteriami optymalizacji harmonogramów budowlanych występuje konflikt, ponieważ nie jest możliwa poprawa wartości jednego z nich, bez pogarszania poziomu realizacji przynajmniej jednego z pozostałych kryteriów przy zachowaniu zadeklarowanych ograniczeń (5.16) – (5.23). Zagadnienie, z zakresu optymalizacji wielokryterialnej jest określane w literaturze jako problem poszukiwania rozwiązania kompromisowego. Wybór rozwiązania powinien być dokonany spośród rozwiązań dopuszczalnych, czyli takich, które spełniają wszystkie ograniczenia, a obliczone dla nich wartości kryteriów mieszczą się w akceptowalnych dla decydenta przedziałach zmienności [228]. Istotnym podzbiorem rozwiązań dopuszczalnych problemu są rozwiązania niezdominowane (optymalne w sensie Pareto), czyli takie, dla których wartość żadnej funkcji celu nie może być polepszona bez jednoczesnego pogorszenia wartości jednej z pozostałych funkcji

celu. Jednym z bardziej popularnych podejść do rozwiązywania problemów optymalizacji wielokryterialnej jest redukowanie ich do problemów z jedną zastępczą funkcją celu. Przykładem takiej funkcji jest suma ważona osiągnięć dla poszczególnych kryteriów optymalizacji. Jedynym ograniczeniem w stosowaniu tej metody jest możliwość jej używania jedynie dla wypukłych problemów optymalizacji wielokryterialnej. W przypadku optymalizacji dla dwóch kryteriów i problemu niewypukłego (rys 5.3.) niektóre z rozwiązań niezdominowanych (niebieskie) są „schowane” w niewypukłej przestrzeni celów i nie mogą być wygenerowane za pomocą liniowej sumy ważonej wartości poszczególnych funkcji optymalizacji [229].

Jedną z metod rozwiązywania problemów optymalizacji wielokryterialnej, opartą na sprowadzeniu zagadnienia do problemu jednokryterialnego, i którą można zastosować zarówno dla problemów z wypukłymi jak i wklęsłymi zbiorami rozwiązań dopuszczalnych (w przestrzeni kryteriów) jest metoda Czebyszewa z wagami. Metoda ta jest powszechnie stosowana w teorii programowania celowego i wyraża wielkość strat wynikającą z różnic pomiędzy realizacjami celów w generowanych rozwiązaniach a poziomami aspiracji ustalonymi przez decydenta.



Rysunek 5.3. Przykładowy niewypukły problem optymalizacji wielokryterialnej z zaznaczonym zbiorem rozwiązań niezdominowanych (kolorem niebieskim są zaznaczone „schowane rozwiązania optymalne w sensie Pareto, a kolorem zielonym – pozostałe) (na podstawie [229])

Funkcja ta (metakryterium) może być zapisana dla rozpatrywanego w pracy problemu optymalizacji trójkryterialnej w następujący sposób:

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

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

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1,$$
(5.25)

gdzie:

w_1 – waga kryterium minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięcia,

w_2 – waga kryterium minimalizacji przestoju w pracy brygad roboczych,

w_3 – waga kryterium minimalizacji czasu realizacji obiektów budowlanych,

C_1^o, C_2^o, C_3^o – poziomy aspiracji poszczególnych funkcji celu otrzymane poprzez rozwiązanie zadań jednokryterialnych (minimalizacji poszczególnych funkcji celu) z ograniczeniami zadania wielokryterialnej optymalizacji.

Z całej rodziny funkcji z_z tylko funkcja:

$$\min z_\infty = \max \left\{ w_1 \cdot \frac{C_1 - C_1^o}{C_1^o}, w_2 \cdot \frac{C_2 - C_2^o}{C_2^o}, w_3 \cdot \frac{C_3 - C_3^o}{C_3^o} \right\},$$
(5.26)

która wyraża wielkość maksymalnej ważonej straty wynikającej z różnicy pomiędzy realizacjami celów w generowanych rozwiązaniach a poziomami aspiracji ustalonymi przez decydenta, umożliwia uzyskanie wszystkich rozwiązań silnie niezdominowanych, niezależnie od formy ograniczeń problemu [230]–[232]. Ponieważ może ona także generować rozwiązania niezdominowane, w pracy zastosowano następującą funkcję celu (metakryterium):

$$\min z_{\infty, \rho} = z_\infty + \rho \cdot \left(\frac{C_1 - C_1^o}{C_1^o} + \frac{C_2 - C_2^o}{C_2^o} + \frac{C_3 - C_3^o}{C_3^o} \right),$$
(5.27)

gdzie:

ρ – dostatecznie mała liczba.

Rezultatem zastosowania tej funkcji zawsze jest rozwiązanie niezdominowane, jednak nie każde rozwiązanie optymalne w sensie Pareto może zostać znalezione za jej pomocą [230]–[232].

Występujące we wzorach (5.23)–(5.25) wagi kryteriów w_i wyrażają preferencje decydenta odnoszące się do istotności poszczególnych celów oceny harmonogramów budowlanych. Odpowiednie ustalenie tych wag jest kluczowym zagadnieniem ze względu na jakość otrzymanego rozwiązania i jego przydatność praktyczną do realizacji. Główną trudnością w wyznaczaniu wag kryteriów jest konieczność rozpoznania preferencji decydenta. Jest to trudne na etapie budowy

modelu (*a priori*), ze względu na brak znajomości wpływu wag na jakość uzyskiwanych rozwiązań czy konieczność posiadania doświadczenia czy wiedzy eksperckiej. Z tego względu wykorzystuje się często metody pozwalające na określenie wag *a posteriori*, bazując na ocenie generowanych rozwiązań, jak również metody wspomagania grupowego podejmowania decyzji. Ze względu na duże znaczenie procesu ustalania wag kryteriów optymalizacji harmonogramów dla spełnienia preferencji decydenta i jakości rozwiązania umożliwiono zaproponowano w pracy w tym celu trzy metody:

- I. Dyrektywne wskazanie przez decydenta wag kryteriów. Jeśli decydent jest w stanie określić swoje preferencje w postaci istotności poszczególnych kryteriów, wskazuje wektor wag kryteriów w_i . Zaletą tej metody jest jej prostota i szybkość. Wadami są subiektywność wyboru wag kryteriów oraz duże uzależnienie jakości wyniku od doświadczenia i wiedzy decydenta.
- II. Wykorzystanie autorskiej grupowej metody wspomagania decyzji. W ostatnich latach występuje ogólnoswiatowa tendencja demokratyzacji organizacji, tworzenia globalnych sieci powiązań i wykorzystywania zaawansowanych technik umożliwiających kolektywne podejmowanie decyzji. Błędy popełnione przy podejmowaniu strategicznych decyzji mogą być niezwykle kosztowne, dlatego organizacje próbują wykorzystać synergę doświadczeń i informacji posiadanych przez każdego z ekspertów, aby zwiększyć prawdopodobieństwo podjęcia najlepszej z możliwych decyzji. Chcąc wpisać się w ten trend, w algorytmie jest również możliwość grupowego ustalenia wag. Opcja ta jest oparta na autorskiej metodzie grupowego wspomagania decyzji, która jest rozwinięciem Fuzzy Analytic Hierarchy Process w ujęciu Mikhailova przedstawionej w pracach [233], [234], a którą przedstawiono w pracy [235]. Zakłada ona agregację ocen decydentów za pomocą zbiorów rozmytych typu 2, dzięki czemu możliwe jest uwzględnienie nieprecyzyjności ocen decydentów. Natomiast dzięki zastosowaniu estymatora nieobciążonego odchylenia standardowego do wyznaczenia kompromisowej oceny, jest możliwe uwzględnienie niepewności oszacowania w przypadku małej liczebności grupy ekspertów oraz różnic w ich ocenach.
- III. Użycie podejścia wzorowanego na metodzie przeglądu wiązką światła (ang. *Light Beam Search* – LBS), która należy do grupy interaktywnych metod wielokryterialnego wspomagania decyzji. Została ona zaproponowana przez polskich uczonych Jaszkiewicza i Słowińskiego [236], [237]. LBS jest metodą dialogową, składa się z dwóch faz: fazy obliczeniowej i fazy decyzyjnej. Po każdej fazie obliczeniowej, w której następuje wyznaczenie sąsiedztwa punktu centralnego, jest podejmowana przez decydenta decyzja, na podstawie oceny generowanych rozwiązań.

Punkt centralny pochodzi z wcześniejszej iteracji lub jest efektem rzutowania punktu referencyjnego na zbiór rozwiązań niezdominowanych (rzutowanie to przypomina oświetlenie zbioru rozwiązań niezdominowanych, stąd nazwa metody). Rozwiązania niezdominowane (lub ich przybliżenia) będą generowane przy zastosowaniu algorytmu optymalizacji rojem cząstek opisanego w rozdziale 5.3.7.

5.3. Algorytmizacja obliczeń oraz obsługa opracowanego systemu komputerowego wspomagania harmonizacji procesów budowlanych

5.3.1. Struktura wprowadzanych danych do systemu

Dane wprowadzane do opracowanego systemu i wykorzystywane w celu harmonizacji wykonania procesów budowlanych gromadzone są w plikach tekstowych. Szczegółowy opis struktury systemu komputerowego znajduje się w rozdziale 5.4. Edycja danych wprowadzanych od systemu może odbywać się za pomocą najprostszych edytorów tekstu takich jak Notatnik czy Wordpad. Pliki z danymi mogą być wczytywane z dowolnego nośnika: dysku twardego komputera, płyty CD, dysku zewnętrznego, pamięci Flash czy z chmury internetowej. Plik z danymi wprowadzanymi do systemu musi mieć ściśle określoną nazwę „Input” oraz musi być umieszczony w ściśle określonej lokalizacji na dysku – folderze „Debug”. Omawiany plik „Input” musi posiadać również ściśle określoną strukturę składającą się z następujących sekcji:

- sekcja PSO – w której definiuje się parametry związane z funkcjonowaniem algorytmu metaheurystycznego optymalizacji rojem cząstek,
- sekcja macierzy – w której definiuje się relacje pomiędzy procesami w postaci macierzy $[v_{ij}]$,
- sekcja OBJECTTYPE – w której definiuje się część danych związanych z obiektami budowlanymi, procesami i brygadami roboczymi m.in. przyporządkowanie brygad zdolnych do realizacji poszczególnych procesów budowlanych,
- sekcja OBJECT – w której definiuje się pozostałą część danych związanych z realizacją obiektów budowlanych, m.in. czasy wykonania poszczególnych procesów przez konkretne brygady robocze.

Kolejne etapy algorytmu rozwiązania problemu, stanowiącego podstawę tworzenia systemu komputerowego wspomagającego harmonizację wykonania procesów przedsięwzięcia budowlanego, przedstawiono w kolejnych punktach pracy:

- Podział przedsięwzięcia na obiekty i działki robocze (5.3.1.).

- Scalenie robót budowlanych w pakiety robót (5.3.2.).
- Ustalenie ważności kryteriów oceny harmonogramu za pomocą metody I, II lub III (5.3.3.).
- Przyporządkowanie możliwych brygad roboczych do wykonywania procesów przedsięwzięcia (5.3.4.).
- Ustalenie czasów realizacji procesów wykonywanych przez poszczególne brygady robocze wykonawcy lub brygady robocze podwykonawców (5.3.5.).
- Utworzenie harmonogramu robót przedsięwzięcia budowlanego (5.3.6.).
- Weryfikacja przez decydenta otrzymanego rozwiązania (5.3.7.).

5.3.2. Podział przedsięwzięcia na obiekty i działki robocze

W celu umożliwienia stosowania metod potokowych należy wyodrębnić obiekty budowlane i działki robocze, na których będzie powtarzana realizacja procesów przez brygady robocze. Wydzielenie z przedsięwzięcia obiektów budowlanych najczęściej jest dosyć naturalne i nie nastęrcza wielu trudności, przykładowo w realizacji osiedla domów jedno- bądź wielorodzinnych obiektami budowlanymi będą pojedyncze wolnostojące budynki, a w przypadku remontu zespołu mostów – poszczególne mosty. Konkretny obiekt definiuje się w pliku Input w sekcji OBJECT wpisując słowo kluczowe wraz z numerem porządkowym obiektu (np. 0):

#OBJECT 0

W powyższy sposób należy zdefiniować każdy wyodrębniony obiekt budowlany.

Wielkość poszczególnych obiektów może być różna, co prowadzi do różnic w pracochłonnościach i czasach wykonania poszczególnych robót (i całych obiektów). Kryterium minimalizacji czasu realizacji poszczególnych obiektów, proponowane jako kryterium opisujące stopień wykorzystania dostępnych frontów robót, powinno uwzględniać różnice w wielkościach frontów robót i nakładach czasu pracy na realizację poszczególnych obiektów. W pracy funkcji celu (5.15) wprowadzono z tego powodu wagi obiektów $g_p \quad \forall p \in P$. Obliczone za pomocą wzoru (5.4) wartości wag obiektów należy wprowadzić do pliku Input w sekcji OBJECT tuż za komendą definiującą dany obiekt (#OBJECT) i poprzedzić słowem kluczowym GP. Przykład zdefiniowania w pliku „Input” wagi obiektu $g_p = 0,169$ znajduje się poniżej:

#OBJECT 0
GP 0.169

Podczas wyodrębniania działek z przedsięwzięcia budowlanego należy wziąć pod uwagę następujące czynniki:

- ilości robót na każdej działce powinny być zbliżone, a w celu wyznaczenia działek roboczych odpowiedniej wielkości można użyć krzywej sumowanej ilości robót [4],
- uwarunkowania konstrukcyjne, architektoniczne i konstrukcyjne ograniczające miejsca gdzie można dokonać podziału obiektu na działki, np. w przypadku stropów i belek monolitycznych żelbetowych,
- możliwość zastosowania jednego podziału dla wszystkich procesów budowlanych w obiekcie,
- wymagany czas realizacji przedsięwzięcia,
- wielkość frontów pracy brygad roboczych.

Ustaloną na podstawie analizy liczbę działek dla każdego obiektu należy wprowadzić za pomocą słowa kluczowego UNITCOUNT w sekcji OBJECT tuż za poleceniem GP. Przykładowa liczba działek wprowadzona do pliku Input znajduje się poniżej:

```
#OBJECT 0  
GP 0.169  
UNITCOUNT 3
```

Warto zwrócić uwagę, że przyjęta w pracy hierarchiczna struktura przedsięwzięcia jest bardzo ogólna i umożliwia zamodelowanie, oprócz rozpatrywanego przypadku przedsięwzięcia wieloobektowego, wielu innych zamierzeń inwestycyjnych. Przykładowo – realizacja robót na kilku działkach jednego obiektu, niejednorodnych o dowolnej kolejności realizacji (przy dowolnej kolejności zajmowania działek przez brygady), może zostać zamodelowana jako przedsięwzięcie wieloobektowe, którego obiekty odpowiadają poszczególnym działkom roboczym. Z kolei przedsięwzięcie polegające na budowie obiektu, w którym wyodrębniono kilka działek z ustaloną kolejnością może zostać zamodelowane jako przedsięwzięcie wieloobektowe z jednym obiektem i zdefiniowaną liczbą działek. Przyjęta hierarchiczna struktura umożliwia również modelowanie przedsięwzięcia niepowtarzalnego o jednym obiekcie budowlanym i jednej działce roboczej.

5.3.3. Scalenie robót budowlanych w pakiety robót

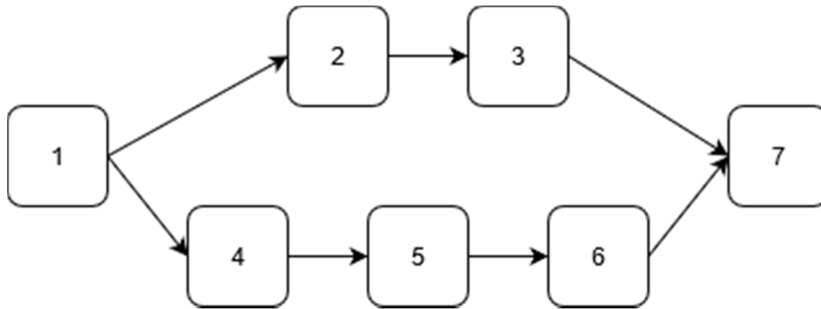
Proces budowlany (pakiet robót) jest zespołem technologicznie powiązanych ze sobą procesów produkcyjnych (robót) wykonywanych na placu budowy lub zapleczu, których celem jest wytworzenie określonej produkcji związanej z wykonaniem wybranego elementu obiektu budowlanego [4]. Scalanie procesów produkcyjnych w procesy budowlane jest czynnością trudną do wykonania dla osób bez odpowiedniego doświadczenia i praktyki budowlanej, ponieważ nie

istnieją żadne ścisłe procedury określające zasady tworzenia pakietów robót. Z tego względu proces scalania robót jest często określany mianem „sztuki budowlanej” i jego jakość zależy głównie od doświadczenia i umiejętności osoby go przeprowadzającej.

Po ustaleniu liczby i zakresu rzeczowego procesów budowlanych należy zdefiniować zależności pomiędzy nimi. Głównymi rodzajami zależności pomiędzy procesami budowlanymi są powiązania technologiczne i organizacyjne. Przykładem zależności technologicznej może być następstwo procesów wynikające z kolejności technologicznej, z konstrukcji, układu elementów i ustrojów budowlanych, np. strop nad pierwszą kondygnacją obiektu może być wykonywany po wymurowaniu ścian pierwszej kondygnacji. Innym przykładem zależności technologicznych jest przerwa technologiczna wynikająca z konieczności uzyskania przez beton wymaganej wytrzymałości. Zależności organizacyjne zwykle wynikają z ograniczeń w dostępności zasobów czynnych oraz przyjętej organizacji brygad. Na przykład jeżeli zorganizowana została tylko jedna brygada branżowa murarzy, to proces murowania ścian na kolejnej działce może rozpocząć się po zakończeniu tego procesu na działce poprzedniej.

Liczbę procesów przedsięwzięcia oraz zależności pomiędzy nimi definiuje się w macierzy $[v_{ij}]$. Jest to macierz kwadratowa o liczbie kolumn i wierszy równym liczbie ustalonych procesów. Jej elementy mogą być jedynie równe $v_{ij} = 1$ w przypadku, kiedy pomiędzy procesem i i procesem j występuje zależność technologiczna bądź organizacyjna, oraz $v_{ij} = 0$ w przeciwnym przypadku. Ponieważ do opisu przedsięwzięcia budowlanego używa się sieci skierowanych, elementy niezerowe mogą znajdować się jedynie ponad główną przekątną. Elementy macierzy $[v_{ij}]$ przykładowego przedsięwzięcia przedstawionego na rys. 5.4 będą równe:

$$[v_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$



Rys. 5.4. Graf przykładowego przedsięwzięcia budowlanego

Definiowaniu liczby procesów przedsięwzięcia budowlanego oraz zależności pomiędzy nimi, a więc wprowadzaniu elementów macierzy $[v_{ij}]$, poświęcona jest cała sekcja pliku Input w opracowywanym systemie, zwana sekcją macierzy. Sekcja ta musi się rozpocząć słowem kluczowym #MATRIX oraz zakończyć komendą #ENDMATRIX. Pomiedzy tymi słowami kluczowymi należy wprowadzić elementy macierzy $[v_{ij}]$. Przykładowa sekcja macierzy pliku Input, dla macierzy (5.28) i grafu przedstawionego na Rys. 5.4, znajduje się poniżej:

```

#MATRIX
0 1 0 1 0 0 0
0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 1 0 0
0 0 0 0 0 1 0
0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 0 0 0
#ENDMATRIX
  
```

Cechą charakterystyczną większości metod harmonogramowania procesów powtarzalnych jest założenie, że na każdej działce roboczej jest wykonywany ten sam zestaw robót. Jednak w praktyce budowlanej dosyć często zdarza się, że na działce może wystąpić proces, który nie występuje na innych działkach roboczych. Przykładem takiego przedsięwzięcia jest realizacja osiedla domów jednorodzinnych, złożonego z kilku budynków jednokondygnacyjnych i jednego dwukondygnacyjnego. Takie przedsięwzięcie można również zamodelować i harmonogramować za pomocą opracowanego systemu. W takim przypadku proces bądź procesy, które będą realizowane tylko na niektórych działkach roboczych, należy wprowadzić do sieci zależności dla wszystkich obiektów, lecz czasy tych procesów na działkach, na których one faktycznie nie będą wykonywane, powinny być równe zero.

5.3.4. Ustalenie ważności kryteriów oceny harmonogramu

Wartości wag kryteriów oceny harmonogramu mają decydujący wpływ na jakość rozwiązania i jego szanse na zastosowanie w praktyce. W celu umożliwienia wyrażenia swoich preferencji przez decydenta (rozumianego jako jedna osoba bądź grupa osób) umożliwiono wykorzystanie trzech metod ustalania wag kryteriów:

1. dyrektywnego wskazania a priori przez decydenta wag kryteriów,
2. grupowej metody wspomaganie decyzji,
3. interaktywnej metody wspomaganie decyzji.

5.3.4.1. Dyrektywne wskazanie wag kryteriów oceny harmonogramu

W przypadku, gdy decydent jest w stanie wyrazić swoje preferencje w postaci wektora wag kryteriów optymalizacji harmonogramu, należy je wprowadzić do pliku „Input” na końcu sekcji PSO, poprzedzając słowem kluczowym #Czebyszew. Przykład zapisu wag w pliku „Input” znajduje się poniżej:

```
#CZEBYSZEW 0.333 0.334 0.333
```

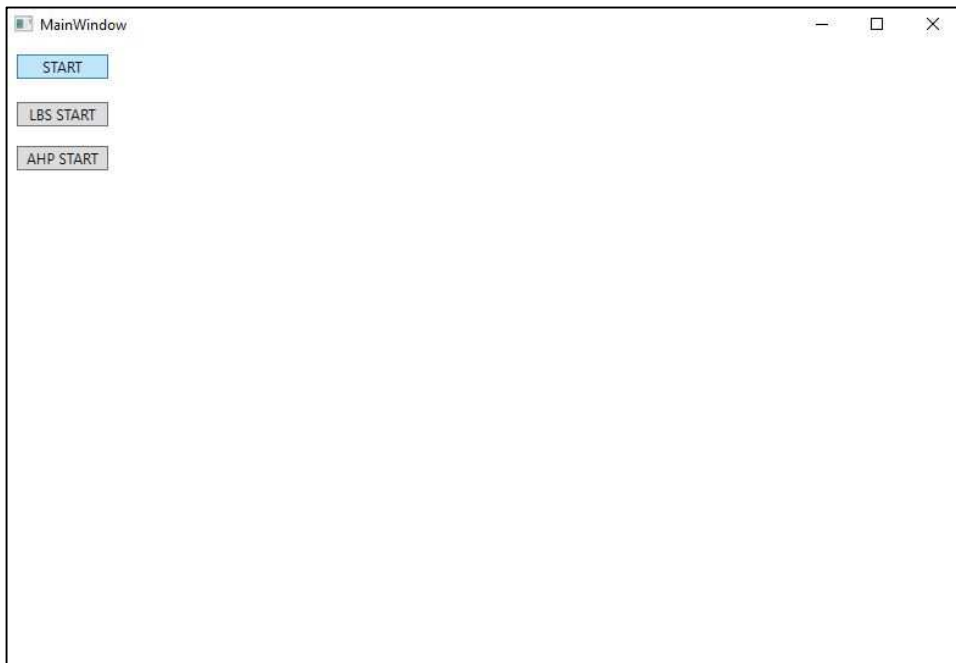
Następnie w oknie dialogowym programu należy wybrać przycisk START – uruchomiony zostanie wówczas tryb ustalania wag kryteriów oceny harmonogramu w sposób dyrektywny (rysunek 5.5.). Program wczyta wagi kryteriów wprowadzone po słowie kluczowym #Czebyszew i – wykorzystując funkcję celu zapisaną w równaniu (5.27) – wygeneruje rozwiązanie zadania optymalizacyjnego. Wyniki uzyskane tym trybem znajdować się będą w pliku tekstowym „Output”.

Podstawowymi zaletami tego podejścia do ustalenia wag kryteriów jest prostota i szybkość. Niestety, ten sposób precyzowania wag kryteriów oceny jest bardzo subiektywny i może prowadzić do uzyskania niesatysfakcjonujących rozwiązań, zwłaszcza w przypadku, gdy decydent nie ma odpowiedniego doświadczenia w korzystaniu z metod optymalizacji wielokryterialnej.

5.3.4.2. Ustalenie wag kryteriów oceny harmonogramu za pomocą grupowej metody wspomaganie decyzji

Ze względu na złożoność rozpatrywanego problemu do ustalenia wag kryteriów optymalizacji harmonogramu budowlanego warto wykorzystać doświadczenie i wiedzę ekspertów. Pomimo mogących wystąpić różnice w ocenach istotności poszczególnych kryteriów, gremium podejmujące decyzję musi dojść do konsensusu. Wspomóc ich w tych złożonych decyzjach mogą dedykowane temu narzędzia – wielokryterialne metody wspomaganie podejmowania decyzji grupowych, między innymi metoda AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*). Jednak niedokładność i nieścisłość opinii ekspertów, będące

nirozzerwalną częścią procesu decyzyjnego, mogą powodować, że oceny wydane przez decydentów w klasycznej metodzie AHP będą nieprecyzyjne [235], [238]. W celu zminimalizowania wpływu wieloznaczności ocen lingwistycznych – zarówno w przypadku opinii poszczególnych ekspertów jak i przy agregacji opinii ostrych – stosuje się zbiory rozmyte. Każdy element zaliczający się do tego zbioru ma przypisany stopień przynależności zawierający się w przydziale $[0,1]$. W przypadku trudności z wyznaczeniem ścisłej wartości przynależności elementu do klasycznego zbioru rozmytego, można zastosować podejście bazujące na stosowaniu zbiorów rozmytych typu 2. Zbiory rozmyte typu 2 mają funkcję przynależności zdefiniowaną w sposób nie ścisły, lecz rozmyty, i są bardzo przydatne przy modelowaniu zagadnień w przypadku występowania nieprecyzyjności lingwistycznych [235], [239], [240].



Rysunek 5.5. Okno dialogowe programu z zaznaczonym przyciskiem START

Proponowana metoda umożliwia określenie wektora wag kryteriów harmonogramów na podstawie porównań parami istotności kryteriów optymalizacji harmonogramów, dokonywanych przez poszczególnych ekspertów. Zagregowane opinie ekspertów są modelowane za pomocą interwałowych trójkątnych zbiorów rozmytych 2 typu. Opracowane podejście stanowi modyfikację metody AHP zaproponowanej przez Mikhailova [233], [234]. Opinie będą wyrażane przez grupę S ekspertów zaangażowaną w proces

podjęcia decyzji. Porównują oni parami b kryteriów oceny harmonogramu. Każdy z ekspertów wydaje $d = b(b-1)/2$ ocen będących współczynnikami odwzorowującymi względną istotność jednego porównywanego kryterium decyzyjnego w porównaniu z drugim. Decydenci posługują się ocenami zgodnie z podstawową skalą Saatey'ego [241], [242]: 1/9, 1/7, 1/5, 1/3, 1, 3, 5, 7, 9, uzupełnioną w razie potrzeby o wartości pośrednie: 1/8, 1/6, 1/4, 1/2, 2, 4, 6, 8 (Tabela 5.2.). W rezultacie otrzymuje się zbiór ocen:

$$\{a_{hqs}\}, \quad \forall h, q: h = 1, 2, \dots, b-1 \quad \wedge \quad q = 2, 3, b \quad \wedge \quad h > q, \quad \forall s = 1, 2, \dots, S, \quad (5.29)$$

gdzie wyrażone przez decydentów opinie są agregowane i przedstawiane w postaci liczby rozmytej $\tilde{a}_{hq} = (l_{hq}, m_{hq}, u_{hq})$ o trójkątnej funkcji przynależności $\mu_{\tilde{a}_{hq}}(x) \in [0, 1]$, której punkty charakterystyczne są określane za pomocą metody Changa [243]:

$$l_{hq} = \min_{s=1, 2, \dots, S} \{a_{hqs}\}, \quad (5.30)$$

$$m_{hq} = \left(\prod_{s=1}^S a_{hqs} \right)^{\frac{1}{S}}, \quad (5.31)$$

$$u_{hq} = \max_{s=1, 2, \dots, S} \{a_{hqs}\}. \quad (5.32)$$

Tabela 5.2. Oceny w podstawowej skali Saatey'ego

Wartość oceny	Ocena preferencji h względem q
9	h jest ekstremalnie preferowane względem q
7	h jest bardzo silnie preferowane względem q
5	h jest silnie preferowane względem q
3	h jest słabo preferowane względem q
1	h jest równoważne z q
8, 6, 4, 2	Wartości pośrednie pomiędzy powyższymi

Wielkości zdefiniowane we wzorach (5.30) – (5.32) można ustalić także dla dowolnego α -przekroju liczby rozmytej:

$$l_{hq}(\alpha) = l_{hq} + (m_{hq} - l_{hq}) \cdot \alpha, \quad (5.33)$$

$$u_{hq}(\alpha) = u_{hq} - (u_{hq} - m_{hq}) \cdot \alpha. \quad (5.34)$$

Na podstawie zbioru porównań parami zdefiniowanego w (5.29) i utworzonego z ocen dokonanych przez każdego z $s \in S$ ekspertów jest możliwe utworzenie macierzy $[a_{hqs}]$ z ostrymi wartościami elementów. Porównania parami kryteriów h i q wydane przez decydentów z użyciem dziewięciostopniowej skali Saaty'ego znajdują się ponad główną przekątną każdej z $s \in S$ macierzy, a poniżej głównej przekątnej – odwrotności ich ocen. Główna przekątna macierzy $[a_{hqs}]$ składa się z elementów równych jeden.

Następnie należy obliczyć średnią arytmetyczną i odchylenie standardowe ocen dokonanych przez ekspertów:

$$\bar{a}_{hq} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S a_{hqs}, \quad \forall h, q: h = 1, 2, \dots, b-1 \wedge q = 2, 3, \dots, b \wedge h > q, \quad (5.35)$$

$$\sigma_{hq} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{s=1}^S (a_{hqs} - \bar{a}_{hq})^2}{S-1}}}{c_4}, \quad \forall h, q: h = 1, 2, \dots, b-1 \wedge q = 2, 3, \dots, b \wedge h > q, \quad (5.36)$$

gdzie: c_4 jest współczynnikiem przyjmowanym z tablic statystycznych i wykorzystywanym do obliczania estymatora nieobciążonego odchylenia standardowego [244].

W przeciwieństwie do zbiorów rozmytych typu 1-go, granice α -przekroju zbiorów rozmytych typu 2 nie są punktami, lecz przedziałami o długości:

$$d_{hq}(\alpha) = \sigma_{hq} \cdot (1 - \alpha). \quad (5.37)$$

Przedział $d_{hq}(\alpha)$ można podzielić na dwa podprzedziały: wewnętrzny o długości $d_{hq}^I(\alpha)$ i zewnętrzny o długości $d_{hq}^E(\alpha)$, a ich długości będą określone następująco:

$$d_{hq}^I(\alpha) = d_{hq}(\alpha) \cdot c_4, \quad \forall h, q: h = 1, 2, \dots, b-1 \wedge q = 2, 3, \dots, b \wedge h > q, \quad (5.38)$$

$$\begin{aligned} d_{hq}^E(\alpha) &= d_{hq}(\alpha) - d_{hq}^I(\alpha), \\ \forall h, q: h &= 1, 2, \dots, b-1 \wedge q = 2, 3, \dots, b \wedge h > q. \end{aligned} \quad (5.39)$$

Sposób agregacji ocen grupy decydentów za pomocą liczby rozmytej typu 2 jest zilustrowany na rysunku 5.6.

Podobnie jak w podejściu Mikhailova [233], funkcja przynależności dekomponowana jest za pomocą α -przekrojów i przyjmuje się, że ostre oceny preferencji decydentów znajdują się w granicach określonych przez te α -przekroje:

$$l_{hq}(\alpha) \stackrel{\sim}{\leq} \frac{a_h}{a_q} \stackrel{\sim}{\leq} u_{hq}(\alpha), \quad (5.40)$$

$$\forall \alpha \in [0,1], \quad \forall h, q : h=1,2,\dots,b-1 \wedge q=2,3,\dots,b \wedge h > q$$

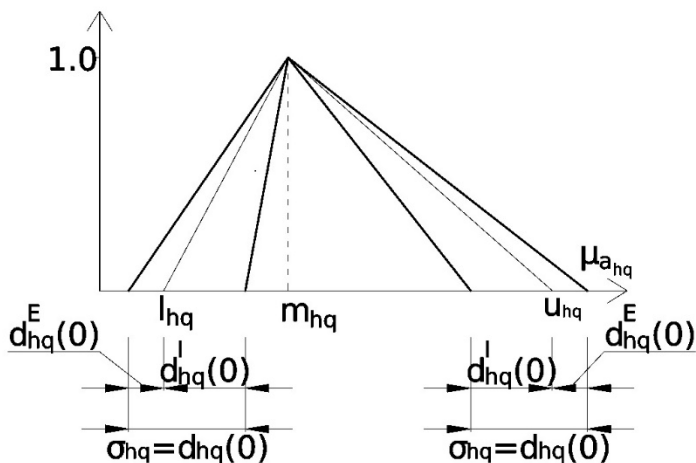
gdzie symbol „ $\stackrel{\sim}{\leq}$ ” oznacza „rozmyte mniejsze równe od zera”. Zależność (5.38) można przedstawić w następującej formie:

$$\begin{aligned} a_h - a_q u_{hq}(\alpha) &\stackrel{\sim}{\leq} 0, \\ -a_h + a_q l_{hq}(\alpha) &\stackrel{\sim}{\leq} 0. \end{aligned} \quad (5.41)$$

Powyższy zbiór $2d$ nierówności może być zapisany w notacji macierzowej:

$$[B][a] \leq 0, \quad (5.42)$$

gdzie: $[B] \in \mathfrak{R}^{m \times n}$.



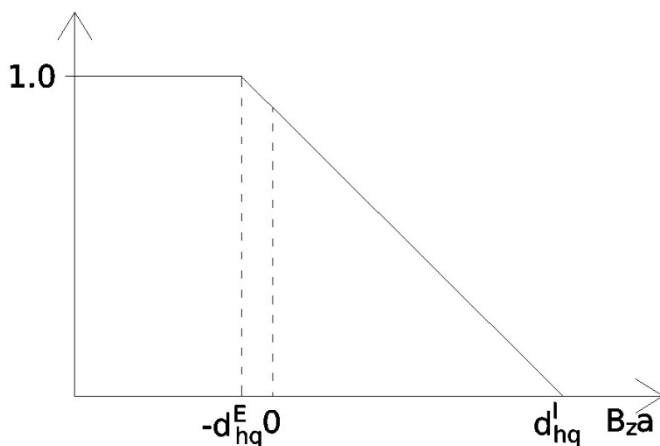
Rysunek 5.6. Zobrazowanie sposobu agregacji ocen decydentów do zbioru typu 2

Korzystając z przekształceń Zimmermanna [245], funkcję przynależności rozmytej relacji „mniejsze równe od zera” dla wiersza z można zapisać:

$$\mu_z(B_z a) = \begin{cases} 1, & B_z a \leq -d_z^E, \\ 1 - \frac{B_z a + d_z^E}{d_z}, & -d_z^E < B_z a \leq d_z^I, \\ 0, & B_z a > d_z^I, \end{cases} \quad (5.43)$$

gdzie: $z = 1, 2, \dots, 2d$ i zgodnie z równaniem (5.43) każda para porównań ocen decydujących jest związana z dwoma rozmytymi ograniczeniami. Kształt tej funkcji przynależności został zobrazowany na rysunku 5.7 i przedstawia spełnienie satysfakcji decydujących. Wartość funkcji przynależności:

- jest równa 0 jeśli ograniczenie $B_z a \lesseqgtr 0$ jest silnie przekroczone i ($B_z a > d_z^I$),
- przyjmuje wartości z zakresu (0,1), jeśli $-d_z^E < B_z a \leq d_z^I$,
- jest równe 1 jeśli ograniczenie $B_z a \lesseqgtr 0$ jest w pełni spełnione i ($B_z a \leq -d_z^E$).



Rysunek 5.7. Funkcja przynależności rozmytej relacji „mniejsze równe od zera” w opisywanej metodzie

Poprzez zastosowanie transformacji Zimmermanna [245] w przedziale $(-d_z^E, d_z^I]$, zagadnienie zostało sformułowane jako rozmyty problem programowania liniowego z maksymalizacją satysfakcji całej grupy decydujących, oznaczonej symbolem A , dla każdego α -poziomu:

$$\begin{aligned}
& \max A \\
& d_z A + B_z a \leq d_z', \\
& \sum_{h=1}^d a_h = 1, \\
& a_h > 0, \\
& h = 1, 2, \dots, b, \\
& z = 1, 2, \dots, 2d.
\end{aligned} \tag{5.44}$$

Optymalna wartość parametru A^* określa stopień zgodności ocen. Gdy parametr A^* jest większy od jedynki, oceny są w pełni zgodne, zaś gdy jest mniejszy od zera, oznacza całkowitą niezgodność ocen.

Zadanie programowania liniowego – opisanie wzorem (5.44) – jest rozwiązywane dla wszystkich wybranych α -przekrojów. Ostatnim krokiem obliczeniowym jest ważenie otrzymanych wartości zgodnie ze wzorem:

$$a_h = \frac{\sum \alpha \cdot a_h^*(\alpha)}{\sum \alpha}. \tag{5.45}$$

Konsekwencją zastosowania wzoru (5.45) (podobnie jak w [233]) jest uwzględnienie w większym stopniu wartości uzyskanych dla wyższych α -przekrojów.

Powyższą metodę ustalania wag kryteriów oceny harmonogramów budowlanych można zapisać w postaci kolejnych kroków algorytmu:

Krok 1. Porównanie parami kryteriów z użyciem dziewięciostopniowej skali Saaty'ego przez każdego z $s \in S$ ekspertów i utworzenie macierzy $[a_{hqs}]$.

Krok 2. Sprawdzenie zgodności macierzy porównań parami $[a_{hqs}]$. W celu sprawdzenia zgodności macierzy $s \in S$ należy obliczyć zmodyfikowaną miarę zgodności CR (ang. *Consistency Ratio*) w następujący sposób [246]:

1. Zsumować wszystkie kolumny q macierzy $[a_{hqs}]$ za pomocą wzoru:

$$a_q = \sum_{h=1}^n a_{hqs}, \quad \forall q = 1, 2, \dots, b, \forall s \in S. \tag{5.46}$$

2. Zbudować znormalizowane macierze F_{hqs} używając wzoru:

$$F_{hqs} = \frac{a_{hqs}}{a_{qs}}, \quad \forall h, q = 1, 2, \dots, b, \forall s \in S. \tag{5.47}$$

3. Dla każdego wiersza h macierzy F_{hqs} należy obliczyć średnią ważoną:

$$G_{hs} = \frac{\sum_{q=1}^b F_{hqs}}{b}, \quad \forall h=1,2,\dots,b, \forall s \in S. \quad (5.48)$$

4. Kolejnym krokiem obliczeniowym jest wyznaczenie wartości własnej macierzy $[a_{hqs}]$:

$$\lambda_{\max,s} = \frac{F_{hs}^T a_{hqs}}{b \cdot G_{hs}}. \quad (5.49)$$

5. Obliczyć zmodyfikowaną miarę zgodności CR_s :

$$CR_s = \frac{\lambda_{\max,s} - b}{RI(b-1)}, \quad (5.50)$$

gdzie RI (ang. *Random Index*) jest współczynnikiem zależnym od wielkości macierzy $[a_{hqs}]$, a jego wartość jest podawana między innymi w [246].

6. Wnioskowanie o zgodności macierzy. Przyjmuje się, że jeśli $CR_s \leq 0,1$ to macierz jest zgodna i można przejść do kroku 3 procedury obliczeniowej. Jeśli powyższy warunek nie jest spełniony i którakolwiek z macierzy porównań parami eksperta $s \in S$ nie jest zgodna, musi on dokonać powtórnych porównań parami.

Krok 3. Agregacja ocen decydentów poprzez utworzenie zbioru rozmytego typu

2. W tym celu należy obliczyć parametry: m_{hq} , σ_{hq} , $l_{hq}(\alpha)$, $u_{hq}(\alpha)$, $d_{hq}(\alpha)$, $d_{hq}^l(\alpha)$ zgodnie ze wzorami (5.31), (5.33) – (5.34), (5.36) – (5.38). Dla $\alpha=0$ obliczenia nie muszą być przeprowadzane, ponieważ zgodnie ze wzorem (5.45) ich waga wynosi 0. Poziomy α -odcięcie wykonuje się na przykład w interwale co 0,2, ponieważ jest to najbardziej popularny sposób dekompozycji liczb rozmytych, który zapewniła dobrą równowagę pomiędzy dokładnością obliczeń a czasem trwania obliczeń.

Krok 4. Rozwiązanie problemów programowania liniowego dla każdego z α -przekrojów. Dla każdego zadania opisanego wzorem (5.44) konieczne jest sprawdzenie, czy parametr spójności A^* mieści się w założonych granicach. Jeśli na pewnym poziomie α , A^* jest mniejszy od 0, rozwiązanie to powinno być wykluczone z dalszych obliczeń. Może to mieć miejsce w przypadku, gdy długość

przedziału niepewności d_{hq} na pewnym poziomie α (zblizonym do 1) jest niewielka. W takich przypadkach należy zignorować wyniki na tym poziomie.

Krok 5. Obliczenie ostatecznych wag kryteriów oceny harmonogramów budowlanych za pomocą równania (5.45). W rozważanym przypadku $a_1 = w_1$, $a_2 = w_2$ i $a_3 = w_3$.

W przypadku chęci użycia wyżej opisanego podejścia do wyznaczenia wag kryteriów oceny harmonogramu należy wprowadzić porównania parami kryteriów oceny harmonogramu wykonane przez każdego z decydentów do pliku „Input” na końcu sekcji PSO, poprzedzając je słowem kluczowym #AHP. Oceny porównań parami kryteriów należy wpisywać po trzy wiersze z trzema wartościami w każdym dla każdego z ekspertów. Liczba decydentów zostanie ustalona przez program poprzez liczbę wpisów. Liczebność grupy ekspertów oceniających istotność wymagań stawianych przed harmonogramami budowlanymi w opracowanym systemie jest nieograniczona. Przykład zapisu opinii ekspertów w pliku „Input” przedstawiono poniżej:

#AHP

```
1 1 0.333333333
1 1 0.333333333
3 3 1
```

```
1 0.333333333 1
3 1 3
1 0.333333333 1
```

```
1 0.333333333 0.2
3 1 0.333333333
5 3 1
```

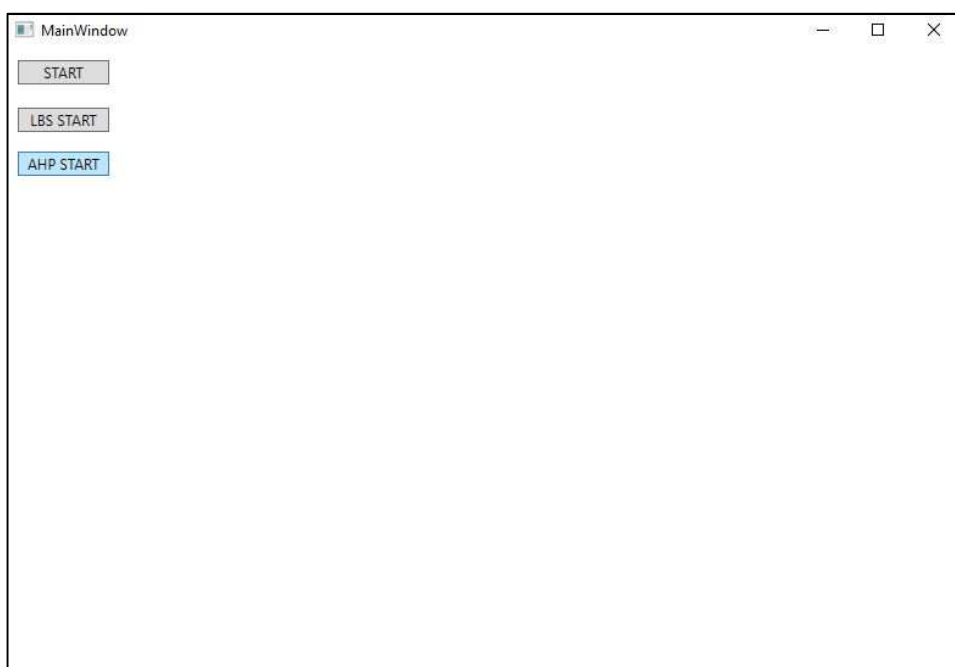
```
1 0.2 1
5 1 5
1 0.2 1
```

Następnie w oknie dialogowym programu należy wybrać przycisk AHP START i zostanie uruchomiony w programie tryb ustalania wag kryteriów oceny harmonogramu za pomocą opisaną grupową metodę wspomaganą podejmowania decyzji (rysunek 5.8.). Program wczyta oceny porównań parami istotności kryteriów wprowadzone po słowie kluczowym #AHP i – wykorzystując wyżej opisaną procedurę – znajdzie rozwiązanie problemu. Wszystkie opisane w rozdziale 5.3.4.2. kroki obliczeniowe procedury zostaną wykonane przez program automatycznie, bez ingerencji użytkownika. Wyniki uzyskane tym sposobem będą zapisane w pliku tekstowym „Output”.

5.3.4.3. Ustalenie wag kryteriów oceny harmonogramu za pomocą interaktywnej metody wspomaganie decyzji

Proces wspomaganie podejmowania decyzji wymaga pozyskania informacji o preferencjach decydena. Można wyróżnić dwa podejścia do zdobywania danych w celu rozwiązania problemu decyzyjnego [247]:

- jednorazowe gromadzenie informacji, najczęściej na samym początku procedury,
- stopniowe gromadzenie informacji, w miarę postępu rozwiązywania problemu, które jest określane w literaturze jako podejście interaktywne lub dialogowe.



Rysunek 5.8. Okno dialogowe programu z zaznaczonym przyciskiem AHP START

W podejściu interaktywnym globalna funkcja preferencji decydena nigdy nie jest w dokładnie poznana – zakłada się, że jest on tylko w stanie dostarczyć informacje o charakterze lokalnym, np. potrafi ocenić pojedynczy wariant rozwiązania. Takie podejście może być stosowane i jest pożądane przez decydentów o wysokich kompetencjach, którzy nie chcą ujawniać swoich całościowych preferencji w obawie przed zbanalizowaniem ich kwalifikacji i doświadczenia. Z tego względu informacje o preferencjach decydena pozyskiwane są w sposób interaktywny – faza dialogu z decydem oraz faza

obliczeniowa powtarzane są wielokrotnie, aż do uzyskania rozwiązania, które zostanie uznane przez decydenta za satysfakcjonujące [247].

Jedną z bardziej popularnych interaktywnych metod wspomagania podejmowania decyzji jest metoda przeglądu wiązką światła (ang. *Light Beam Search*), która została zaproponowana przez Jaszkiewicza i Słowińskiego [236], [237]. Metoda ta, rozwijana w ramach tzw. europejskiej szkoły wspomagania podejmowania decyzji, wykorzystuje relację przewyższania \hat{S} . Relacja przewyższania \hat{S} definiowana jest następująco: wariant \hat{a} jest bardziej preferowany niż \hat{b} , jeżeli jest on lepszy lub co najmniej tak samo dobry jak wariant \hat{b} ($\hat{a}\hat{S}\hat{b}$).

Wykorzystując relację przewyższania \hat{S} można ustalić sprzężenia występujące pomiędzy parami porównywanych kryteriów, zgodne z aksjomatem ograniczonej porównywalności preferencji. Są to następujące relacje:

- obojętności (często określanej mianem nierozróżnialności) \hat{I} :

$$\hat{a}\hat{S}\hat{b} \wedge \hat{b}\hat{S}\hat{a} \Leftrightarrow \hat{a}\hat{I}\hat{b}, \quad (5.51)$$

- preferencji słabych \hat{Q} i silnych \hat{P} :

$$\hat{a}\hat{S}\hat{b} \wedge \neg\hat{b}\hat{S}\hat{a} \Leftrightarrow \hat{a}\hat{Q}\hat{b} \wedge \hat{a}\hat{P}\hat{b}, \quad (5.52)$$

- nieporównywalności \hat{R} :

$$\neg\hat{a}\hat{S}\hat{b} \wedge \neg\hat{b}\hat{S}\hat{a} \Leftrightarrow \hat{a}\hat{R}\hat{b}. \quad (5.53)$$

Metoda przeglądu wiązką światła charakteryzuje się następującymi cechami [248]:

- Eksplorowanie przestrzeni rozwiązań niezdominowanych jest dokonywane poprzez próbkowanie sąsiedztwa punktu centralnego, które może doprowadzić decydenta do zmiany preferencji, co jest wyrażone poprzez zmianę punktu referencyjnego lub przesunięcie punktu centralnego w ramach wyznaczonego sąsiedztwa.
- Lokalne sąsiedztwo punktu centralnego jest wyznaczone z wykorzystaniem relacji przewyższania \hat{S} i jest oparte na relatywnie słabej preferencji decydenta.
- Sąsiedztwo aktualnego punktu centralnego tworzą rozwiązania niezdominowane, które są porównywalne lub przewyższają aktualny punkt centralny, w przeciwieństwie do rozwiązań spoza sąsiedztwa, które są nieporównywalne lub gorsze niż bieżący punkt centralny.

Algorytm metody wzorowanego na metodzie przeglądu wiązką światła, który został zaimplementowany w opracowanym systemie, jest następujący:

Krok 1. Wyznacz początkowe preferencje decydenta i punkt referencyjny. Koncepcja punktu referencyjnego polega na zastosowaniu pewnego punktu w przestrzeni rozwiązań, reprezentującego najwyższy poziom aspiracji lub satysfakcji decydenta, jako punktu odniesienia w procedurze porządkowania jego preferencji względem rozważanego zbioru wariantów decyzyjnych [228]. W celu wyznaczenia wstępnego punktu referencyjnego należy odnaleźć punkt idealny, któremu odpowiadają minimalne wartości poszczególnych kryteriów. Należy zatem rozwiązać analizowany problem harmonizacji trzykrotnie, za każdym razem traktując go jako problem jednokryterialny, przyjmując jako funkcje celu kolejno kryteria dane wzorami (5.13) – (5.15) i wyznaczając optymalne wartości zadań optymalizacji jednokryterialnej C_1^o, C_2^o, C_3^o . W ten sposób otrzymuje się trzy składowe wektora idealnego. Punkt idealny staje się pierwszym punktem referencyjnym $\hat{z}^o = [C_1^o, C_2^o, C_3^o]$.

Krok 2. Poproś decydenta o sprecyzowanie lokalnych preferencji, bazując na metodyce relacji przewyższania. Decydent powinien zdefiniować progi nierozróżnialności \hat{q} oraz preferencji \hat{p} (i opcjonalnie weta \hat{v}) dla wszystkich trzech kryteriów oceny harmonogramów budowlanych.

Krok 3. Oblicz początkowy punkt centralny na zbiorze rozwiązań niezdominowanych. Należy uruchomić algorytm rozwiązujący rozważany problem i obliczyć przykład dla funkcji celu (5.27) i przy założeniu, że w pierwszej iteracji $w_1 = w_2 = w_3$. Rozwiązanie zadania będzie pierwszym punktem centralnym $\hat{z}^c = [\hat{z}_1^c, \hat{z}_2^c, \hat{z}_3^c]$.

Krok 4. Oblicz punkty charakterystyczne sąsiedztwa punktu centralnego. W każdej iteracji będą obliczane trzy punkty sąsiedztwa – $\hat{z}_1, \hat{z}_2, \hat{z}_3$. W celu obliczenia tych punktów, należy rozwiązać zdefiniowany problem z funkcją celu opisaną w równaniu (5.27) i wagami równymi:

$$\begin{aligned}\hat{z}_1 &= [w_1 + \frac{\hat{\rho}_1}{\hat{e}}, w_2 - \frac{\hat{\rho}_1}{2\hat{e}}, w_3 - \frac{\hat{\rho}_1}{2\hat{e}}], \\ \hat{z}_2 &= [w_1 - \frac{\hat{\rho}_2}{2\hat{e}}, w_2 + \frac{\hat{\rho}_2}{\hat{e}}, w_3 - \frac{\hat{\rho}_2}{2\hat{e}}], \\ \hat{z}_3 &= [w_1 - \frac{\hat{\rho}_3}{2\hat{e}}, w_2 - \frac{\hat{\rho}_3}{2\hat{e}}, w_3 + \frac{\hat{\rho}_3}{\hat{e}}].\end{aligned}\tag{5.54}$$

gdzie:

\hat{e} – numer iteracji (zaczyna się od $\hat{e}=1$),

$\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2, \hat{\rho}_3$ – współczynniki szybkości przeszukiwania sąsiedztwa punktu centralnego, równe np. $\hat{\rho}_1 = \hat{\rho}_2 = \hat{\rho}_3 = 0,2$).

Należy uruchomić algorytm PSO i obliczyć pierwszy punkt sąsiedztwa \hat{z}_1 w iteracji $\hat{e}=1$. Następnie należy sprawdzić czy punkt charakterystyczny sąsiedztwa \hat{z}_1 jest lepszy od punktu centralnego. Aby tego dokonać należy uprzednio obliczyć następujące parametry:

- $\hat{m}_s(\hat{z}_1, \hat{z}^c)$ – liczba kryteriów dla których punkt \hat{z}_1 jest nierozróżnialny, słabo lub silnie preferowany względem \hat{z}^c ($-\hat{q} < \hat{z}_1 - \hat{z}^c$),
- $\hat{m}_q(\hat{z}^c, \hat{z}_1)$ – liczba kryteriów dla których punkt \hat{z}^c jest słabo preferowany względem \hat{z}^c ($\hat{q} < \hat{z}^c - \hat{z}_1 < \hat{p}$),
- $m_p(\hat{z}^c, \hat{z}_1)$ – liczba kryteriów dla których punkt \hat{z}^c jest silnie preferowany względem \hat{z}_1 ($\hat{p} \leq \hat{z}^c - \hat{z}_1$),
- $\hat{m}_v(\hat{z}^c, \hat{z}_1)$ – liczba kryteriów będących w silnej opozycji do twierdzenia $\hat{z}_1 \hat{S} \hat{z}^c$ ($\hat{z}^c - \hat{v} \geq \hat{z}_1$).

W zależności od tego jakie rodzaje progów zostały zdefiniowane przez decydenta, różnie należy definiować relację przewyższania. Jeżeli decydent wskazał wszystkie możliwe progi (\hat{q} , \hat{p} , \hat{v}), relacja przewyższania zachodzi w następującym przypadku:

$$\hat{z}_1 \hat{S}^a \hat{z}^c \Leftrightarrow \begin{cases} \hat{m}_v(\hat{z}^c, \hat{z}_1) = 0 \wedge \\ \hat{m}_p(\hat{z}^c, \hat{z}_1) \leq 1 \wedge \\ \hat{m}_q(\hat{z}^c, \hat{z}_1) + \hat{m}_p(\hat{z}^c, \hat{z}_1) \leq \hat{m}_s(\hat{z}_1, \hat{z}^c) \end{cases} \quad (5.55)$$

Jeżeli decydent zdefiniował wszystkie możliwe progi preferencji oprócz progów weta (\hat{q} , \hat{p}), relacja przewyższania zachodzi w następującym przypadku:

$$\hat{z}_1 \hat{S}^b \hat{z}^c \Leftrightarrow \begin{cases} \hat{m}_p(\hat{z}^c, \hat{z}_1) = 0 \wedge \\ \hat{m}_q(\hat{z}^c, \hat{z}_1) \leq \hat{m}_s(\hat{z}_1, \hat{z}^c) \end{cases} \quad (5.56)$$

Jeżeli rozwiązanie \hat{z}_1 przewyższa \hat{z}^c , to został uzyskany punkt sąsiedztwa. Jeżeli punkt sąsiedztwa nie został odnaleziony, to należy podwoić współczynnik \hat{p} (np. $\hat{p}=0,4$ i powtórzyć procedurę od kroku 4 (numer iteracji \hat{e} się nie zmienia – poprzez iterację rozumie się zrealizowanie kroków 3–6 algorytmu). Procedurę powtarza się do momentu znalezienia punktu, dla którego zachodzi relacja przewyższania lub któremu odpowiada waga $w_1=1$ (w tym przypadku punktem sąsiedztwa jest punkt o wagach $w_1=1$, $w_2=0$, $w_3=0$). Następnie procedura jest wykonywana dla punktów sąsiedztwa \hat{z}_2 i \hat{z}_3 .

Krok 5. Zaprezentuj punkt centralny i punkty sąsiedztwa decydentowi. Jeżeli decydent jest usatysfakcjonowany którymś z rozwiązań, zakończ procedurę. W innym przypadku należy poprosić decydenta aby:

- wyznaczył jako nowy punkt centralny jeden z punktów z sąsiedztwa aktualnego punktu centralnego,
- zmienił preferencje – decydent powinien na nowo zdefiniować progi nierozróżnialności \hat{q} (i opcjonalnie preferencji \hat{p} i weta \hat{v}) dla jednego, dwóch, bądź trzech kryteriów,
- na nowo zdefiniował punkt referencyjny (za pierwszym razem punkt referencyjny był obliczany, natomiast w następnych etapach procedury może być wskazany przez decydenta).

Krok 6. Procedurę należy powtarzać od kroku drugiego (w przypadku zmiany preferencji) lub kroku trzeciego (w przypadku ponownego zdefiniowania punktu referencyjnego), lub od kroku czwartego (w przypadku wskazania jednego z charakterystycznych punktów sąsiedztwa jako nowego punktu centralnego), aż do momentu, w którym znaleziony punkt centralny $\hat{z}^c = [\hat{z}_1^c, \hat{z}_2^c, \hat{z}_3^c]$ będzie satysfakcjonował decydenta.

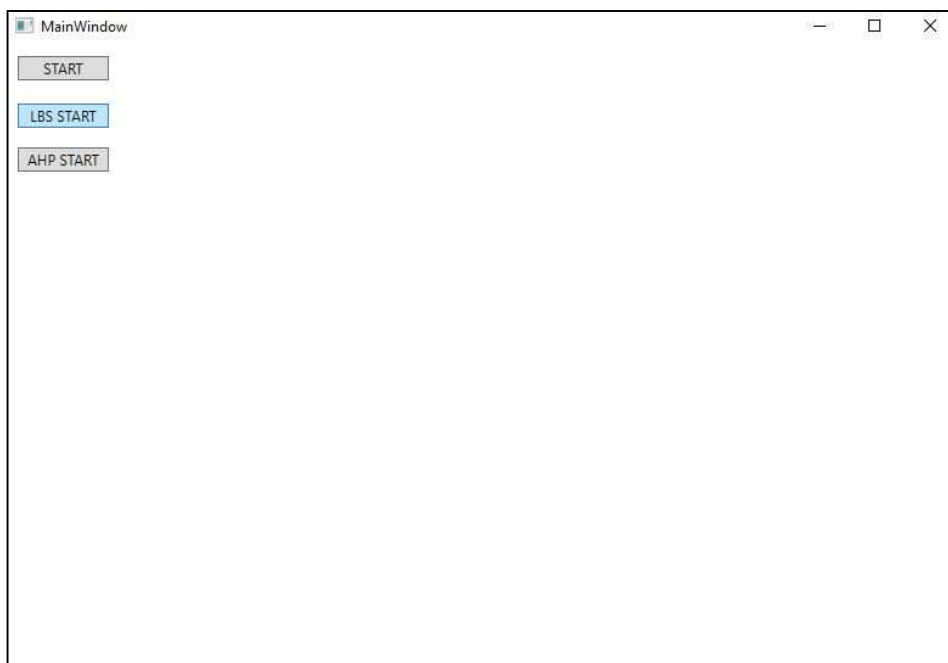
W przypadku zamiaru wykorzystania opisywanego powyżej metody ustalania wag kryteriów oceny harmonogramów budowlanych, w pliku „Input” w sekcji PSO należy wprowadzić początkowe progi preferencji decydenta poprzedzone słowami kluczowymi: #LBS_Q, #LBS_P, #LBS#_V. Poniżej zamieszczono przykład wprowadzenia progów preferencji decydenta do systemu w pliku Input:

```
#LBS_Q 3 5 1  
#LBS_P 5 10 1  
#LBS_V 50 30 30
```

Po wprowadzeniu wyżej wymienionych danych w oknie dialogowym programu należy wybrać przycisk LBS START i zostanie uruchomiony tryb ustalania wag kryteriów oceny harmonogramu w sposób interaktywny (rysunek 5.9.). Program wczyta progi preferencji decydenta wprowadzone po słowach kluczowych #LBS i otworzy się okno dialogowe metody interaktywnej (rysunek 5.10.). Program samoistnie wykona kroki obliczeniowe 1–5 procedury i przedstawi punkt centralny oraz charakterystyczne punkty sąsiedztwa decydentowi, który następnie wybierze jedną z trzech możliwości:

- wyznaczy jako nowy punkt centralny jeden z punktów z sąsiedztwa aktualnego punktu centralnego poprzez kliknięcie przycisku *SELECT Z1*, *SELECT Z2* lub *SELECT Z3*,
- zmieni preferencje i na nowo zdefiniować progi nierozróżnialności \hat{q} (i opcjonalnie preferencji \hat{p} i weta \hat{v}) dla jednego, dwóch, bądź trzech kryteriów, poprzez wprowadzenie odpowiednich wartości w tabeli

- widocznej w oknie dialogowym (rysunek 5.10) i kliknięcie przycisku *Set new p, q, v*.
- ponownie zdefiniuje punkt referencyjny poprzez wprowadzenie odpowiednich wartości w okienkach *New reference C1*, *New reference C2*, *New reference C3* i kliknięcie przycisku *Set new reference*,
 - zakończy procedurę wyboru satysfakcjonującego go wariantu harmonogramu poprzez kliknięcie przycisku *END*.



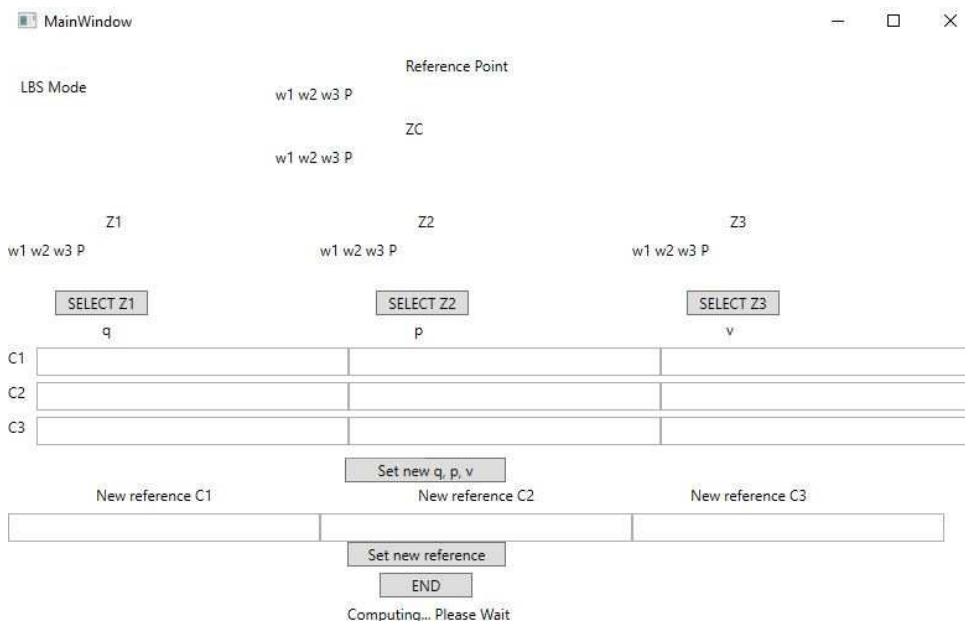
Rysunek 5.9. Okno dialogowe programu z zaznaczonym przyciskiem LBS START

W przypadku zakończenia procedury wyboru rozwiązania satysfakcjonującego wyniki zostaną zapisane w pliku tekstowym „Output”, a zapis dialogu decydenta z systemem ze wszystkich iteracji będzie się znajdował w pliku „OutputReference”.

5.3.4.4. Porównanie metod ustalania wag kryteriów oceny harmonogramów budowlanych

Wagi kryteriów w optymalizacji wielokryterialnej mają bardzo duży wpływ na końcowy rezultat wyboru harmonogramu kierowanego do realizacji harmonogramu budowlanego ze względu na postawione kryteria oceny. Stopień dopasowania końcowego wyniku do preferencji decydenta jest kluczowym

aspektem w odniesieniu do późniejszego zastosowania otrzymanego harmonogramu, a zatem będzie decydować o użyteczności opracowanej metody. Celem jak najlepszego modelowania preferencji decydenta umożliwiono zastosowanie trzech metod ustalania wag kryteriów oceny harmonogramu budowlanego. Schemat obejmujący wszystkie metody ustanawiania wag kryteriów została przedstawiona na rysunku 5.11. Proponowane podejścia ustalania wag kryteriów są dostosowane do zróżnicowanych warunków decyzyjnych, odmiennych poziomów doświadczenia decydentów, różnych oczekiwań i preferencji w procesie podejmowania decyzji.



Rysunek 5.10. Okno dialogowe metody interaktywnej

5.3.5. Alokacja brygad i określenie czasów wykonania procesów

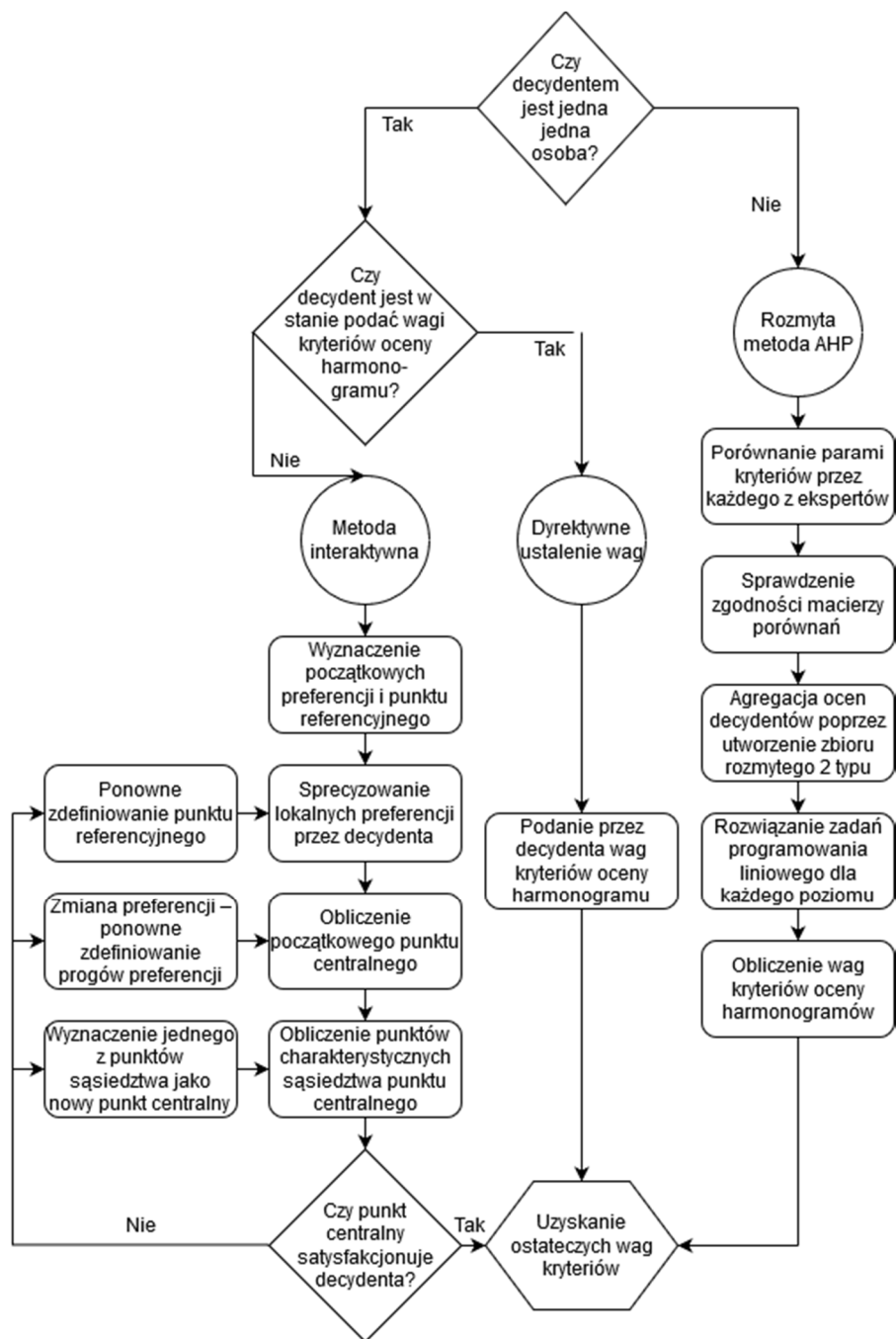
Problem przydziału posiadanych zasobów do wykonania procesów przedsięwzięcia budowlanego jest jednym z trzech głównych zagadnień podejmowanych podczas rozwiązywania zagadnienia harmonizacji robót budowlanych. Pierwszym krokiem do znalezienia rozwiązania tego zagadnienia jest ustalenie potencjalnych wykonawców poszczególnych procesów roboczych. W zależności od systemu wykonawczego stosowanego przez generalnego wykonawcę przedsięwzięcia budowlanego może on korzystać z brygad własnych i/lub podwykonawców. Jeśli generalny wykonawca posiada własne zasoby odnawialne, to zazwyczaj od nich zaczyna przegląd możliwości realizacji

poszczególnych procesów budowlanych. Generalny wykonawca wskazuje więc, które procesy mogą być wykonywane przez konkretne brygady własne. Następnie dokonuje przeglądu procesów budowlanych w aspekcie liczby przypisanych do nich brygad. Jeśli do danego procesu nie jest przypisana żadna brygada (z reguły dotyczy to procesów specjalistycznych) lub ich liczba jest niewystarczająca do opracowania harmonogramu z czasem realizacji krótszym od dyrektywnego (lub pożądanego), należy rozszerzyć zbiór potencjalnych wykonawców danych procesów o brygady podwykonawców. Przy wyborze podwykonawców generalni wykonawcy stosują w praktyce różne procedury. Najpopularniejszymi trybami wyboru podwykonawców w sektorze prywatnym jest procedura przetargowa ograniczona do oferentów zaproszonych do udziału w postępowaniu, tryb prekwalfikacji oferentów w postaci aktualizowanej na bieżąco listy potencjalnych wykonawców danego typu robót lub procedura prekwalfikacyjna przeprowadzona specjalnie dla konkretnego przedsięwzięcia lub poszczególnych pakietów robót. Po zastosowaniu odpowiedniego trybu wyboru podwykonawców należy ostatecznie ustalić zbiory R_j , które zawierają brygady mogące wykonywać procesy $j \in V$. Ze względu na szeroką edukację zawodową pracowników budowlanych w Polsce i uzyskiwanie przez nich w procesie kształcenia kilku kwalifikacji zawodowych, dopuszczono w opracowywanym podejściu wielozadaniowość brygad, czyli brygada r może należeć do wielu zbiorów R_j .

W programie wymagane jest wprowadzenie łącznej liczby brygad, które mogą być alokowane do realizacji procesów przedsięwzięcia. Liczbę tę zapisuje się w pliku „Input” przed sekcją #OBJECTTYPE. Liczbę brygad należy wprowadzić po słowie kluczowym #CREWS. Przykład tego zapisu zamieszczono poniżej:

```
#CREWS 3
```

W praktyce budowlanej często zdarza się sytuacja, w której kierownictwo budowy nie widzi potrzeby minimalizacji przerw w pracy wszystkich brygad, na przykład brygad podwykonawców czy grup robotników niewykwalifikowanych, którym w przypadku wystąpienia przestojów można powierzyć do wykonania czynności porządkowe na placu budowy lub skierować do wspomaganie pracy brygad branżowych. Taka sytuacja występuje również w przypadku przerw technologicznych, do wykonania których w programie przewidziano zatrudnianie fikcyjnych brygad. W przypadku, gdy decydent nie chce uwzględniać przerw w pracy części brygad w kryterium drugim należy w pliku „Input” po zdefiniowaniu liczby brygad wprowadzić słowo kluczowe #CREWS_NOT_CALCULATE wraz numerami brygad należących do zbioru R^s , a więc nieuwzględnianych przy obliczaniu łącznego czasu przestoju w pracy brygad. Przykład zapisu tych danych w pliku „Input” zamieszczono poniżej:



Rysunek 5.11. Schemat wyboru procedur ustalania wag kryteriów oceny harmonogramu budowlanego

```
#CREWS 3
#CREWS_NOT_CALCULATE 0
```

Następnie w sekcji #OBJECTTYPE należy przyporządkować brygady do procesów, które mogą one realizować. Dokonuje się tego poprzez wypisanie elementów zbiorów R_j po słowie CREW, które następuje po słowie ACTIVITY podanym wraz z numerem procesu. W przypadku trzech brygad, będących w dyspozycji, ponumerowanych kolejno poczynając od 0, przyporządkowanie zasobów może być dokonane i zapisane w następujący sposób:

```
#OBJECTTYPE
ACTIVITY 0
CREW 0
ACTIVITY 1
CREW 0 2
ACTIVITY 2
CREW 0 1 2
```

Specyficznym procesem, który wymaga szczególnego podejścia do jego modelowania, jest przerwa technologiczna związana np. z dojrzwaniem betonu. Jej nietypowość (w odniesieniu do innych procesów budowlanych) polega na możliwości jej trwania jednocześnie na kilku działkach roboczych (bez angażowania zasobów). Opracowany system posiada opcję dedykowaną takim nietypowym procesom zgrupowanym w zbiorze V^{tb} i umożliwiającą zamodelowanie braku wpływu realizacji procesu na jednej działce roboczej na przebieg procesu na innej działce. W celu zamodelowania tego typu procesów w programie, w pliku „Input” po zdefiniowaniu przyporządkowania brygad do procesu należy wprowadzić słowo kluczowe #NOT_USE_CREW_TIME. Przykład zapisu danych w pliku „Input”, w przypadku gdy proces o numerze 1 jest przerwą technologiczną, zamieszczono poniżej:

```
#OBJECTTYPE
ACTIVITY 0
CREW 1 2
ACTIVITY 1
CREW 0
NOT_USE_CREW_TIME
ACTIVITY 2
CREW 1 2
```

5.3.6. Ustalenie czasów i dopuszczalnych terminów realizacji procesów budowlanych

Ze względu na bardzo dużą liczbę czynników ryzyka wpływających na przebieg wykonania produkcji budowlanej, próba predykcji czasu realizacji procesów w przedsięwzięciach budowlanych jest jednym z najtrudniejszych zagadnień występujących w branży budowlanej. Literatura przedmiotu dostarcza wielu zaawansowanych narzędzi, umożliwiających bardziej dokładne oraz bardziej pewne prognozowanie czasów wykonywania procesów budowlanych w porównaniu do podejścia tradycyjnego, bazującego na stosowaniu norm pracochłonności gromadzonych w katalogach branżowych [249]–[251]. Wadami rozbudowanych i innowacyjnych podejść predykcji czasu realizacji procesów budowlanych jest trudność w ich praktycznym stosowaniu oraz często wymóg posiadania dużych baz danych historycznych. Z tego względu ciągle najpopularniejszymi metodami ustalania czasu realizacji procesów jest podejście tradycyjne wspomagane wiedzą i doświadczeniem menadżerów budowlanych.

Czasy realizacji procesów zleczanych podwykonawcom są ustalane w praktyce na podstawie ofert, wzajemnych uzgodnień lub ustaleń generalnego wykonawcy. Czasy realizacji procesów przez brygady własne generalnego wykonawcy są szacowane na podstawie liczebności zespołu roboczego oraz nakładów pracy przyjętych na podstawie Katalogów Nakładów Rzeczowych, przedmiaru robót oraz z doświadczenia menadżerów zdobytego przy realizacji poprzednich zleceń przedsiębiorstwa.

Ustalone jednym z wyżej wymienionych sposobów czasy t_{jlr} procesów budowlanych j na poszczególnych działkach roboczych l przez poszczególne brygady r należy wprowadzić do systemu komputerowego. W tym celu należy je wpisać po słowie ACTIVITY i numerze procesu oraz po słowie CREW i numerze brygady w sekcji OBJECT. Czasy wykonywania procesów przez kolejne brygady mogące je wykonywać wprowadza się w kolejnych wierszach. Najmniejszą możliwą jednostką czasu jaką można wprowadzić jest jeden dzień roboczy. Przykładowy zapis w pliku „Input” czasów t_{jlr} (dla jednego obiektu z trzema działkami roboczymi) jest następujący:

```
#OBJECT 0
GP 0.169
UNITCOUNT 3
ACTIVITY 0
CREW 0 0 0 0
ACTIVITY 1
CREW 0 1 1 1
CREW 2 2 3 1
ACTIVITY 2
CREW 0 4 2 3
```

CREW 1 4 2 3
CREW 2 3 2 3

Każdy wykonawca robót budowlanych ma narzucony termin wykonania całego przedsięwzięcia, wynikający z umowy zawartej z inwestorem. Przekroczenie tego terminu wiąże się z wieloma negatywnymi konsekwencjami, takimi jak naliczenie kar umownych czy obniżenie jego reputacji. Termin jest zapisywany w pliku Input opracowanego programu komputerowego – wprowadza się go po słowie #END w sekcji PSO. Na przykład termin dyrektywny realizacji przedsięwzięcia ustalony na 150 dzień po terminie jego rozpoczęcia będzie zapisany:

#END 150

W celu możliwości przeszukiwania przestrzeni rozwiązań algorytm musi mieć możliwość przesuwania terminów realizacji procesów w ramach zapasów czasu. Wielkość zapasu całkowitego czasu jest jednak zależna od kolejności realizacji obiektu w danej permutacji i alokacji brygad. Aby uniknąć konieczności obliczania zapasów czasu dla każdej permutacji obiektów i każdego dopuszczalnego sposobu przydziału brygad, w programie umożliwiono definiowanie dla każdego obiektu p maksymalnej wielkości przesunięcia w stosunku do terminu najwcześniejszego Y_p . Maksymalne wielkości przesunięć nie mogą być ani zbyt małe, ponieważ algorytm będzie miał zbyt zawężoną przestrzeń poszukiwań, ani zbyt duże, ponieważ w takim przypadku możliwe jest uzyskanie rozwiązania wykraczającego poza termin dyrektywny zakończenia przedsięwzięcia T . Domyślne wartości Y_p (w przypadku ich niedefiniowania) dla każdego z p obiektów są sobie równe, a ich suma wynosi T . Wartości domyślne ustawione w programie należy dostosować do rozpatrywanego przypadku. Nowe wartości Y_p należy wprowadzić używając słowa kluczowego TP w sekcji OBJECT w pliku „Input” po zdefiniowaniu istotności obiektu GP a przed podaniem liczby działek roboczych. Przykład zdefiniowania horyzontów czasowych przesunięć obiektów zamieszczono poniżej:

#OBJECT 1
GP 0.25
TP 200
UNITCOUNT 2

Na podobnej zasadzie jak wyżej należy zdefiniować dopuszczalne wielkości przesunięć dla procesów Z_j . Wielkości te należy odpowiednio dopasować do rozpatrywanego przypadku – nie mogą być ani zbyt duże, ani zbyt małe.

Domyślne wartości Z_j , które są wykorzystywane w przypadku ich niezdefiniowania, są równe dla wszystkich procesów j i ich suma jest równa T . Mimo wprowadzenia do programu domyślnych wartości horyzontów czasowych przesunięć procesów, nie są one zalecanymi wartościami do użycia. W celu zdefiniowania horyzontów czasowych przesunięć dla procesów, dostosowanych do rozpatrywanego przypadku, należy użyć słowa kluczowego TJ w pliku „Input” w sekcji OBJECTTYPE po numerze procesu, a przed zdefiniowaniem czasów realizacji procesów przez poszczególne brygady. Przykład wprowadzenia tego typu danych zamieszczono poniżej:

```
#OBJECTTYPE  
ACTIVITY 0  
TJ 80  
CREW 0
```

5.3.7. Tworzenie harmonogramu robót

Utworzenie harmonogramu robót dla danego przedsięwzięcia budowlanego jest najtrudniejszym w realizacji etapem opracowanej procedury. Niedogodność ta związana jest z bardzo dużym rozmiarem rozwiązywanego zadania oraz bardzo dużą liczbą narzuconych ograniczeń w przestrzeni rozwiązań. To z kolei pociąga za sobą konieczność wykorzystania zaawansowanych metod obliczeniowych. W opracowanym systemie, ze względu na bardzo dużą złożoność rozwiązywanego problemu, zdecydowano się na użycie algorytmu metaheurystycznego o stosunkowo małej liczbie parametrów – algorytmu optymalizacji rojem cząstek. Posłużono się takim kryterium wyboru w nadziei, że w łatwiej będzie ustalić wartości mniejszej liczby parametrów algorytmu do i tak bardzo złożonego problemu, niż miałyby to miejsce w przypadku algorytmu o większej liczbie parametrów wymagających ustalenia ich wartości.

Opis algorytmu metody optymalizacji rojem cząstek umieszczono w rozdziale 5.3.7.1., natomiast sposób obsługi programu w kontekście funkcjonowania algorytmu PSO znajduje się w rozdziale 5.3.7.2.

5.3.7.1. Algorytm metody optymalizacji rojem cząstek

Algorytmy rojowe opierają się na modelach naśladujących zachowania społeczne zwierząt żyjących w grupach. Algorytm optymalizacji rojem cząstek powstał w wyniku obserwacji stad ptaków poruszających się w celu zmiany miejsca pobytu, żerowiska czy ucieczki przed drapieżnikiem. W algorytmie tym pojedynczy ptak jest symulowany za pomocą cząstki, której odpowiada rozwiązanie problemu. Zdefiniowane cząstki poruszają się w wielowymiarowej przestrzeni rozwiązań na kierunkach wyznaczonych przez cząsteczki znajdujące się w ich sąsiedztwie, odpowiadające najlepszym rozwiązaniom znalezionym

w sąsiedztwie tych cząstek. W procesie optymalizacji pozycja $\tilde{x}_{\tilde{i}}$ cząstki \tilde{i} jest korygowana przez jej stochastyczną prędkość $\tilde{v}_{\tilde{i}}$, która zależy od jej najlepszego dotychczasowego położenia i najlepszego położenia jej sąsiadów [252]. To podejście może zostać wyrażone przez następujące zależności [253]:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{\tilde{i}}(\tilde{k}+1) &= \tilde{v}_{\tilde{i}}(\tilde{k}) + \tilde{\phi}_{1\tilde{j}}(\tilde{k})[\tilde{p}_{\tilde{i}\tilde{j}}(\tilde{k}) - \tilde{x}_{\tilde{i}}(\tilde{k})] + \tilde{\phi}_{2\tilde{j}}(\tilde{k})[\tilde{q}_{\tilde{i}\tilde{j}}(\tilde{k}) - \tilde{x}_{\tilde{i}}(\tilde{k})], \\ \forall \tilde{i} &= 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n}, \end{aligned} \quad (5.57)$$

$$\tilde{x}_{\tilde{i}}(\tilde{k}+1) = \tilde{x}_{\tilde{i}}(\tilde{k}) + \tilde{v}_{\tilde{i}}(\tilde{k}+1), \quad \forall \tilde{i} = 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n}, \quad (5.58)$$

gdzie:

$$\tilde{\phi}_{1\tilde{j}}(\tilde{k}) = \tilde{c}_1 \tilde{r}_{1\tilde{j}}(\tilde{k}), \quad \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n}, \quad (5.59)$$

$$\tilde{\phi}_{2\tilde{j}}(\tilde{k}) = \tilde{c}_2 \tilde{r}_{2\tilde{j}}(\tilde{k}), \quad \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n}, \quad (5.60)$$

\tilde{m} – liczba osobników roju,

\tilde{n} – liczba zmiennych (rozmiar problemu),

\tilde{k} – krok iteracji,

\tilde{c}_1, \tilde{c}_2 – współczynniki przyspieszenia (ang. *acceleration coefficients*),

$\tilde{r}_{1\tilde{j}}, \tilde{r}_{2\tilde{j}}$ – liczby losowe z przedziału $[0,1]$ dla kierunku (zmiennej) \tilde{j} ,

$\tilde{x}_{\tilde{i}}(\tilde{k})$ – położenie cząstki \tilde{i} na kierunku \tilde{j} w iteracji \tilde{k} ,

$\tilde{v}_{\tilde{i}}(\tilde{k})$ – prędkość cząstki \tilde{i} na kierunku \tilde{j} w iteracji \tilde{k} ,

$\tilde{\phi}_{1\tilde{j}}(\tilde{k})$ – składnik wzoru (5.54) reprezentujący odległość cząstki \tilde{i} od jej dotychczasowego najlepszego położenia,

$\tilde{\phi}_{2\tilde{j}}(\tilde{k})$ – składnik wzoru (5.54) reprezentujący odległość cząstki \tilde{i} od lidera roju,

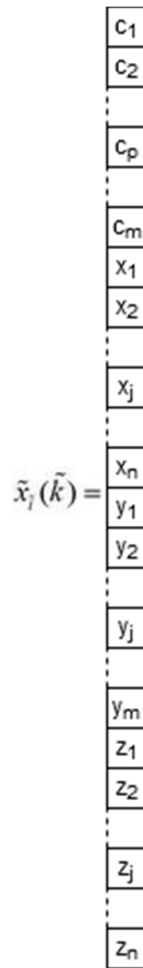
$\tilde{p}_{\tilde{i}\tilde{j}}(\tilde{k})$ – dotychczasowe najlepsze położenie cząstki \tilde{i} na kierunku \tilde{j} w iteracji \tilde{k} ,

$\tilde{q}_{\tilde{i}\tilde{j}}(\tilde{k})$ – najlepsze dotychczasowe położenie znalezione w sąsiedztwie cząstki \tilde{i} na kierunku \tilde{j} w iteracji \tilde{k} .

Warto zwrócić uwagę, że liczba kierunków hiperprzestrzeni poszukiwań jest równa liczbie niewiadomych. W opracowywanym systemie występują cztery poszukiwane rodzaje niewiadomych: x_j – modelująca decyzje o przydzieleniu brygady r do wykonania procesu j , z_j – określająca liczbę dni, o którą należy

opóźnić realizację procesu j na pierwszym realizowanym obiekcie w stosunku do terminu najwcześniejszego, c_p – oznaczająca kolejność wykonania obiektu budowlanego p w permutacji c , y_p – określająca liczbę dni, o którą należy opóźnić realizację pierwszego procesu obiektu p w stosunku do terminu najwcześniejszego, które w sumie tworzą wektor położenia cząstki \tilde{i} (rys. 5.12.). Z tego wynika, że liczba kierunków hiperprzestrzeni jest równa podwojonej sumie liczby brygad i obiektów:

$$\tilde{n} = 2 \cdot (m + n). \quad (5.61)$$



Rysunek 5.12. Sposób kodowania położenia cząstki \tilde{i}

Z przedstawionego systemu kodowania wynika również, że w zależności od kierunku poszukiwania \tilde{j} różne są zakresy zmienności elementów wektora $\tilde{x}_i(\tilde{k})$ – wahają się od 0 do $|P|$, od 0 do $|R_j|$, od 0 do $|Y_p|$ lub od 0 do $|Z_j|$.

Z zależności (5.57) wynika, że na prędkość cząstki mają wpływ trzy składniki [252]:

- $\tilde{v}_{\tilde{j}}(\tilde{k})$, który odpowiada za poruszanie się cząstki w dotychczasowym kierunku.
- $\tilde{\phi}_{1j}(\tilde{k})[\tilde{p}_{\tilde{j}}(\tilde{k}) - \tilde{x}_{\tilde{j}}(\tilde{k})]$, który odpowiada za aspekt poznawczy algorytmu (ang. *cognitive aspect*). Ten człon sumy odwzorowuje geometryczną odległość od najlepszego znalezionej w poprzednich iteracjach rozwiązania i dotyczy skłonności algorytmu do powracania cząstek do otoczenia, w którym miały najlepsze doświadczenia.
- $\tilde{\phi}_{2j}(\tilde{k})[\tilde{q}_{\tilde{j}}(\tilde{k}) - \tilde{x}_{\tilde{j}}(\tilde{k})]$, który jest związany z aspektem społecznym algorytmu (ang. *social aspect*). Ten człon sumy ilustruje geometryczną odległość od najlepszego znalezionej rozwiązania w sąsiedztwie cząstki i odpowiada za naturalną chęć algorytmu do podążania za osobnikami, które odniosły sukces.

W implementacji komputerowej algorytmów rojowych niezwykle istotne jest zapewnienie ich zbieżności i zapobieżenie możliwej „eksplozji” roju, czyli rozbiegnięciu się cząstek we wszystkich kierunkach w nieskończoność. Na zbieżność algorytmu wpływ mają następujące czynniki [252]:

- sposób komunikacji osobników roju,
- ograniczenie maksymalnej prędkości \tilde{V}_j^{\max} na kierunku \tilde{j} ,
- współczynnik bezwładności ruchu cząstki (ang. *inertia weight*) $\tilde{\omega}(\tilde{k})$.

W algorytmie optymalizacji rojowej cząsteczka komunikuje się z osobnikami pozostającymi w jej sąsiedztwie. Można wyróżnić różne podejścia związane z komunikacją osobników [252], [254]:

- globalne, w którym sąsiedztwem danej cząstki są wszystkie pozostałe osobniki,
- lokalne, które bazują na pobieraniu informacji od najbliższych cząstek w sąsiedztwie, którego typy są wyróżnione ze względu na rodzaj połączeń, takie jak: koło, piramida czy połączenie von Neumanna.

W opracowanym algorytmie przyjęto strukturę sąsiedztwa typu koło, a więc każda cząstka posiada sąsiedztwo niejako z dwóch stron: sąsiedztwo przed i za cząstką. Wprowadzono parametr wielkości sąsiedztwa \tilde{s} , który odwzorowuje liczbę osobników sąsiadujących z każdą cząstką z dwóch stron. Przykładowo, jeśli $\tilde{s} = 2$, to każda cząstka w algorytmie ma czterech sąsiadów (po dwóch z każdej strony). Takie rozwiązanie niezwykle elastycznie może dopasowywać się do różnorodnych struktur rozwiązywanych problemów. Decydent może

zamodelować dowolny rodzaj sąsiedztwa: w przypadku, gdy $\tilde{s}=1$ występuje typowe sąsiedztwo lokalne typu koło, natomiast w przypadku gdy \tilde{s} jest równe połowie liczebności roju ($\tilde{s} = 0,5\tilde{m}$) występuje klasyczne sąsiedztwo globalne. Należy jednak pamiętać, że zgodnie z badaniami Kennedy'ego (1999) im większe sąsiedztwo, tym algorytm szybciej się zbiega i zmniejsza się nakład obliczeń, lecz zwiększa się prawdopodobieństwo znalezienia optimum lokalnego a nie globalnego. Przy mniejszym sąsiedztwie wzrastają szanse na znalezienie globalnego optimum, lecz zwiększa się nakład obliczeń oraz wzrastają szanse na ucieczkę cząstek w nieskończoność.

W trakcie poszukiwań suboptymalnych rozwiązań cząstki przemieszczają się po przestrzeni ze zmieniającą się losowo prędkością. W trakcie tych poszukiwań cząstki tworzą niekontrolowane, losowe, często wybiegające poza ograniczenia przestrzeni poszukiwań trajektorie ruchu. Celem wytłumienia oscylacji, wyhamowania cząstek wprowadza się dolne i górne ograniczenia prędkości:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{ij}(\tilde{k}) > \tilde{V}_j^{\max} &\Rightarrow \tilde{v}_{ij}(\tilde{k}) = \tilde{V}_j^{\max}, \\ \tilde{v}_{ij}(\tilde{k}) < -\tilde{V}_j^{\max} &\Rightarrow \tilde{v}_{ij}(\tilde{k}) = -\tilde{V}_j^{\max}, \end{aligned} \quad \forall \tilde{i} = 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n}. \quad (5.62)$$

Niezwykle istotnym jest, aby ograniczenia prędkości zostały odpowiednio dobrane do problemu: jeśli ograniczenia będą zbyt swobodne, cząstki mogą poruszać się poza obszarem występowania optimum; natomiast jeśli ograniczenia prędkości będą zbyt rygorystyczne – ruch cząstek będzie zbyt ograniczony, aby to optimum znaleźć.

W opracowanym systemie ograniczenie prędkości \tilde{V}_j^{\max} zdefiniowano jako wielokrotność miary problemu rozumianej jako zakres zmienności zmiennej. Przykładowo, jeśli przedsięwzięcie składa się z pięciu obiektów i $\tilde{V}_j^{\max} = 1$ to maksymalna zmiana położenia w jednej iteracji w każdym kierunku p wynosi 5. Taki sposób zamodelowania ograniczeń prędkości jest łatwiejszy w obsłudze i może zmniejszyć liczbę błędów w danych wprowadzonych do systemu.

Badania empiryczne wykazały, że – pomimo prawidłowo dobranych ograniczeń prędkości cząstek roju – często cząstki nadal rozbiegały się w nieskończoność [252]. Jednym ze sposobów zapobieżenia temu jest zastosowanie współczynnika tłumienia $\tilde{\omega}(\tilde{k})$ wprowadzonego przez Shi i Eberharta (1998a, 1998b). Parametr ten jest mnożnikiem pierwszej części sumy z wyrażenia prędkości cząstki z poprzedniej iteracji. Zmodyfikowany wzór na prędkość cząstki można zapisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{ij}(k+1) = \tilde{\omega}(\tilde{k})\tilde{v}_{ij}(\tilde{k}) + \tilde{\phi}_{1j}(\tilde{k})[\tilde{p}_{ij}(\tilde{k}) - \tilde{x}_{ij}(\tilde{k})] + \tilde{\phi}_{2j}(\tilde{k})[\tilde{q}_{ij}(\tilde{k}) - \tilde{x}_{ij}(\tilde{k})], \\ \forall \tilde{i} = 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n}. \end{aligned} \quad (5.63)$$

Pierwszy składnik sumy stanowi dodatkowe ograniczenie prędkości cząstki ograniczający jej nadmierną oscylację. Dodatkowo, współczynnik tłumienia zmienia swoją wartość od $\tilde{\omega}^{\max}$ do $\tilde{\omega}^{\min}$, dzięki czemu staje się możliwe ustanowienie balansu pomiędzy eksploatacją hiperprzestrzeni poszukiwań (ang. *exploitation*) a jej eksploracją (ang. *exploration*). Założenie jest takie, aby cząstka wpraw „odwiedziła” jak największy obszar przestrzeni poszukiwań, a później „skupiła się” na przeszukiwaniu sąsiedztwa najlepszych dotychczas znalezionych rozwiązań. Sterowanie równowagą pomiędzy eksploatacją a eksploracją jest możliwe dzięki liniowej zmienności współczynnika tłumienia $\tilde{\omega}(\tilde{k})$ od $\tilde{\omega}^{\max}$ (w opracowanym systemie domyślnie przyjmowane $\tilde{\omega}^{\max} = 0,9$) do $\tilde{\omega}^{\min}$ (domyślnie przyjmowane $\tilde{\omega}^{\min} = 0,3$).

W pierwszej iteracji rozwiązywanego problemu położenie cząstek $\tilde{x}_{ij}(0)$ jest zazwyczaj losowane. W opracowanym systemie takie rozwiązanie jest procedurą domyślną. Użytkownik programu może jednak to ustawienie zmienić, w taki sposób, aby położenie wszystkich cząstek w zerowej iteracji było równe zeru $\tilde{x}_{ij}(0) = 0, \forall i = 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall j = 1, 2, \dots, \tilde{n}$. W pewnych szczególnych przypadkach w suboptymalnych rozwiązaniach problemu większość poszukiwanych zmiennych jest albo równa zeru albo mu bardzo bliska. Stąd zdecydowano się na wprowadzenie takiej możliwości, która dla tych specjalnych przypadków jest w stanie znacząco skrócić czas obliczeń.

Algorytm optymalizacji rojem cząstek działa iteracyjnie, aż do spełnienia warunku (bądź warunków) zatrzymania. Najpopularniejszymi wymaganiami dotyczącymi zakończenia pracy algorytmu są: brak progresji rozwiązania, przekroczenie zadeklarowanego czasu obliczeń czy osiągnięcie zadeklarowanej liczby iteracji. W opracowanym systemie jest tylko jeden warunek zatrzymania – osiągnięcie wprowadzonej przez decydenta liczby iteracji \tilde{K} .

W trakcie opracowywania systemu komputerowego zauważono, że wiele cząstek popada w stagnację już w początkowych iteracjach. Cząstki te wpadają w pułapkę optimum lokalnych, z których nie mogą się wydostać i przez pozostały czas obliczeń nie poprawiają już swoich pozycji i niejako marnują czas obliczeniowy programu. Celem zapobieżenia temu niekorzystnemu zjawisku zastosowano metodę wydostawania cząstek ze stagnacji, która jest kombinacją opisanych w literaturze podejść [258]–[260]. Podejście zastosowane w opracowanym systemie wykorzystuje parametr $\tilde{R}_i(\tilde{t})$ przyjmujący w literaturze miano wszechzynającego zamieszki (ang. *riot*) lub parametru rozpraszania (ang. *dispersion*). Wartość tego parametru ustala się z następującego wzoru:

$$\tilde{R}_i(\tilde{t}) = \frac{\left| 1 - \frac{\tilde{f}_i^p(\tilde{t})}{\tilde{f}_i^p(\tilde{t}-1)} \right|}{\left| 1 - \frac{\tilde{V}_i(\tilde{t})}{\tilde{V}_i(\tilde{t}-1)} \right|}, \quad (5.64)$$

gdzie:

\tilde{t} – liczba iteracji, co którą następuje sprawdzenie warunku poprawy rozwiązania (danej cząstki),

$\tilde{f}_i^p(\tilde{t})$ – wartość funkcji $\min_{z_{\infty,p}}$ najlepszego znalezionego do tej pory rozwiązania \tilde{p}_i (najlepszego położenia cząstki) przez cząstkę \tilde{i} w iteracji \tilde{t} ,

$\tilde{V}_i(\tilde{t})$ – średnia prędkość cząstki \tilde{i} we wszystkich kierunkach w iteracji \tilde{t} .

Następnie należy sprawdzić warunek poprawy rozwiązania:

$$\tilde{R}_i(\tilde{t}) < \tilde{R}^t, \quad (5.65)$$

gdzie:

\tilde{R}^t – wartość graniczna progresu cząstek.

Jeśli warunek (5.62) jest spełniony, obliczenia są kontynuowane bez żadnych zmian. W przypadku niespełnienia warunku poprawy rozwiązania, położenie cząstki \tilde{i} w iteracji \tilde{t} jest losowane (opcja domyślna) lub cząstka powraca do punktu początkowego obliczeń ($\tilde{x}_{\tilde{j}}(\tilde{t}) = 0, \forall \tilde{i} = 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n}$).

Algorytm opisanej powyżej metody obliczeniowej można zapisać w następujący sposób:

Krok 1. Nadanie położenia cząstek w zerowej iteracji.

- Dla każdego kierunku poszukiwań \tilde{j} jest losowane początkowe położenie z zakresów zmienności poszczególnych zmiennych:

$$\begin{aligned} c_p' &\in [0, |P|], \forall p \in P, \\ x_j' &\in [0, |R_j|], \forall j \in V, \\ y_p' &\in [0, |Y_p|], \forall p \in P, \\ z_j' &\in [0, |Z_j|], \forall j \in V \end{aligned} \quad (5.66)$$

- lub zdefiniowanie położenia wszystkich cząstek \tilde{i} na wszystkich kierunkach \tilde{j} jako równych zeru $\tilde{x}_{\tilde{j}}(0) = 0, \forall \tilde{i} = 1, 2, \dots, \tilde{m}, \forall \tilde{j} = 1, 2, \dots, \tilde{n}$.

Krok 2. Nadanie cząstkom losowych prędkości. Prędkości są losowane dla każdej cząstki \tilde{i} z zakresu od $-\tilde{V}_j^{\max}$ do \tilde{V}_j^{\max} dla każdego kierunku \tilde{j} .

Krok 3. Obliczenie wartości funkcji przystosowania cząstek roju.

3.1. Rozkodowanie wartości zmiennych ciągłych na całkowitoliczbowe lub binarne (w zależności od charakteru poszukiwanej zmiennej). Na tej podstawie należy przypisać konkretne brygady do realizacji poszczególnych procesów (należy przejść od numeracji lokalnej brygad, wprowadzonej dla poszczególnych procesów j , na numerację globalną) oraz ustalić permutację obiektów, a co za tym idzie permutację działek roboczych.

3.2. Obliczenie terminów rozpoczęcia wykonywania procesów.

3.2.1. Zgodnie z równaniem (5.11) pierwszy termin rozpoczęcia procesu na pierwszej działce jest równy zero.

3.2.2. Najwcześniejszy możliwy termin rozpoczęcia wykonywania s_{jl}' procesu j na działce l jest to wartość maksymalna z: sumy terminu rozpoczęcia wykonywania poprzedniego procesu i na tej samej działce roboczej l i czasowi wykonania poprzedniego procesu D_{il} , sumy terminu rozpoczęcia wykonywania tego samego procesu j na poprzedniej działce obiektu $l-1$ i czasu wykonania procesu $D_{j,l-1}$:

$$\begin{aligned} s_{jl}' &= \max\{s_{il}' + D_{il}; s_{j,l-1}' + D_{j,l-1}\}, \\ \forall i, j : i \in V \wedge j \in V / V^{tb} \wedge v_{ij} &= 1, \forall l = 2, 3, \dots, m, \\ s_{jl}' &= \max\{s_{j,l-1}' + D_{j,l-1}\}, \\ \forall i, j : i \in V \wedge j \in V^{tb} \wedge v_{ij} &= 1, \forall l = 2, 3, \dots, m. \end{aligned} \quad (5.67)$$

3.2.3. Obliczenie skorygowanych wartości s_{jl}' o wielkości z_j dla procesu j realizowanego na pierwszej działce oraz y_p' dla pierwszego procesu realizowanego na działce p :

$$\begin{aligned} l = 1 &\Rightarrow s_{j1}'' = s_{j1}' + z_j, \quad \forall j = 2, 3, \dots, n, \\ j = 1 &\Rightarrow s_{1l}'' = s_{1l}' + y_p, \quad \forall l = 2, 3, \dots, m, \forall p \in P. \end{aligned} \quad (5.68)$$

3.2.4. Sprawdzenie czy brygada r wykonująca dany proces j jest w danym czasie wolna. Sprawdzenie przeprowadza się jedynie dla procesów, których terminy rozpoczęcia zostały już wyznaczone w danej iteracji:

$$\begin{aligned} s_{ik}'' + D_{ik} \leq s_{jl}'' \quad \vee \quad s_{kl}'' \geq s_{jl}'' + D_{jl} &\Rightarrow s_{jl}''' = s_{jl}'', \\ \forall k, l \in L, \forall i, j \in R_j, \forall j \in V. \end{aligned} \quad (5.69)$$

Jeśli powyższy warunek nie jest spełniony, to należy skorygować s_{jl}'' o wartość największego naruszenia i w ten sposób otrzymać wartość s_{jl}''' .

- 3.2.5. Sprawdzenie czy na działce l w czasie wykonywania procesu j jest wykonywany już inny proces (chyba, że procesy należą do jednego ze zbiorów H_j):

$$s_{il}''' + D_{il} \leq s_{jl} \quad \vee \quad s_{il}''' \geq s_{jl}''' + D_{jl} \quad \Rightarrow \quad s_{jl} = s_{jl}''', \quad (5.70)$$

$$\forall l \in L, \forall j \in V, \forall j \notin H_j.$$

Jeśli powyższy warunek nie jest spełniony, to należy skorygować s_{jl}''' o wartość największego naruszenia i w ten sposób otrzymać wartość s_{jl} .

- 3.2.6. Należy powtórzyć procedurę od punktu 3.2.2, aż do wyznaczenia terminów rozpoczęcia wszystkich procesów na wszystkich działkach roboczych. Terminy wykonania procesów są wyznaczane najpierw dla $j=1$ dla wszystkich działek roboczych po kolei, następnie dla $j=2$ dla wszystkich działek po kolei i tak dalej, aż do wyznaczenia wszystkich terminów s_{jl} .

- 3.3. Znane są już wszystkie wartości zmiennych problemu, dlatego należy obliczyć wartość funkcji celu za pomocą równania (5.25), bądź któregoś z równań (5.12)-(5.14).

Krok 4. Uaktualnienie najlepszego położenia każdej cząstki \tilde{p}_{ij} . W pierwszej iteracji wylosowane wartości zmiennych tworzą najlepsze rozwiązanie w tej iteracji. W każdej kolejnej iteracji należy sprawdzić czy bieżąca najlepsza wartość funkcji celu jest mniejsza od wartości funkcji celu dla cząstki w obecnym położeniu. Jeśli nie, zmienne dla najlepszego rozwiązania się nie zmieniają. Jeżeli tak, to cząstka w obecnym położeniu staje się nowym najlepszym rozwiązaniem.

Krok 5. Uaktualnienie najlepszego położenia każdej cząstki z uwzględnieniem jej sąsiedztwa \tilde{q}_{ij} . Dokonuje się tego w kroku czwartym, z tą różnicą, że sprawdzanie wykonuje się dla cząsteczki i jej sąsiedztwa.

Krok 6. Aktualizacja prędkości cząstek roju zgodnie ze wzorem (5.63).

Krok 7. Jeżeli numer iteracji jest wielokrotnością \tilde{t} , to należy obliczyć współczynnik $\tilde{R}_i(\tilde{t})$ dla każdej cząstki \tilde{i} zgodnie ze wzorem (5.64) i sprawdzić warunek zgodnie z formułą (5.65). Jeśli warunek jest spełniony, obliczenia są kontynuowane bez żadnych zmian. W przypadku niespełnienia warunku poprawy rozwiązania, położenie cząstki \tilde{i} w iteracji \tilde{t} w kroku ósmym jest losowane (a nie

obliczane za pomocą wzoru (5.58)) lub powraca się do punktu wejściowego obliczeń (w zależności od przyjętych ustawień systemu).

Krok 8. Aktualizacja położenia cząstek roju zgodnie ze wzorem (5.58). Położenie jest zaokrąglane do liczb całkowitych.

Krok 9. Powtórzenie procedury z kroków 3-8 założoną liczbę razy (liczbę iteracji \tilde{K}).

Krok 10. Przedstawienie najlepszego osiągniętego wyniku (najmniejszej wartości funkcji celu oraz odpowiadającemu jej zestawu wartości zmiennych oraz ostatecznego najlepszego harmonogramu).

Schemat powyższej procedury został przedstawiony na rysunku 5.13.

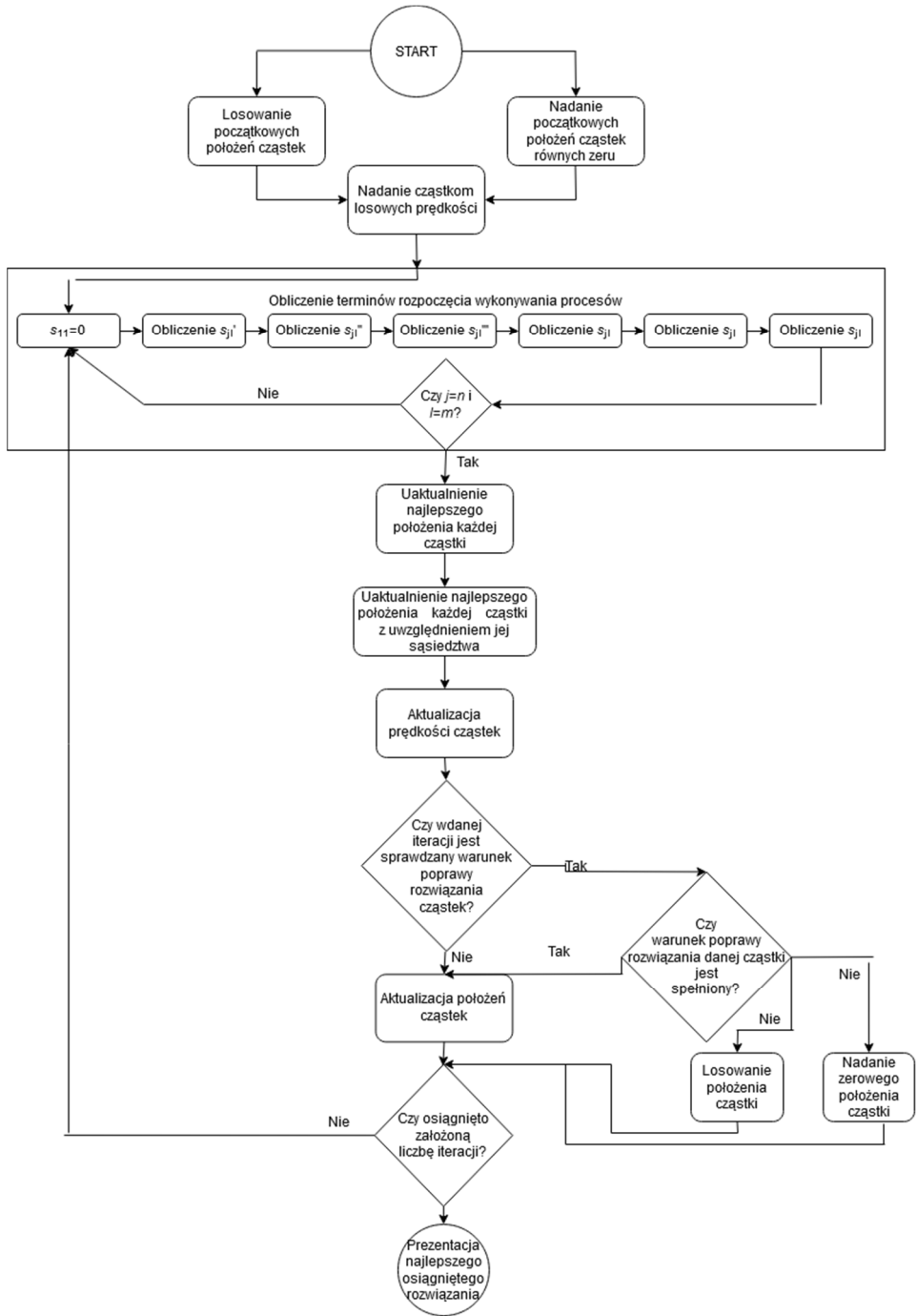
5.3.7.2. Obsługa algorytmu PSO w opracowanym systemie komputerowym

W celu dostosowania ustawień algorytmu optymalizacji rojem cząstek do rozwiązywanego problemu należy wprowadzić odpowiednie wartości parametrów sterujących algorytmem obliczeniowym. Wszystkie te parametry należy wprowadzać w pliku tekstowym „Input” w sekcji PSO.

Jedynym parametrem, który nie ma wartości domyślnej ustawionej w programie, jest liczebność populacji cząstek \tilde{m} . Intuicyjnie, przy dążeniu do skrócenia czasu obliczeń, ustawia się mniejszą liczbę cząstek roju. Należy pamiętać, że głównym czynnikiem decydującym o czasie optymalizacji działania algorytmu jest liczba obliczeń wartości funkcji celu, która zależy również od liczby iteracji [261]. Niestety zbyt mały rój prawdopodobnie będzie potrzebował więcej czasu na znalezienie rozwiązania lub nawet nie znajdzie go wcale. Z tego względu należy spróbować znaleźć kompromis pomiędzy czasem obliczeń a liczebnością roju. Badacze empirycznie ustalili optymalną liczebność roju na 20-30 osobników, która okazała się wystarczająca do rozwiązania różnych problemów optymalizacyjnych [261]. Aby wprowadzić tę wartość, należy w pliku „Input” w sekcji PSO wpisać słowo kluczowe #PARTICLE_COUNT i liczbę cząstek w populacji. Przykład zdefiniowania liczebności roju przedstawiono poniżej:

```
#PARTICLE_COUNT 20
```

Trzeci człon sumy w zależności (5.63) odnosi się do aspektu społecznego algorytmu, który opiera się na komunikacji między cząsteczkami. W zależności od przyjętego sposobu porozumiewania się cząstek algorytm może się charakteryzować większą bądź mniejszą tendencją do zbytniego zbiegania się. Zaleca się stosowanie małych wartości parametru liczebności sąsiedztwa \tilde{s} . Najlepiej, aby wynosił on $\tilde{s}=1$ lub $\tilde{s}=2$, co może pomóc w eskalacji zbytniego zawężenia się przestrzeni poszukiwań. W celu wprowadzenia wartości parametru liczebności sąsiedztwa należy użyć słowa kluczowego #NEIGHTBOUR_SIZE



Rysunek 5.13. Schemat zastosowanego algorytmu PSO w opracowanym systemie

w sekcji PSO w pliku Input. Przykład zdefiniowania tej wielkości jest następujący:

```
#NEIGHTBOUR_SIZE 1
```

Liczba iteracji algorytmu jest podstawowym parametrem służącym sterowaniu długości obliczeń. W przypadku, dużej złożoności rozwiązywanego problemu, liczba iteracji powinna być duża. Natomiast, gdy jest stosowany do rozwiązania prostego i łatwego przykładu, to liczba iteracji powinna być mała, przy czym zaleca się aby $\tilde{K} \geq 1000$. Liczbę iteracji należy wprowadzić do opracowanego systemu za pomocą słowa kluczowego #ITERATION_COUNT w sekcji PSO pliku Input. Przykład wprowadzenia liczby iteracji algorytmu do programu zamieszczono poniżej:

```
#ITERATION_COUNT 1000
```

Należy zwrócić szczególną uwagę, aby parametr \tilde{t} , określający co ile iteracji ma być sprawdzany warunek poprawy rozwiązania (5.65), nie był zbyt mały. W skrajnym przypadku dla $\tilde{t}=1$ każdy brak poprawy rozwiązania będzie skutkował losowaniem nowego położenia cząstki. Może to doprowadzić do zaniku fazy eksploatacji algorytmu i pseudolosowego poszukiwania rozwiązania. Z drugiej strony, jeśli parametr \tilde{t} będzie zbyt duży, to program będzie tracił czas obliczeniowy na przeszukiwanie sąsiedztwa rozwiązań, które nie mają perspektyw poprawy. Dobierając wielkość \tilde{t} należy również wziąć pod uwagę złożoność rozwiązywanego przypadku oraz zadeklarowaną liczbę iteracji \tilde{K} . Pomimo tego, że domyślna wartość \tilde{t} wynosi 20, to zalecany zakres tego parametru dla większości przypadków rozważanych w literaturze wynosi $\tilde{t} = [50, 200]$. Z kolei zalecaną wartością graniczną dla parametru progresu cząstki jest $\tilde{R}' = 0,001$. Parametry związane z warunkiem progresu cząstki należy wprowadzać po słowach kluczowych (odpowiednio) #R i #RT w sekcji PSO w pliku Input. Sposób przykładowego zadeklarowania tych wartości tych parametrów algorytmu przedstawiono poniżej:

```
#R 100  
#RT 0.001
```

Współczynniki przyspieszenia \tilde{c}_1 i \tilde{c}_2 reprezentują skłonności przemieszczania się cząstek w kierunkach poszukiwania \tilde{p}_{ij} i \tilde{q}_{ij} . Jeśli wartość tych stałych wielkości jest zbyt duża, cząstki poruszają się gwałtownie i zwiększa się ryzyko uwięzienia w optimum lokalnym. I odwrotnie, jeśli ich wartość jest zbyt niska, cząstki poruszają się zbyt wolno, nakład czasu obliczeń znacznie się

zwiększa i jest prawdopodobne, że algorytm nie odnajdzie rozwiązania optymalnego lub zbliżonego do niego [262]. Z drugiej strony, wartość względna tych dwóch współczynników przyspieszenia jest krytyczna i wpływa na zachowanie algorytmu. Gdy wzrasta wartość współczynnika przyspieszenia poznawczego \tilde{c}_1 , zwiększa on przyciąganie cząstek w kierunku \tilde{p}_{ij} i zmniejsza ich przyciąganie w kierunku \tilde{q}_{ij} . Ponadto, zwiększenie współczynnika przyspieszenia społecznego w stosunku do współczynnika przyspieszenia poznawczego zwiększa przyciąganie cząstek w kierunku \tilde{q}_{ij} . W literaturze, zaleca się, aby parametry te przyjmowały następującą wartość $\tilde{c}_1 = \tilde{c}_2 = 2$ – przy której uzyskuje się najlepsze wyniki większości rozwiązywanych dotychczas problemów [262], [263]. W opracowanym programie można zdefiniować trzy zestawy współczynników przyspieszenia dla różnych typów zmiennych. W przypadku chęci zdefiniowania współczynników przyspieszenia \tilde{c}_1 i \tilde{c}_2 dla zmiennej x_j należy wprowadzić słowa kluczowe #C1X oraz #C2X w sekcji PSO w pliku „Input”, a po nich podać wartości tych współczynników. Z kolei, aby wprowadzić te współczynniki dla zmiennej c_p , należy je wprowadzić po słowach kluczowych #C1C oraz #C2C we wspomnianym miejscu w pliku Input, a dla zmiennych z_j oraz y_p – po słowach kluczowych #C1W i #C2W. Poniżej zamieszczono przykład zapisu tych danych w pliku „Input”:

```
#C1X 2
#C2X 2
#C1W 1.8
#C2W 2.2
#C1C 2
#C2C 2
```

W opracowanym systemie wartość współczynnika inercji $\tilde{\omega}(\tilde{k})$ zmienia się liniowo od maksymalnej ω^{\max} do minimalnej wartości ω^{\min} . Wartości graniczne – maksymalna i minimalna – muszą zostać zdefiniowane przez osobę obsługującą system. Przyjęcie zbyt dużej wartości ω^{\max} może spowodować zbyt swobodne poruszanie się cząstek w pierwszych iteracjach, zbliżone do przeszukiwania losowego. Przyjęcie zbyt małej górnej granicy tego parametru może zaburzyć eksplorację przestrzeni rozwiązań i spowodować, że przestrzeń zostanie zbadana jedynie lokalnie, w pobliżu losowo przypisanego położenia. Z kolei przyjęcie zbyt wysokiej wartości ω^{\min} może powodować brak eksploatacji sąsiedztwa najlepiej rokujących rozwiązań. Zbyt niska wartość ω^{\min} może prowadzić do zaniku przeszukiwania hiperprzestrzeni w ostatnich iteracjach. W literaturze [252], [263] zaleca się przyjmowanie następujących wartości tych parametrów ω^{\max} jest

równe 0,9, a $\omega^{\max} = 0,3 \div 0,4$. W celu prowadzenia tych wartości do opracowanego systemu należy użyć słów kluczowych, odpowiednio: #INERTION_MAX i #INERTION_MIN. Przykład zdefiniowania tych parametrów zamieszczono poniżej:

```
#INERTION_MAX 0.9
#INERTION_MIN 0.4
```

Kolejnymi parametrami wymagającymi wprowadzenia do systemu są ograniczenia prędkości ruchu cząstek. Przyjęcie zbyt dużych wartości ograniczenia prędkości może doprowadzić do nadmiernych oscylacji cząstek, a co za tym idzie, do niewłaściwego przeszukiwania hiperprzestrzeni rozwiązań. Przyjęcie zbyt rygorystycznych ograniczeń prędkości może spowodować, że cząstki będą mogły poruszać się jedynie lokalnie i prawdopodobnie nigdy nie uda im się uciec z pułapek optimów lokalnych. W opracowanym systemie ograniczenie prędkości \tilde{V}_j^{\max} zdefiniowano jako wielokrotność miary problemu, osobno dla różnych rodzajów zmiennych. Ograniczenie prędkości należy ustalić oddzielnie dla każdego typu zmiennych, dla krotności zakresu zmienności zmiennej $x_j - \tilde{V}_x^{\max}$, zmiennej $c_p - \tilde{V}_c^{\max}$ oraz zmiennych z_j i $y_p - \tilde{V}_w^{\max}$. W celu wprowadzenia powyższych parametrów do systemu należy użyć słów kluczowych #V_MAX_X, #V_MAX_W i #V_MAX_C tak, jak przedstawiono to w poniższym przykładzie:

```
#V_MAX_X 1
#V_MAX_W 1.2
#V_MAX_C 1
```

W programie należy wprowadzić także wartość parametru – dostatecznie małej liczby ρ . Parametr ten jest wykorzystywany w rozwiązywaniu wielu problemów numerycznych. Jest on używany między innymi w równaniu (5.25). Jego domyślną wartością (i zalecaną dla rozwiązywanego problemu) jest $\rho = 0,001$. W celu wprowadzenia tego parametru do opisywanego systemu należy użyć słowa kluczowego #SMALL_NUMBER. Przykład zapisu wartości tego parametru w pliku „Input” przedstawiono poniżej:

```
#SMALL_NUMBER 0.001
```

Opracowany system umożliwia również wprowadzenie zdefiniowanych wartości C_1 , C_2 oraz C_3 . Pozwala to na bezpośrednie obliczenie wartości $z_{\infty, \rho}$ i jest niezwykle przydatne zwłaszcza w testowaniu opracowanego systemu. W celu bezpośredniego wprowadzenia referencyjnych wartości funkcji celu

należy użyć słów kluczowych: #CONST_C1, #CONST_C2 lub/ oraz #CONST_C3, tak jak poniżej:

```
#CONST_C1 100
#CONST_C2 10
#CONST_C3 30
```

Zgodnie ze schematem widocznym na rysunku 5.13 jest możliwe ustawienie dwóch rodzajów położenia początkowego cząstek: losowego albo równego zeru we wszystkich kierunkach \tilde{j} . Sugeruje się losowe ustawienie początkowe cząstek, wykorzystując słowo kluczowe #RANDOM_ON_START. Podobnie jest z ustawieniem cząstki po niespełnieniu warunku jej poprawy (5.62): można ustawić losowe położenie cząstki lub równe zeru. W celu ustawienia trybu losowania położenia cząstki należy użyć słowa kluczowego #RANDOM_MUTATION. Poniżej przedstawiono sposób zdefiniowania trybów losowych w pliku „Input”:

```
#RANDOM_ON_START
#RANDOM_MUTATION
```

5.3.7.3. Podsumowanie procedury tworzenia harmonogramu przedsięwzięcia budowlanego

Dane dla danego problemu harmonizacji należy wprowadzić do systemu w pliku „Input” zgodnie z zamieszczonymi w rozdziale 5.3 informacjami. Należy je wprowadzać kolejno do następujących po sobie sekcji: PSO, macierzy, OBJECTTYPE i OBJECT. Błędne zdefiniowanie danych może spowodować nieotrzymanie żadnego rezultatu lub uzyskanie przez program niepoprawnego wyniku. Poniżej zamieszczono sposób wprowadzenia danych w pliku „Input” dla przykładowego przedsięwzięcia:

```
#PARTICLE_COUNT 20
#NEIGHTBOUR_SIZE 1
#ITERATION_COUNT 2500
#END 1000
#R 20
#RT 0.0001
#C1X 2
#C2X 2
#C1W 1.8
#C2W 2.2
#C1C 2
#C2C 2
```

```

#INERTION_MAX 0.9
#INERTION_MIN 0.6
#V_MAX_X 1.3
#V_MAX_W 1
#V_MAX_C 1.7
#SMALL_NUMBER 0.001
#CONST_C1 100
#CONST_C1 10
#CONST_C1 30
#NO_OUTPUT_ALL
#RANDOM_ON_START
#RANDOM_MUTATION
#AHP
1 1 0.333333333
1 1 0.333333333
3 3 1

1 0.333333333 1
3 1 3
1 0.333333333 1

1 0.333333333 0.2
3 1 0.333333333
5 3 1

1 0.2 1
5 1 5
1 0.2 1

#MATRIX
0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
#ENDMATRIX

```

```
#CREWS 12
CREWS_NOT_CALCULATE 0 10
#OBJECTTYPE
ACTIVITY 0
CREW 10
ACTIVITY 1
TJ 80
CREW 0 1
MUTUAL 2 3
ACTIVITY 2
CREW 0 1
NOT_USE_CREW_TIME
MUTUAL 1 3
ACTIVITY 3
TJ 20
CREW 2
MUTUAL 1 2
ACTIVITY 4
CREW 5 8
ACTIVITY 5
CREW 3 4
ACTIVITY 6
CREW 5 6 8 9
ACTIVITY 7
CREW 6 7 9
ACTIVITY 8
CREW 5 8
ACTIVITY 9
CREW 6 7 9
ACTIVITY 10
CREW 6 7 9
MUTUAL 11
ACTIVITY 11
CREW 6 7 9
MUTUAL 10
ACTIVITY 12
CREW 11

#OBJECT 0
GP 1
TP 100
UNITCOUNT 1
ACTIVITY 0
CREW 10 0
ACTIVITY 1
```

CREW 0 6
CREW 1 5
ACTIVITY 2
CREW 0 8
CREW 1 7
ACTIVITY 3
CREW 2 4
ACTIVITY 4
CREW 5 8
CREW 8 7
ACTIVITY 5
CREW 3 3
CREW 4 3
ACTIVITY 6
CREW 5 3
CREW 6 3
CREW 8 3
CREW 9 4
ACTIVITY 7
CREW 6 2
CREW 7 2
CREW 9 2
ACTIVITY 8
CREW 5 4
CREW 8 3
ACTIVITY 9
CREW 6 6
CREW 7 5
CREW 9 5
ACTIVITY 10
CREW 6 1
CREW 7 2
CREW 9 5
ACTIVITY 11
CREW 6 3
CREW 7 3
CREW 9 3
ACTIVITY 12
CREW 11 0

Zestawienia wszystkich słów kluczowych wykorzystywanych do wprowadzania danych zamieszczono w tabeli 5.3.

Po wykonaniu obliczeń program tworzy dwa pliki z danymi zawierającymi rozwiązanie – „Output” i „OutputALL” – i zapisuje je w tym samym folderze, w którym znajduje się plik Input. Pierwszy z nich zawiera podstawowe dane

niezbędne do utworzenia harmonogramu robót budowlanych zadanego przedsięwzięcia wieloobiektowego. Drugi z wymienionych jest szczegółowym raportem zawierającym wszystkie parametry obliczane przez program we wszystkich iteracjach. Plik ten może być wykorzystywany do nadzorowania i sprawdzania funkcjonowania samego programu. Ze względu na fakt, że wygenerowanie tak dużego pliku jest czasochłonne i w większości przypadków jego dane są mało istotne, można wprowadzić do pliku „Input” w sekcji PSO słowo kluczowe #NO_OUTPUT_ALL i nie generować pliku „OutputALL”:

#NO_OUTPUT_ALL

Tabela 5.3. Oznaczenia słów kluczowych używanych w opracowanym systemie

Słowo kluczowe	Oznaczenie parametru systemu	Interpretacja
#PARTICLE_COUNT	\tilde{m}	Liczebność roju cząstek
#NEIGHTBOUR_SIZE	\tilde{s}	Wielkość sąsiedztwa
#ITERATION_COUNT	\tilde{K}	Liczba iteracji
#END	T	Dyrektywny czas zakończenia się przedsięwzięcia
#R	\tilde{t}	Co ile iteracji sprawdzenie progresu cząstek
#RT	\tilde{R}^t	Graniczna wartość progresu cząstek
#C1X #C1W #C1C	\tilde{c}_1	Współczynniki przyspieszenia poznawczego
#C2X #C2W #C2C	\tilde{c}_2	Współczynniki przyspieszenia społecznego
#INERTION_MAX	$\tilde{\omega}^{\max}$	Górna granica współczynnika inercji
#INERTION_MIN	$\tilde{\omega}^{\min}$	Dolna granica współczynnika inercji
#V_MAX_X #V_MAX_W #V_MAX_C	\tilde{V}_j^{\max}	Ograniczenia prędkości cząstek
#SMALL_NUMBER	ρ	Dostatecznie mała liczba
#CONST_C1 #CONST_C2 #CONST_C3	C_1, C_2, C_3	Dyrektywne wartości funkcji celu
#CZEBYSZEW	-	Dyrektywny sposób wprowadzenia wag problemu
#NO_OUTPUT_ALL	-	Nietworzenie pliku ze szczegółami obliczeń
#RANDOM_MUTATION	-	Losowe położenie początkowe cząstek

c. d. Tabeli 5.3. Oznaczenia słów kluczowych używanych w opracowanym systemie

Słowo kluczowe	Oznaczenie parametru systemu	Interpretacja
#RANDOM_ON_START	-	Losowe położenie cząstek po niespełnieniu warunku progresu
#LBS_Q	\hat{q}	progi nierozróżnialności
#LBS_P	\hat{p}	Progi preferencji
#LBS_V	\hat{v}	Progi weta
#CREWS	n	Liczba brygad
#AHP	a_{ij}	Wartości macierzy porównań parami
#MATRIX	$[v_{ij}]$	Początek macierzy
#ENDMATRIX	$[v_{ij}]$	Koniec macierzy
#OBJECTTYPE	-	Rozpoczyna sekcję
TJ	z_j	Zakres możliwego przesunięcia realizacji procesu
ACTIVITY	j	Definiuje proces
CREW	R_j	Brygady przyporządkowane do procesu
MUTUAL	H_j	Możliwa jednoczesna realizacja procesów
CREWS_NOT_CALCULATE	R^s	Brygady nie liczone w drugiej funkcji celu
NOT_USE_CREW_TIME	ν^{tb}	Proces jest przerwą technologiczną
#OBJECT	-	Rozpoczyna sekcję
GP	g_p	Waga obiektu
ACTIVITY	j	Rozpoczyna definicję czasu wykonywania procesu
CREW	t_{jlr}	Czasy wykonania procesów
TP	y_p	Zakres możliwego przesunięcia realizacji obiektu

Plik „Output” zawiera wszystkie poszukiwane przez użytkownika zmienne x_j , c_p , z_j oraz y_p dla najlepszego znalezionej rozwiązania wraz z jego wartościami dla wszystkich funkcji celu oraz ostateczną wartość $z_{\infty,p}$. Ponadto, system umieszcza w pliku terminy rozpoczęcia się wszystkich procesów na wszystkich działkach S_{jl} . Dodatkowo, w pliku tekstowym „Output” można

znaleźć informacje dotyczące czasu obliczeń wyrażone w milisekundach. Te wszystkie wymienione powyżej dane podane są cztery razy – dla najlepszych znalezionych rozwiązań w trakcie poszukiwań niewiadomych C_1^o , C_2^o , C_3^o i $z_{\infty, \rho}$. Na samym końcu pliku jest podany całkowity czas obliczeń. Poniżej zamieszczono fragment pliku „Output”, zawierający sekcję z wynikami obliczeń $z_{\infty, \rho}$:

Czebyszew

```
X
0,286278777889106 0 1,99000000022352
0,286613408055256 1,99000000022352
1,71486330460734 0 0,309583018117205
0,39705212317619 2,31845521406282
1,85617049071349 2,99000000022352
0,867143132939919
```

```
C
0,23386031558092
```

```
W TP
Object 0
100
```

```
W TJ
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

```
S
Object 0
Unit 0
0 0 0 0 7 14 17 24 20 26 31 31 34
```

```
C1
34
```

```
C2
0
```

```
C3
34
```

```
P
0,0101515151515152
```

Time
1629

Total Time
6655

Plik OutputALL zawiera wszystkie pośrednie dane obliczone przez system dla wszystkich cząstek we wszystkich iteracjach. Są to wartości: zmiennych x_j , c_p , z_j oraz y_p , wszystkich funkcji celu C_1^o , C_2^o , C_3^o i $z_{\infty,p}$, współczynnika progresu $\tilde{R}_i(\tilde{t})$ z ostatniego sprawdzenia \tilde{t} , a także najlepsze do tej pory znalezione rozwiązanie odpowiadające najlepszemu położeniu cząstki \tilde{p}_{ij} . Poniżej zamieszczono fragment przykładowego pliku „Output” z wynikami dla jednej iteracji:

Czebyszew C1
Iteration 0
best0 296
Particle 0

X
0,433328783807032 0,76059915777009
1,99000000022352 0,990000000223517
0,474989381064833 0,398083712289835
1,9563256917658 0 0 0 1,93090002370645
2,46900522151994 0

C
0

W TP
Object 0
47

W TJ
37 76 0 76 18 0 47 0 0 0 5 40

S
Object 0
Unit 0
0 27 28 18 55 72 99 110 122 177 255 202 308

VX
0 -0,551003009694517 2,6 1,3 0,370929354199352

0,312136460371134 1,32057165382131 -
1,72389319217304 -2,18707909538711 -
2,31966689315099 -0,941952893529287
0,020370167955778 -1,3

VW TP
Object 0
-30,7622606433752

VW TJ
10,1905876516321 76 -20 76 8,71335230372537 -
31,2976055955969 38,8300173141202 -76 -76 -76 -
15,3031402631212 -8,28259768294292

VC
-1,7

RK
0

C1
308

C2
106

C3
308

P
308

Jeżeli użytkownik uruchomi w programie tryb przeglądu wiązką światła, to po zakończeniu procesu decyzyjnego i opuszczeniu systemu zostaną utworzone dodatkowe pliki tekstowe „OutputReference” i „OutputAllReference”. Pliki te są uzupełnieniem plików „Output” i „OutputAll” w metodzie przeglądu wiązką światła i zawierają dodatkowe wartości współczynników szybkości przeszukiwania sąsiedztwa ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 i wartości \hat{m}_s , \hat{m}_p , \hat{m}_q , \hat{m}_v dla wszystkich etapów procesu decyzyjnego. W przypadku braku potrzeby generowania pliku zawierającego wszystkie dane (OutputAllReference) należy użyć zdefiniowanego już wcześniej słowa kluczowego #NO_OUTPUT_ALL.

Algorytm metody harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego został oprogramowany przez programistę

w środowisku Microsoft Visual Studio za pomocą obiektowego języka programowania C#. Notacja programu liczy 5857 linii kodu.

Po otrzymaniu danych będących wynikiem przeprowadzonych przez opracowany system obliczeń, osoba obsługująca program powinna zdecydować, czy otrzymany rezultat ją satysfakcjonuje. W przypadku, gdy wynik nie zadowala decydenta, należy przeprowadzić obliczenia ponownie przy zastosowaniu opracowanego systemu. Można w tym celu przemyśleć ponownie dobór odpowiednich wag oceny kryteriów harmonogramu, bądź wybrać inną, dostępną metodę ich ustalania. W przypadku, gdy otrzymany rezultat satysfakcjonuje osobę podejmującą decyzję, jest on rozwiązaniem podejmowanego problemu. Otrzymany wariant harmonogramu realizacji przedsięwzięcia budowlanego należy skierować do realizacji.

5.4. Badania weryfikacyjne metody opracowanego modelu zagadnienia, systemu i uzyskiwanych rozwiązań

Każdy produkt – w tym przypadku narzędzie do wspomagania podejmowania decyzji – przed dopuszczeniem do użytkowania powinien zostać sprawdzony. Proces testowania i kontroli powinien wykazać, że został zaprojektowany i wykonany zgodnie z oczekiwaniami odbiorcy. W sprawdzeniu poprawności opracowanego systemu można wyróżnić dwie zasadnicze czynności: weryfikację i walidację. Weryfikacja powinna odpowiadać na pytanie: Czy model jest zbudowany w sposób poprawny?, podczas gdy walidacja daje odpowiedź na pytanie: Czy zbudowany jest poprawny model? [56], [264], [265].

Pośród wielu stosowanych sposobów i narzędzi wykorzystywanych w procesach walidacji i weryfikacji [264], [266] w pracy używa się następujące:

- Badania ankietowe – ze względu na jednorazowy charakter przedsięwzięć budowlanych walidacja modelu jest utrudniona. Z tego powodu przeprowadzono badania ankietowe stanowiące formę walidacji modelu zagadnienia i próbę spełnienia wymagań stawianych przez użytkowników w jak największym stopniu.
- Konfrontacje danych – wynik otrzymany z badanego modelu porównuje się ze znanymi wynikami uzyskanymi z rozwiązania innych modeli. W podejmowanym problemie niestety nie istnieją żadne modele, które rozwiązywałyby problem harmonizacji wieloobektowego przedsięwzięcia budowlanego ujętego w ten sposób. Z tego względu rozwiązano przykład harmonizacji prostego przedsięwzięcia budowlanego bez uwzględniania wielu możliwych do wykorzystania ograniczeń modelu, dla którego optymalne rozwiązanie jest znane.
- Test warunków brzegowych – polega na potwierdzeniu istnienia warunków brzegowych. W rozpatrywanym modelu przyjęto zerowe czasy trwania procesów, a oczekiwanym rezultatem było otrzymanie zerowego czasu realizacji całego przedsięwzięcia.

- Test stabilności otrzymanego rozwiązania – polega na sprawdzeniu jak powtarzalnie działa system, jak często znajduje najlepsze rozwiązanie i jak inne znalezione rozwiązania są zbliżone do tego suboptymalnego. Jest to szczególnie istotne sprawdzenie w przypadku systemów generujących rozwiązania suboptymalne. W opracowanym systemie rozwiązano trzydziestokrotnie obliczenia tego samego przykładu i porównano ze sobą uzyskane wyniki.
- Analiza wrażliwości – opiera się na zmianie danych wejściowych i parametrów systemu w celu określenia wpływu tych zmian na jego funkcjonowanie. W pracy manipulowano parametrami modelu i obserwowano ich przełożenie na otrzymywane rezultaty.

Podkreśla się, że w pracy przedstawia się wybrane fragmenty przeprowadzonej procedury weryfikacyjnej.

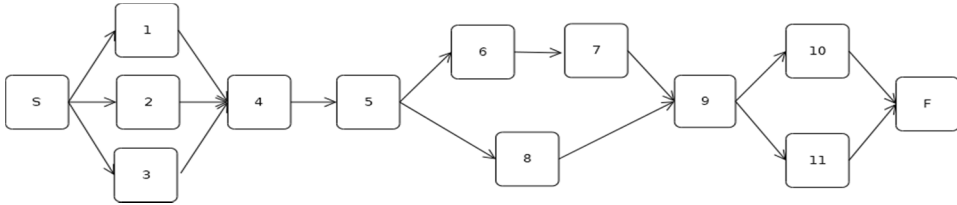
Pierwszym krokiem w weryfikacji poprawności funkcjonowania opracowanego systemu jest konfrontacja danych – porównanie otrzymanego rezultatu z trywialnym przykładem, którego rozwiązanie jest banalne i z góry znane. Rozwiązywany przykład dotyczy realizacji jednego obiektu zawierającego jedną działkę roboczą, na której będzie wykonywanych 13 procesów, a ich łączny czas realizacji wynosi 48 dni. Procesy mają być wykonane w sposób szeregowy. Do wykonania każdego z nich przypisana jest odrębna brygada, więc w sumie do dyspozycji jest 13 brygad. W zadaniu jest minimalizowana pierwsza funkcja celu – czas realizacji całego przedsięwzięcia. Z tego względu waga pierwszej funkcji celu równa jest jeden, natomiast wartość pozostałych wynosi 0.

Obliczenia wszystkich przykładów w tym rozdziale zostały wykonane na komputerze wyposażonym w procesor Intel® Core™ i-4590T CPU 2GHz. W wyniku obliczeń przykładu uzyskano harmonogram z czasem realizacji przedsięwzięcia równym 48. Jest to rezultat oczekiwany, który uprawnia do stwierdzenia, że opracowany program zaliczył pierwszy test kontrolny. Czas obliczeń funkcji $z_{\infty, \rho}$ przy pięciuset iteracjach i dwudziestu cząsteczkach wyniósł 0,3 sekundy.

Kolejnym etapem kontroli poprawności funkcjonowania opracowanego modelu był test warunków brzegowych. Wprowadzono do pliku „Input” dane przykładu przedsięwzięcia wieloobiektowego, którego czasy realizacji wszystkich procesów przez wszystkie przypisane do nich brygady były równe zero. Przedsięwzięcie składało się z 13 procesów na każdej działce i 20 jednodziałkowych obiektów budowlanych. Do dyspozycji pozostawało 20 brygad.

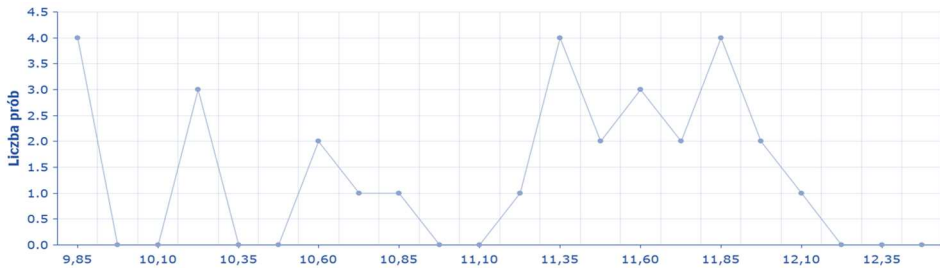
Wartości funkcji celu dla optymalizacji wszystkich minimalizowanych funkcji celu (5.12) – (5.14) i (5.25) były równe zero. Czas obliczeń funkcji $z_{\infty, \rho}$ wyniósł 11,5 sekundy. Otrzymany rezultat jest zgodny z oczekiwanym, więc można uznać, że opracowany system spełnił wymagania przeprowadzonego testu.

Kolejnym etapem weryfikacji opracowanego systemu jest sprawdzenie stabilności i powtarzalności otrzymywanego rozwiązania. W tym celu rozwiązano 30 razy problem dla przykładowego przedsięwzięcia. Składa się ono dwóch pięciodziałkowych obiektów budowlanych. Na każdej z działek roboczych jest do wykonania trzynaście procesów budowlanych, których wzajemne relacje kolejnościowe widoczne są na rysunku 5.14., a do realizacji których przypisanych jest 12 brygad roboczych.

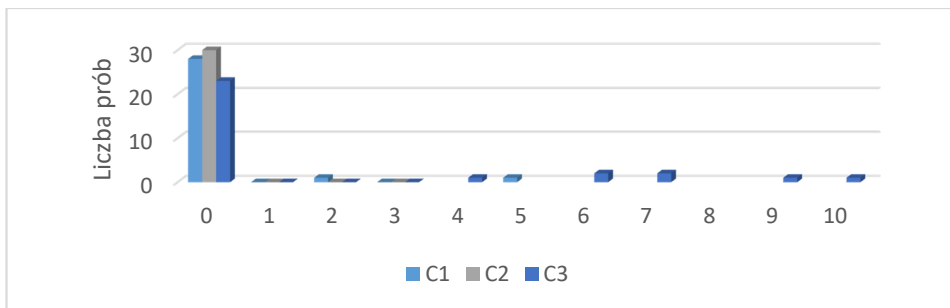


Rysunek 5.14. Graf zależności pomiędzy procesami w przykładowym przedsięwzięciu

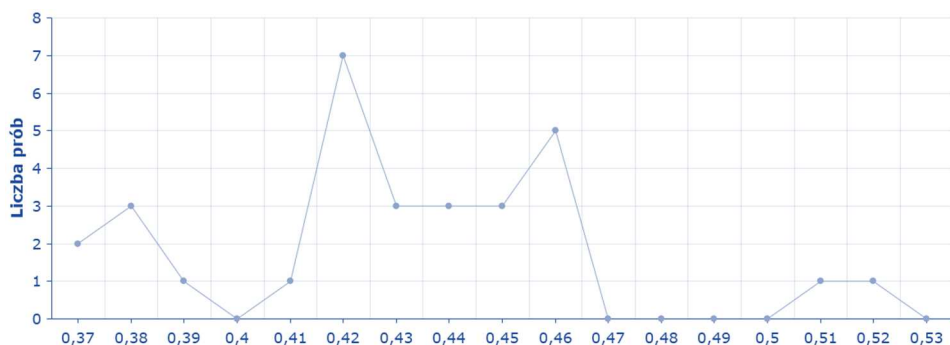
Liczba iteracji wyniosła 2500 przy liczbie cząstek równej dwadzieścia. Rozkład częstości czasu obliczeń dla funkcji (5.25) został przedstawiony na rysunku 5.15. Wyniki dla poszczególnych funkcji celu (5.12) – (5.14) i kompromisowej funkcji celu (5.25) zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 5.16. oraz 5.17., a także w tabeli 5.4. Analiza otrzymanych rezultatów wykazała, że opracowany system jest wyjątkowo stabilny, a odchylenie standardowe uzyskiwanych wartości poszczególnych funkcji celu mieści się w ogólnie przyjętym pięcioprocentowym progu użyteczności systemu.



Rysunek 5.15. Rozkład częstości czasu obliczeń (wyrażonego w sekundach) $z_{\infty, \rho}$ dla przykładu obliczeniowego



Rysunek 5.16. Częstość otrzymywanych wyników dla poszczególnych funkcji celu C_1^o , C_2^o , C_3^o w zależności od oddalenia od najlepszego znalezionej rozwiązania



Rysunek 5.17. Wyniki otrzymywane dla funkcji $z_{\infty, \rho}$ dla przykładu obliczeniowego

Tabela 5.4. Podsumowanie otrzymanych rezultatów z testu stabilności otrzymywanego rozwiązania

Funkcja celu	Najlepsze znalezione rozwiązanie	Średnia wartość funkcji celu	Moda	Odchylenie standardowe populacji
C_1^o	145 dni	145,23 dnia	145 dni	0,95 dnia
C_2^o	0 dni	0 dni	0 dni	0 dni
C_3^o	197 dni	198,63 dnia	197 dni	3,09 dnia
$z_{\infty, \rho}$	0,37	0,43	0,42	0,04

Ostatnim etapem badań weryfikacyjnych prezentowanych w pracy zaprezentowanej w pracy jest analiza wrażliwości. Przykładem poddanym badaniu jest przedsięwzięcie składające się dwudziestu jednodziałkowych obiektów budowlanych, na których należy wykonać trzynaście procesów, a ich wzajemne zależności kolejnościowe zaprezentowane są na rysunku 5.14. Do

realizacji tych procesów było do dyspozycji 12 brygad roboczych. Proces analizy wrażliwości był realizowany poprzez manipulację parametrami sterującymi algorytmu PSO i obserwacja ich wpływu na otrzymywane wyniki. Dla każdej kombinacji parametrów sterujących obliczenia powtórzono trzy razy. W sumie przebadano 56 kombinacji parametrów, a więc wykonano 168 prób obliczeniowych. Wartości tych parametrów oraz uzyskane wyniki zestawiono w Załączniku D w tabeli D.1. Najlepszymi znalezionymi rozwiązaniami zadań optymalizacji jednokryterialnej są: $C_1^o = 213$, $C_2^o = 22$ oraz $C_3^o = 875$. Z kolei najlepszym rozwiązaniem kompromisowym uwzględniającym wszystkie kryteria oceny (z wagami równymi $w_1 = w_2 = w_3 = 0,333$) jest $z_{\infty, \rho} = 0,39$. Warto jednak zwrócić uwagę, że rozwiązanie kompromisowe jest rozwiązaniem zależnym od otrzymanych suboptymalnych rozwiązań poszczególnych funkcji celu.

Analiza otrzymanych rezultatów wskazała, że dla rozwiązywanego przykładu optymalnymi parametrami sterującymi algorytmem PSO są: $\tilde{m} = 20$, $\tilde{s} = 1$, $\tilde{K} = 2000$, $\tilde{R} = 20$, $\tilde{R}^t = 0,001$, $\tilde{c}_1^x = 2$, $\tilde{c}_2^x = 2$, $\tilde{c}_1^w = 1,8$, $\tilde{c}_2^w = 2,2$, $\tilde{c}_1^c = 2$, $\tilde{c}_2^c = 2$, $\tilde{\omega}^{\max} = 0,9$, $\tilde{\omega}^{\min} = 0,6$, $\tilde{V}_x^{\max} = 1,3$, $\tilde{V}_w^{\max} = 1$, $\tilde{V}_c^{\max} = 1,7$, a najlepszym sposobem określania położenia cząstek w zerowej iteracji. Zwiększenie bądź zmniejszenie któregokolwiek z parametrów sterujących, przy jednoczesnym braku zmiany pozostałych parametrów, powoduje pogorszenie otrzymywanych wyników. Podane wyżej wartości parametrów sterujących algorytmem PSO w opracowanym systemie mogą być rekomendowane jako zestaw parametrów wstępnych do harmonizacji wykonania procesów także innych przedsięwzięć budowlanych.

Na podstawie przeglądu otrzymanych rezultatów można zauważyć, że wszystkie zmiany parametrów sterujących generowały spodziewane i zgodne z badaniami literaturowymi wyniki. Daje to podstawę do wysunięcia stwierdzenia, że opracowany system działa poprawnie dla znanych z literatury zakresów zmienności parametrów sterujących algorytmem PSO.

Przeprowadzone badania weryfikacyjne rezultatów otrzymywanych za pomocą opracowanego systemu pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- jakość uzyskiwanych wyników należy ocenić bardzo dobrze; odchylenie standardowe dla jednokryterialnych problemów w najgorszym przypadku nie przekracza 1,5% wartości najlepszego znalezionego rozwiązania,
- jest bardzo duże prawdopodobieństwo, że najlepsze znalezione rozwiązania znalezione przez opracowany system komputerowy są rozwiązaniami globalnymi, bowiem nie zauważono zbieżności algorytmu w optimach lokalnych,

- poprawność działania opracowanego systemu została potwierdzona w czterech przeprowadzonych testach kontrolnych,
- czas obliczeń problemów zbliżonych wielkością do rzeczywiście występujących w praktyce problemów wynosi kilkanaście lub kilkadziesiąt sekund, co jest wartością akceptowalną.

6. Przykład wykorzystania opracowanej metody harmonizacji procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego

Zastosowanie opracowanej metody harmonizacji wykonania procesów wieloobiektowego przedsięwzięcia budowlanego przedstawiono na przykładzie budowy drugiego etapu osiedla „Elizówka Park” zlokalizowanego w Elizówce w gminie Niemce. Rozpatrywane osiedle składa się z sześciu obiektów budowlanych, zawierających w sumie siedemnaście lokali mieszkalnych wraz z garażami, stanowiących odrębne działki robocze. Zestawienie poszczególnych obiektów budowlanych wraz z ich podziałem oraz podstawowymi parametrami technicznymi zamieszczono w Tabeli 6.1. Wizualizacja przedsięwzięcia budowlanego znajduje się na rysunku 6.1.

Technologia wykonania wszystkich obiektów budowlanych jest jednakowa. Stropy są zaprojektowane jako monolityczne o grubości 18 cm, a ściany nośne mają być murowane na zaprawie cienkowarstwowej z gazobetonu klasy 500 i grubości 24 cm. Ścianki działowe mają być murowane na spoinie cienkowarstwowej z bloczków z betonu komórkowego grubości 8 cm i 12 cm. Więźba dachowa jest zaprojektowana jako drewniana krokwiowo-jętkowa na deskowaniu ażurowym, pokryta blachą panelową na rąbek stojący BRATEX Snap Lock. Elewacja ma być wykonana w systemie ociepleń ETICS ze styropianem grubości 15 cm i tynkiem silikonowym firmy Termo Organika. Zamontowane okna mają być sześciokomorowe, trzyszybowe i wykonane z PVC, natomiast okna kolankowe mają być montowane do dachów bezokapowych firmy VELUX. Montowane drzwi będą stalowe grubości 72mm, a bramy garażowe będą dostarczone przez firmę Wiśniowski.



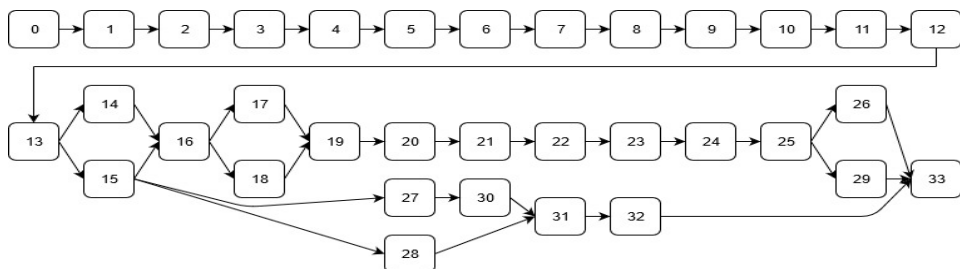
Rysunek 6.1. Wizualizacja rozpatrywanego osiedla

Zakres przedsięwzięcia został podzielony na 32 procesy budowlane, z czego pięć z nich jest przerwami technologicznymi. Dodano także dwa procesy nierzeczywiste reprezentujące rozpoczęcie oraz zakończenie przedsięwzięcia.

Graf został sporządzony techniką jednopunktową (ang. *activity-on-node*) obrazującą zakres przedsięwzięcia oraz relacje kolejnościowe między procesami przedstawiono na rysunku 6.2.

Tabela 6.1. Podział przedsięwzięcia na obiekty i działki robocze wraz z ich parametrami powierzchniowymi

L.p.	Nr obiektu	Nr działki roboczej	Oznaczenie działki rob.	Pow. całkowita [m ²]	Pow. działki [m ²]	Udział procentowy [%]	
1	1	1	K6.1	188,38	713	7,10	
2	1	2	K6.2	116,72	348	4,40	16,9
3	1	3	K6.3	143,55	563	5,41	
4	2	1	K7.1	192,19	566	7,24	14,5
5	2	2	K7.2	192,19	545	7,24	
6	3	1	K8.1	188,38	512	7,10	14,2
7	3	2	K8.2	188,38	469	7,10	
8	4	1	K9.1	173,48	386	6,54	
9	4	2	K9.2	152,75	286	5,76	24,6
10	4	3	K9.3	152,75	254	5,76	
11	4	4	K9.4	173,48	359	6,54	
12	5	1	K11.1	148,64	525	5,60	
13	5	2	K11.2	123,41	352	4,65	
14	5	3	K11.3	123,41	336	4,65	29,8
15	5	4	K11.4	123,41	320	4,65	
16	5	5	K11.5	123,41	315	4,65	
17	5	6	K11.6	148,64	471	5,60	
Suma				2653,17	7320	100	100



Rysunek 6.2. Graf rozpatrywanego przedsięwzięcia

Inwestor realizuje budowę finansując ją z własnych środków. Zatrudnia on własnych inżynierów odpowiedzialnych za planowanie i realizację budowy. Inwestor dysponuje także czterema brygadami własnymi, z których każda składa się z czterech pracowników. Siły własne inwestora są niewystarczające do realizacji całej budowy, zwłaszcza w zakresie robót specjalistycznych. Z tego względu przewidziano zatrudnienie 10 brygad podwykonawców do wykonania specjalistycznych procesów przedsięwzięcia. W celu modelowania wykonawców przerw technologicznych i procesów nierzeczywistych wprowadzono także jedną sztuczną brygadę oznaczoną numerem „0”. Przyporządkowanie brygad mogących realizować poszczególne procesy budowlane rozpatrywanego przedsięwzięcia podsumowano w tabeli 6.2.

Tabela 6.2. Wyszczególnienie procesów przedsięwzięcia wraz z przyporządkowaniem brygad mogących je realizować

L.p.	Nazwa procesu	Brygady
0	Rozpoczęcie budowy	0
1	Roboty ziemne	5
2	Roboty fundamentowe	1, 2, 3, 4
3	Przerwa technologiczna	0
4	Wykonanie ścian przyziemia	1, 2, 3, 4
5	Wykonanie ścian kondygnacji nadziemnej	1, 2, 3, 4
6	Wykonanie stropu i klatki schodowej	1, 2, 3, 4
7	Przerwa technologiczna	0
8	Wykonanie ścian I piętra	1, 2, 3, 4
9	Wykonanie drugiego stopu	1, 2, 3, 4
10	Przerwa technologiczna	0
11	Wykonanie ścian II piętra	1, 2, 3, 4
12	Wykonanie więźby dachowej	1, 2, 3, 4
13	Wykonanie poszycia dachu	1, 2, 3, 4
14	Wykonanie ścian działowych	1, 2, 3, 4
15	Montaż stolarki okiennej i drzwiowej oraz bram garażowych	6
16	Wykonanie instalacji wodnej i kanalizacyjnej	7
17	Wykonanie instalacji C.O.	8
18	Wykonanie instalacji elektrycznej	9
19	Wykonanie tynków ścian i sufitów	10
20	Wykonanie podkładów podłogi na gruncie I etap	1, 2, 3, 4
21	Przerwa technologiczna	0
22	Wykonanie podkładów podłogi na I piętrze	11
23	Wykonanie podkładów podłogi na II piętrze	11
24	Wykonanie podkładów podłogi na gruncie II etap	11
25	Przerwa technologiczna	0
26	Wykonanie instalacji gazowej	12

c. d. Tabeli 6.2. Wyszczególnienie procesów przedsięwzięcia wraz z porządkowaniem brygad mogących je realizować

L.p.	Nazwa procesu	Brygady
27	Wykonanie instalacji zewnętrznych w pasie drogowym	13
28	Wykonanie robót elewacyjnych	14
29	Wykonanie zabudowy poddaszy	1, 2, 3, 4
30	Wykonanie dróg dojazdowych i chodników	13
31	Roboty brukarskie przy budynkach	13
32	Ogrodzenie, wykonanie elementów małej architektury, niwelacja terenu wraz zagospodarowaniem	1, 2, 3, 4
33	Zakończenie budowy	0

Przewidywane czasy wykonania procesów dla brygad własnych inwestora przez poszczególne brygady zostały oszacowane przez kierownika budowy i robót budowlanych. Dla brygad własnych inwestora oszacowania czasu realizacji poszczególnych procesów dokonano na podstawie przedmiaru robót, katalogów nakładów rzeczowych oraz doświadczenia zdobytego z wykonywania innych przedsięwzięć budowlanych o podobnym zakresie robót. Dla brygad podwykonawców szacunkowy czas realizacji procesów określono na podstawie ich ofert. Zestawienie czasów wykonania poszczególnych procesów budowlanych zamieszczono w tabeli 6.3. Czasy wykonania procesów, wyrażone w dniach roboczych, które mogą być realizowane przez kilka brygad są podane w kolejności numeracji tych brygad, tj. w pierwszym jest podany czas wykonania procesu przez brygadę o niższym numerze, a później przez brygadę o wyższym numerze porządkowym.

Tabela 6.3. Czasy wykonania procesów przez poszczególne brygady wyrażone w dniach roboczych

Działka (bryg.)	K6.1	K6.2	K6.3	K7.1	K7.2	K8.1	K8.2	K9.1	K9.2
0 (0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 (5)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	4, 4,	2, 2,	3, 3,	4, 4,	4, 4,	4, 4,	4, 4,	3, 3,	3, 3,
(1,2,3,4)	3, 4	2, 2	3, 3	4, 4	4, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 3
3 (0)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	7, 7,	4, 4,	6, 6,	7, 7,	7, 7,	7, 7,	7, 7,	7, 7,	6, 6,
(1,2,3,4)	7, 8	4, 5	5, 6	7, 8	7, 8	7, 8	7, 8	6, 7	6, 6
5	7, 7,	5, 5,	6, 6,	8, 8,	8, 8,	7, 7,	7, 7,	7, 7,	6, 6,
(1,2,3,4)	7, 8	4, 5	5, 6	7, 8	7, 8	7, 8	7, 8	7, 7	6, 6

c. d. Tabeli 6.3. Czasy wykonania procesów przez poszczególne brygady wyrażone w dniach roboczych

Działka (bryg.)	K6.1	K 6.2	K6.3	K7.1	K7.2	K8.1	K8.2	K9.1	K9.2
6 (1,2,3,4)	9, 9, 10, 10	6, 6, 6, 6	7, 7, 7, 7	9, 9, 10, 10	9, 9, 10, 10	9, 9, 10, 10	9, 9, 10, 10	8, 8, 9, 9	7, 7, 8, 8
7 (0)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
8 (1,2,3,4)	4, 4, 4, 5	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	4, 4, 4, 5	4, 4, 4, 5	4, 4, 4, 5	4, 4, 4, 5	7, 7, 7, 7	6, 6, 6, 6
9 (1,2,3,4)	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	8, 8, 9, 9	7, 7, 8, 8
10 (0)	0	0	0	0	0	0	0	10	10
11 (1,2,3,4)	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	4, 4, 4, 4	3, 3, 3, 4
12 (1,2,3,4)	3, 3, 3, 3	2, 2, 2, 2	2, 2, 3, 2	3, 3, 4, 3	3, 3, 4, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 2
13 (1,2,3,4)	4, 4, 4, 4	2, 2, 3, 2	3, 3, 3, 3	4, 4, 4, 4	4, 4, 4, 4	4, 4, 4, 4	4, 4, 4, 4	4, 4, 4, 3	3, 3, 4, 3
14 (1,2,3,4)	5, 5, 5, 5	3, 3, 3, 3	4, 4, 3, 4	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	4, 4, 4, 5	4, 4, 4, 4
15 (6)	2	1	2	2	2	2	2	2	2
16 (7)	5	3	4	5	5	5	5	4	4
17 (8)	6	4	5	6	6	6	6	6	5
18 (9)	5	3	4	5	5	5	5	4	4
19 (10)	7	4	6	7	7	7	7	7	6
20 (1,2,3,4)	5, 5, 5, 5	3, 3, 3, 3	4, 4, 4, 4	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	4, 4, 4, 5	4, 4, 4, 4
21 (0)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
22 (11)	5	3	4	5	5	5	5	4	4
23 (11)	0	0	0	0	0	0	0	4	4
24 (11)	5	3	4	5	5	5	5	4	4
25 (0)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
26 (12)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27 (13)	6	4	5	6	6	6	6	6	5
28 (14)	13	8	10	14	14	13	13	12	11
29 (1,2,3,4)	5, 5, 5, 5	3, 3, 3, 3	4, 4, 4, 4	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	4, 4, 4, 4	4, 4, 4, 4
30 (13)	5	3	4	5	5	5	5	4	4
31 (13)	7	4	6	7	7	7	7	7	6
32 (1,2,3,4)	8, 8, 8, 8	5, 5, 5, 5	6, 6, 6, 6	9, 9, 9, 9	9, 9, 9, 9	8, 8, 8, 8	8, 8, 8, 8	8, 8, 8, 8	7, 7, 7, 7
33 (0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0

c. d. Tabeli 6.3. Czasy wykonania procesów przez poszczególne brygady wyrażone w dniach roboczych

Działka (bryg.)	K9.3	K 9.4	K 11.1	K 11.2	K 11.3	K 11.4	K 11.5	K 11.6
0 (0)	0	0	0	0	0	0	0	0
1 (5)	1	1	1	1	1	1	1	1
2	3, 3, (1,2,3,4)	3, 3, 3, 4	3, 3, 3, 3	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	3, 3, 3, 3
3 (0)	5	5	5	5	5	5	5	5
4	6, 6, (1,2,3,4)	7, 7, 6, 7	6, 6, 5, 6	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	6, 6, 5, 6
5	6, 6, (1,2,3,4)	7, 7, 7, 7	6, 6, 6, 6	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	5, 5, 5, 5	6, 6, 6, 6
6	7, 7, (1,2,3,4)	8, 8, 9, 9	7, 7, 8, 8	6, 6, 6, 6	6, 6, 6, 6	6, 6, 6, 6	6, 6, 6, 6	7, 7, 8, 8
7 (0)	10	10	10	10	10	10	10	10
8	6, 6, (1,2,3,4)	7, 7, 7, 7	3, 3, 3, 4	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 4
9	7, 7, (1,2,3,4)	8, 8, 9, 9	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0
10 (0)	10	10	0	0	0	0	0	0
11	3, 3, (1,2,3,4)	4, 4, 4, 4	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0
12	3, 3, (1,2,3,4)	3, 3, 3, 2	2, 2, 3, 2	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	2, 2, 3, 2
13	3, 3, (1,2,3,4)	4, 4, 4, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 2	3, 3, 3, 2	3, 3, 3, 2	3, 3, 3, 2	3, 3, 3, 3
14	4, 4, (1,2,3,4)	4, 4, 4, 5	4, 4, 4, 4	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	4, 4, 4, 4
15 (6)	2	2	2	2	2	2	2	2
16 (7)	4	4	4	3	3	3	3	4
17 (8)	5	6	5	4	4	4	4	5
18 (9)	4	4	4	3	3	3	3	4
19 (10)	6	7	6	5	5	5	5	6
20	4, 4, (1,2,3,4)	4, 4, 4, 5	4, 4, 4, 4	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	4, 4, 4, 4
21 (0)	5	5	5	5	5	5	5	5
22 (11)	4	4	4	3	3	3	3	4
23 (11)	4	4	0	0	0	0	0	0
24 (11)	4	4	4	3	3	3	3	4
25 (0)	5	5	5	5	5	5	5	5

c. d. Tabeli 6.3. Czasy wykonania procesów przez poszczególne brygady wyrażone w dniach roboczych

Działka (bryg.)	K9.3	K 9.4	K 11.1	K 11.2	K 11.3	K 11.4	K 11.5	K 11.6
26 (12)	1	1	1	1	1	1	1	1
27 (13)	5	6	5	4	4	4	4	5
28 (14)	11	12	10	9	9	9	9	10
29	4, 4, (1,2,3,4)	4, 4, 4, 4	4, 4, 4, 4	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	4, 4, 4, 4
30 (13)	4	4	4	3	3	3	3	4
31 (13)	6	7	6	5	5	5	5	6
32	7, 7, (1,2,3,4)	8, 8, 8, 8	7, 7, 7, 7	6, 6, 6, 6	6, 6, 6, 6	6, 6, 6, 6	6, 6, 6, 6	7, 7, 7, 7
33 (0)	0	0	0	0	0	0	0	0

Data rozpoczęcia robót budowlanych był 3 czerwca 2019 roku, a planowaną datą zakończenia przedsięwzięcia budowlanego jest 30 września 2021 roku. Z tego wynika, że drugi etap przedsięwzięcia „Elizówka Park” powinien zostać zrealizowany w czasie 780 dni roboczych.

Kierownik budowy II etapu „Elizówka Park” zdecydował, że potrafi określić swoje preferencje i wybrał I metodę ustalania wag kryteriów oceny. Istotność znaczenia poszczególnych kryteriów harmonizacji przedsięwzięcia budowlanego określił jako równe: $w_1 = 0,356$, $w_2 = 0,349$, $w_3 = 0,295$.

W oparciu o dane przekazane przez kierownictwo budowy stworzono plik wejściowy dla rozpatrywanego przykładowego przedsięwzięcia. Parametry sterujące algorytmem PSO zostały empirycznie ustalone jako równe:

```
#PARTICLE_COUNT 20
#NEIGHTBOUR_SIZE 1
#ITERATION_COUNT 5000
#END 1500
#R 20
#RT 0.0001
#C1X 2
#C2X 2
#C1W 1.8
#C2W 2.2
#C1C 2
#C2C 2
#INERTION_MAX 0.9
#INERTION_MIN 0.6
#V_MAX_X 1.3
```

```
#V_MAX_W 1
#V_MAX_C 1.7
#SMALL_NUMBER 0.001
#NO_OUTPUT_ALL
#RANDOM_ON_START
```

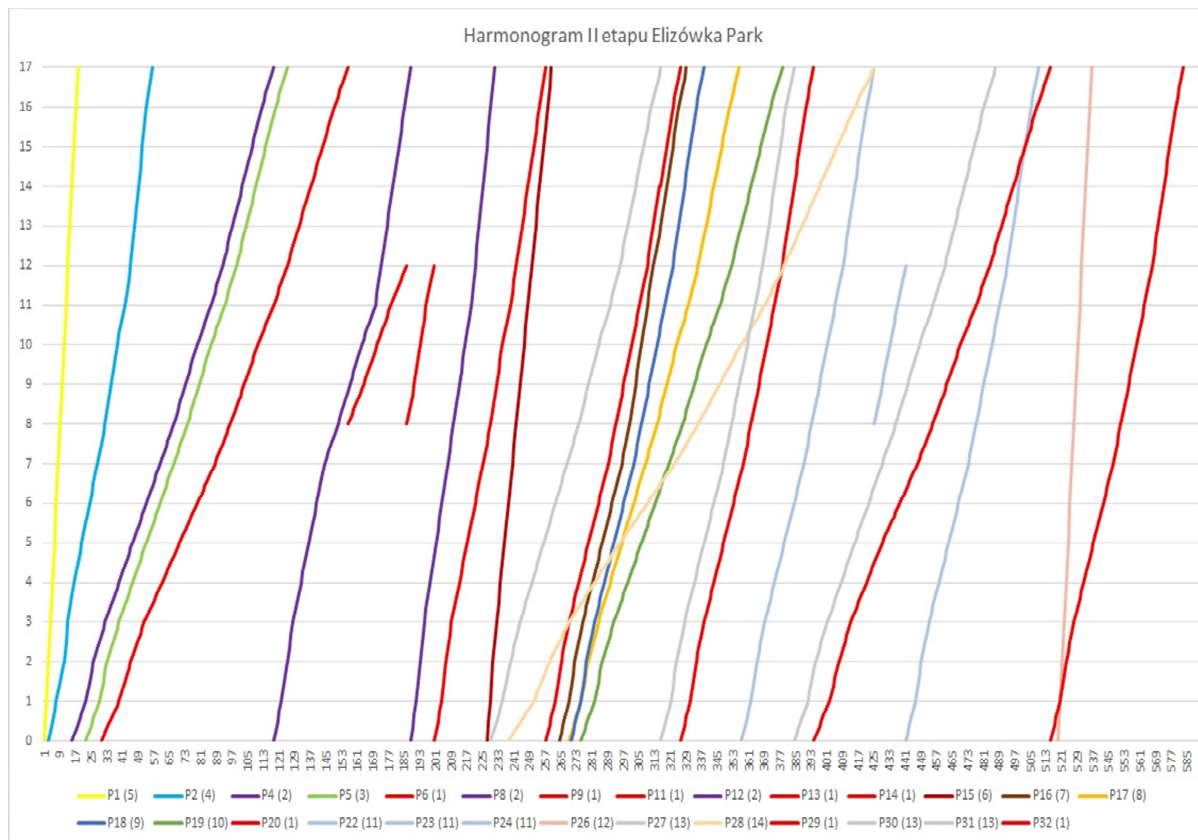
Dla wyżej podanych danych i parametrów dokonano obliczeń na komputerze o procesorze Inter® Core™ i5-4590T CPU 2.0 GHz. Czas obliczeń suboptymalnej wartości $z_{\infty,\rho}$ wyniósł 96,2 sekundy, natomiast obliczenia wszystkich funkcji celu C_1^o , C_2^o , C_3^o i $z_{\infty,\rho}$ łącznie trwały 7 minut i 1,6 sekundy.

Wartość funkcji C_1^o wyniosła 385 dni roboczych, co oznacza, że realizacja przedsięwzięcia zakończyłaby się 10 listopada 2020 roku, a pierwotny czas wykonania całego przykładowego przedsięwzięcia można skrócić o 50,6%. Z kolei wartość C_2^o wyniosła 0 dni, czyli II etap „Elizówka Park” może zostać zrealizowany bez przerw w pracy zatrudnionych brygad. Minimalny ważony sumaryczny czas realizacji obiektów budowlanych wyniósł $C_3^o = 224,77$ dni.

Optymalne uzyskane rozwiązanie zgodne co do istotności kryteriów z preferencjami kierownika budowy miało czas wykonania równy $C_1 = 582$ dni. Czas realizacji przedsięwzięcia otrzymany za pomocą opracowanego systemu jest o 25,4% krótszy od harmonogramu skierowanego do realizacji. Sumaryczny czas przerw w pracy brygad wyniósł 1 dzień. Z kolei sumaryczny ważony czas realizacji obiektów budowlanych wyniósł $C_3 = 583,65$. Maksymalne ważone odchylenie od suboptymalnej wartości funkcji celu wyniosło $z_{\infty,\rho} = 45,4\%$.

W otrzymanym rozwiązaniu kolejność realizacji obiektów budowlanych jest następująca 1–3–2–4–5. Brygada nr 1 została zatrudniona do realizacji ośmiu różnych procesów budowlanych, brygada nr 2 do trzech, a brygady nr 3 i 4 realizują po jednym procesie budowlanym. Jedyny dzień przerwy w pracy brygad występuje w trakcie wykonywania procesu nr 14 przez brygadę nr 1 pomiędzy realizacją jego na działkach K11.3 i K11.4. Terminy rozpoczęcia wykonywania poszczególnych procesów na działkach roboczych wraz z przydzieloną brygadą realizującą dany proces zestawiono w tabeli 6.4. Z kolei cyklogram (harmonogram w układzie współrzędnych czas – miejsce realizacji) znajduje się na rysunku 6.3.

Obliczenia za pomocą opracowanego systemu przeprowadzono także przy identyfikacji ważności kryteriów metodą AHP. Kierownik budowy oraz inżynier budowy zostali poproszeni o dokonanie porównań parami poszczególnych kryteriów używając klasycznej skali Saaty’ego. Ich oceny zostały przedstawione w tabeli 6.5.



Rysunek 6.3. Cyklogram otrzymanego suboptymalnego rozwiązania

Tabela 6.4. Terminy rozpoczęcia się poszczególnych procesów na poszczególnych działkach roboczych (liczone od terminu 0 – początku pierwszego dnia realizacji)

Proc.	Bryg.	K6.1	K6.2	K6.3	K7.1	K7.2	K8.1	K8.2	K9.1	K9.2
1	5	0	1	2	5	6	3	4	7	8
2	4	2	6	8	19	23	11	15	27	31
4	2	14	21	25	45	52	31	38	59	66
5	3	21	28	32	52	59	38	45	66	73
6	1	29	38	44	69	78	51	60	87	95
8	2	117	121	124	135	139	127	131	143	150
9	1	155	155	155	155	155	155	155	155	163
11	1	185	185	185	185	185	185	185	185	189
12	2	187	190	192	200	203	194	197	206	209
13	1	199	203	205	216	220	208	212	224	228
14	1	256	261	264	278	283	268	273	288	292
15	6	226	228	229	235	237	231	233	239	241
16	7	268	268	271	285	290	275	280	295	299
17	8	296	274	278	295	301	283	289	307	313
18	9	269	274	277	291	296	281	286	301	305
19	10	274	281	285	305	312	291	298	319	326
20	1	325	330	333	347	352	337	342	357	361
22	11	356	361	364	378	383	368	373	388	392
23	11	424	424	424	424	424	424	424	424	428
24	11	440	445	448	462	467	452	457	472	476
26	12	518	519	520	523	524	521	522	525	526
27	13	228	234	238	255	261	243	249	267	273
28	14	237	250	258	294	308	268	281	322	334
29	1	514	519	522	536	541	526	531	546	550
30	13	315	320	323	337	342	327	332	347	351
31	13	383	390	394	414	421	400	407	428	435
32	1	393	401	406	428	437	412	420	446	454
		K	K	K	K	K	K	K	K	
		9.3	9.4	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	
1	5	9	10	11	12	13	14	15	16	
2	4	34	37	41	44	46	48	50	52	
4	2	72	78	85	91	96	101	106	111	
5	3	79	85	92	98	103	108	113	118	
6	1	102	109	117	124	130	136	142	148	
8	2	156	162	169	172	175	178	181	184	
9	1	170	177	185	185	185	185	185	187	
11	1	192	195	199	199	199	199	199	199	
12	2	212	215	218	220	222	224	226	228	
13	1	231	234	238	241	244	247	250	253	
14	1	296	300	304	308	311	315	318	321	

c. d. Tabeli 6.4. Terminy rozpoczęcia się poszczególnych procesów na poszczególnych działkach roboczych (liczone od terminu 0 – początku pierwszego dnia realizacji)

Proc.	Bryg.	K 9.3	K 9.4	K 11.1	K 11.2	K 11.3	K 11.4	K 11.5	K 11.6
15	6	243	245	247	249	251	253	255	257
16	7	303	307	311	315	318	321	324	327
17	8	318	323	329	334	338	342	346	350
18	9	309	313	317	321	324	327	330	333
19	10	332	338	345	351	356	361	366	371
20	1	365	369	373	377	380	383	386	389
22	11	396	400	404	408	411	414	417	420
23	11	432	436	440	440	440	440	440	440
24	11	480	484	488	492	495	498	501	504
26	12	527	528	529	530	531	532	533	534
27	13	278	283	289	294	298	302	306	310
28	14	345	356	368	378	387	396	405	414
29	1	554	558	562	566	569	572	575	578
30	13	355	359	363	367	370	373	376	379
31	13	441	447	454	460	465	470	475	480
32	1	461	468	476	483	489	495	501	507

Tabela 6.5. Porównanie parami kryteriów oceny dokonane przez kierownictwo budowy

	Kierownik budowy			Inżynier budowy		
	Kryt. I	Kryt. II	Kryt. III	Kryt. I	Kryt. II	Kryt. III
Kryterium I	1	3	5	1	1	3
Kryterium II	1/3	1	3	1	1	3
Kryterium III	1/5	1/3	1	1/3	1/3	1

Dane problemu oraz ustawienia parametrów sterujących algorytmem PSO były takie same jak przy rozwiązywaniu problemu z wykorzystaniem I sposobu ustalania wag kryteriów. Czas obliczeń suboptymalnej wartości $z_{\infty, \rho}$ wyniósł 96,7 sekundy, natomiast obliczenia wszystkich funkcji celu C_1^o , C_2^o , C_3^o i $z_{\infty, \rho}$ łącznie trwały 6 minut i 56,7 sekund.

Dla tak zwerbalizowanych preferencji dotyczących istotności kryteriów oceny wartość pierwszej funkcji celu (czas realizacji całego przedsięwzięcia budowlanego) w znalezionym rozwiązaniu wyniosła $C_1 = 578$ dni. Sumaryczny czas przerw w pracy brygad wyniósł 1 dzień. Z kolei ważony łączny czas realizacji wszystkich obiektów budowlanych wyniósł $C_3 = 580,1$ dni. W otrzymanym rozwiązaniu kolejność realizacji obiektów budowlanych jest następująca 1–4–5–3–2. Cyklogram przedstawiający znalezione suboptymalne rozwiązanie wraz

z terminami rozpoczęcia realizacji poszczególnych procesów na poszczególnych działkach i brygadami je realizującymi znajduje się na rysunku 6.4.

Harmonizacja wykonania procesów przedsięwzięcia II etap „Elizówka Park” została także przeprowadzona za pomocą III sposobu wyznaczania wag kryteriów oceny, a więc użyto modułu metody interaktywnej. W tym celu poproszono kierownika budowy o sprecyzowanie progów: nierozróżnialności \hat{q} , preferencji \hat{p} oraz weta \hat{v} dla trzech kryteriów. Jego wskazania podsumowano w Tabeli 6.6.

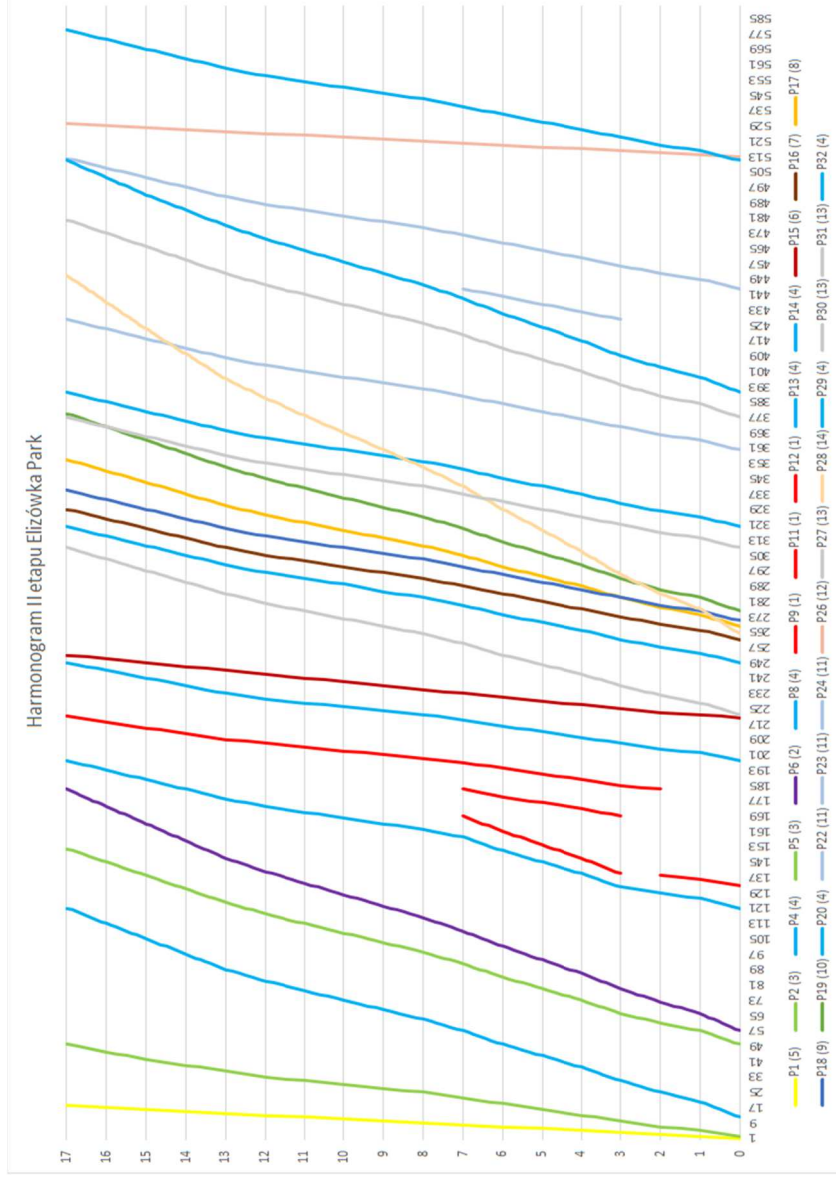
Tabela 6.6. Progi nierozróżnialności, preferencji i weta dla kryteriów oceny wskazane przez decydenta

Kryterium	Kryterium I	Kryterium II	Kryterium III
Próg nierozróżnialności \hat{q}	3	1	5
Próg preferencji \hat{p}	5	3	10
Próg weta \hat{v}	30	30	50

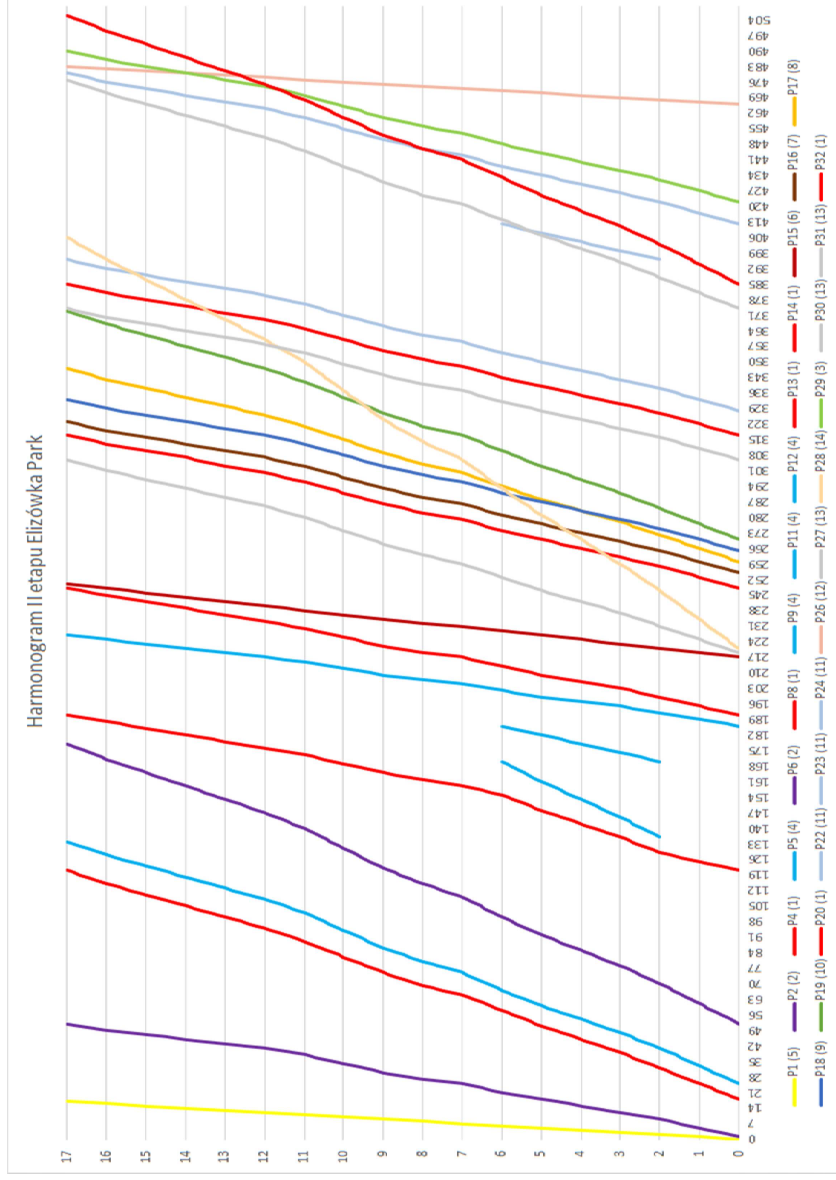
Po obliczeniu przez program punktu centralnego oraz trzech punktów sąsiedztwa decydent (kierownik budowy) wskazał pierwszy z punktów sąsiedztwa \hat{z}_1 jako nowy punkt centralny. Program ponownie wyliczył nowe punkty sąsiedztwa. Następnie decydent zmienił punkt referencyjny \hat{z}^o w następujący sposób: pozostawił wartości C_1^o i C_3^o na niezmiennym poziomie oraz przyjął, że $C_2^o = 5$. Kolejne znalezione przez opracowany program rozwiązanie odpowiadające punktowi centralnemu decydent uznał za satysfakcjonujące.

Wartość pierwszej funkcji celu (czas wykonania całego przedsięwzięcia) dla znalezionego rozwiązania harmonizacji wykonania procesów rozpatrywanego przedsięwzięcia wyniosła 506 dni. Czas realizacji przedsięwzięcia otrzymany za pomocą opracowanego systemu jest o 35,1% krótszy od harmonogramu skierowanego do realizacji. Liczba dni przerw w pracy brygad wyniosła $C_2^o = 5$ dni i była równa przyjętej przez decydenta wartości punktu referencyjnego. Sumaryczny ważony czas realizacji wszystkich obiektów budowlanych wyniósł $C_3^o = 488,6$. W otrzymanym rozwiązaniu kolejność realizacji obiektów budowlanych jest następująca 2–4–1–3–5. Cyklogram dla znalezionego suboptymalnego rozwiązania wraz z terminami rozpoczęcia realizacji poszczególnych procesów na poszczególnych działkach i brygadami je realizującymi znajduje się na rysunku 6.5.

Zastosowanie opracowanej metody do harmonizacji wykonania procesów przedsięwzięcia II etap „Elizówka Park” umożliwiło opracowanie projektu organizacji zgodnego z preferencjami kierownika budowy. Zdaniem autora dotyczy to szczególnie III sposobu, w którym preferencje decydent wyraża *a posteriori*, dokonując oceny uzyskiwanych rozwiązań w kolejnych iteracjach.



Rysunek 6.4. Cyklogram dla rozwiązania suboptymalnego przy zastosowaniu metody nr II określania wag kryteriów



Rysunek 6.5. Cyklogram wykonania rozpatrywanego przedsięwzięcia dla wag kryteriów ustalonych za pomocą metody III

Ponadto czas wykonania całego przedsięwzięcia w rozwiązaniach uzyskanych za pomocą opracowanej metody jest mniejszy od około 25 % do 35 % niż czas planowany w rzeczywistości. Pomimo tak znacznego skrócenia czasu wykonania budowy brygady robocze pracują w sposób zharmonizowany – kolejno realizują procesy na poszczególnych działkach roboczych w sposób ciągły i równomierny. Można stwierdzić, że zastosowanie opracowanej metody harmonizacji wykonania procesów przedsięwzięcia budowlanego może przyczynić się do redukcji czasu realizacji budowy oraz polepszyć organizację pracy brygad roboczych.

7. Podsumowanie i wnioski

Podejmowanie decyzji w zakresie harmonizacji wykonania procesów w przedsięwzięciach budowlanych, zwłaszcza wieloobektowych, jest zadaniem skomplikowanym, zależnym od wielu zmiennych i ograniczeń. Istniejące narzędzia wspierające ten proces są nieadekwatne do złożoności rozważanego problemu i rezultaty otrzymane za ich pomocą nie odzwierciedlają preferencji osób zarządzających budowami.

W niniejszej publikacji osiągnięto cel sformułowany w rozdziale drugim – opracowano metodę harmonizacji wykonania procesów wieloobektowego przedsięwzięcia budowlanego w warunkach deterministycznych, umożliwiającą redukcję cyklu budowy i przerw w pracy.

Wyniki osiągnięte w pracy są następujące:

1. Dokonano systematyki podejść stosowanych przy harmonogramowaniu powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych oraz algorytmów wykorzystywanych do rozwiązywania problemów praktycznych. Analiza algorytmów wykorzystywanych do rozwiązywania modeli problemów organizacji wykonania robót budowlanych pozwoliła na dobór odpowiednich narzędzi oraz na opracowanie podejścia do rozwiązania rozpatrywanego problemu.
2. Przeprowadzono badania ankietowe dotyczące problemu realizacji przedsięwzięć budowlanych oraz istotności kryteriów uwzględnianych podczas oceny harmonogramów. Doprowadziły one do identyfikacji najbardziej istotnych kryteriów oceny harmonogramów budowlanych oraz umożliwiły sprecyzowanie oczekiwań i wymagań zarządzających budowami w stosunku do systemu wspomagającego projektowanie organizacji robót budowlanych.
3. Dokonano identyfikacji modelu problemu harmonizacji wykonania procesów przedsięwzięcia budowlanego oraz jego formalizacji matematycznej. Nowatorskie ujęcie zagadnienia uniemożliwia generowanie rozwiązań niedopuszczalnych, a jednocześnie nie pomija rozwiązań, które mogą być użyteczne. Zaproponowany w pracy sposób matematycznego ujęcia problemu znacząco skraca czas obliczeń oraz ułatwia jego rozwiązanie.
4. Zaimplementowano autorską metodę grupowego wspomaganie decyzji wykorzystywaną w procesie ustalania istotności kryteriów oceny harmonogramów budowlanych. Jest ona rozwinięciem rozmytej metody AHP w ujęciu Mikhailova. Zakłada ona agregację ocen decydentów za pomocą zbiorów rozmytych typu 2, dzięki czemu jest możliwe uwzględnienie nieprecyzyjności ocen decydentów.
5. Dla sporządzonego modelu zaadaptowano algorytm optymalizacji rojem cząstek do poszukiwania rozwiązań niezdominowanych zagadnienia (dokładnych lub przybliżonych).

6. Algorytm został oprogramowany, a stworzony system komputerowy może wspomagać kierujących w doborze wykonawców procesów powtarzalnych i harmonizacji ich pracy.
7. Model zagadnienia oraz uzyskiwane za pomocą systemu komputerowego rozwiązania poddano badaniom weryfikacyjnym. Polegały one na wykonaniu testów: konfrontacji danych, warunków brzegowych, stabilności otrzymanego rozwiązania, analizy wrażliwości i efektywności czasowej uzyskanego rozwiązania. Opracowany system komputerowy pozytywnie przeszedł wszystkie przeprowadzone testy kontrolne.
8. Opracowany system zastosowano do harmonizacji wykonania procesów drugiego etapu Elizówka Park. Redukcja czasu wykonania przedsięwzięcia, dla preferowanego rozwiązania przez kierownika budowy, otrzymana za pomocą opracowanego systemu, względem harmonogramu skierowanego w rzeczywistości do realizacji wyniosła od 25 % do 35 % (w zależności od sposobu wyboru wag kryteriów oceny).

Przeprowadzone badania prowadzą do następujących wniosków:

1. Opracowana metoda harmonizacji wykonania procesów budowlanego przedsięwzięcia wieloobiektowego może wspomagać decyzje zarządzających budową przy projektowaniu organizacji robót budowlanych.
2. Stosowanie optymalizacji wielokryterialnej do problemu wykonania procesów harmonizacji wieloobiektowych przedsięwzięć budowlanych umożliwia uwzględnienie preferencji kierownictwa budowy w zakresie istotności kryteriów optymalizacji.
3. Wykorzystanie opracowanej metody poprawia efektywność realizacji przedsięwzięcia (zgodnie z preferencjami decydenta).
4. Możliwość wyboru trzech różnych trybów ustalania preferencji decydenta w większym stopniu umożliwia stosowanie opracowanej metody w różnych sytuacjach decyzyjnych, przez to zwiększa jej zakres i możliwość implementacji praktycznej.
5. Opracowanie metody dla hierarchicznej struktury przedsięwzięcia budowlanego poszerza wachlarz potencjalnych przedsięwzięć, dla których dana metoda może zostać zaimplementowana.
6. Opracowana metoda uwzględnia wielozawodowość brygad występującą w praktyce i przez to zwiększa jej zakres zastosowań.

Pomimo złożoności opracowanej metody harmonizacji procesów wieloobiektowych przedsięwzięć budowlanych uzyskane w pracy rezultaty wskazują na zasadność jej rozbudowy. Możliwymi kierunkami dalszych badań nad podejmowanym w pracy zagadnieniem są:

1. uwzględnienie prawdopodobieństwa i wpływu czynników ryzyka w odniesieniu do warunków technicznych, technologicznych

- i organizacyjnych poprzez zmianę charakteru modelu na niedeterministyczny,
2. włączenie do modelu elementów i technik radzenia sobie ze skrajnie trudnymi warunkami realizacyjnymi budów, wymagających podejmowania działań pozwalających na redukcję czasu w przypadku opóźnień, z zastosowaniem takich narzędzi jak: przerywanie procesów drugorzędnych czy wprowadzenie do modelu relacji miękkich,
 3. opracowanie intuicyjnego i przyjaznego użytkownikowi interfejsu graficznego, który ułatwi korzystanie z opracowanego systemu komputerowego.

Bibliografia

- [1] M. Połoński, Ed., *Kierowanie budowlanym procesem inwestycyjnym*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW, 2018.
- [2] W. Kietliński, J. Janowska, and C. Woźniak, *Proces inwestycyjny w budownictwie*, I. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007.
- [3] K. Adamiecki, "Harmonizacja jako jedna z głównych podstaw organizacji naukowej," *Przegląd Tech.*, vol. 62, no. 53, pp. 594–595, 1924.
- [4] K. M. Jaworski, *Metodologia projektowania realizacji budowy*, Wydanie dr. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2009.
- [5] L. Rowiński, *Organizacja produkcji budowlanej*, Pierwsze. Warszawa: Arkady, 1982.
- [6] T. Łodygowski, *Zarządzanie przedsięwzięciem*. Warszawa, 2007.
- [7] M. Trocki, B. Grucza, and K. Ogonek, *Zarządzanie projektami*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2009.
- [8] T. Kasprówicz, *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2002.
- [9] A. Sajkiewicz, *Harmonizacja pracy. Czynniki społeczne, ekonomiczne i organizacyjne*, Pierwsze. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, 1986.
- [10] K. Adamiecki, "Metoda wykreślna organizacji pracy zbiorowej w walcowniach," *Przegląd Tech.*, vol. 17, 18, 19, 1909.
- [11] P. Żmigrodzki, Ed., *Wielki słownik języko polskiego*. Instytut Języka Polskiego Polskiej Akademii Nauk, 2020.
- [12] R. Marcinkowski and A. Krawczyńska-Piechna, *Projektowanie realizacji budowy*, I. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
- [13] I. Białynicki-Birula and I. Białynicka-Birula, *Modelowanie rzeczywistości. Od Gry w życie Conwaya przez żuka mandelbrota do maszyny Turinga*. Warszawa: Prószyński i S-ka, 2002.
- [14] T. Kotarbiński, *Elementy teorii poznania, logiki formalnej i metodologii nauk*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Naukowe, 1986.
- [15] A. Mazurkiewicz, "Sprawność działania - interpretacja teoretyczna pojęcia," *Nierówności Społeczne a Wzrost Gospod.*, vol. 20, no. z. nr 20, pp. 47–57, 2011.
- [16] R. Griffin, *Podstawy zarządzania organizacjami*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005.
- [17] T. Pszczołowski, *Mała encyklopedia prakseologii i teorii organizacji*. Wrocław - Warszawa - Kraków - Gdańsk: Ossolineum, 1978.
- [18] R. Caude and A. Moles, *Méthodologie, vers une science de l'action*. Paryż: Gauthier-Villars, 1964.

- [19] J. Zieleniewski, *Organizacja i zarządzanie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1960.
- [20] B. Gliński, Ed., *Mala encyklopedia ekonomiczna*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, 1974.
- [21] H. Fayol, “L’exposé des principes généraux d’administration,” 1908.
- [22] F. Sherratt and P. Farrell, *Introduction to construction management*, 1st ed. New York: Routledge, 2015.
- [23] W. A. Werner, *Zarządzanie w procesie inwestycyjnym*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008.
- [24] S. Wawak and K. Woźniak, “Funkcje zarządzania,” *Encyklopedia zarządzania*. 2019.
- [25] M. Podolski, “Analiza nowych zastosowań teorii szeregowania zadań w organizacji robót budowlanych,” Politechnika Wroclawska, 2008.
- [26] R. Marcinkowski, “Planowanie organizacji robót budowlanych na podstawie analizy nakładów pracy zasobów czynnych,” *Bud. i Archit.*, vol. 1, no. 12, pp. 39–46, 2013.
- [27] R. Marcinkowski, *Metody harmonogramowania przedsięwzięć inżynieryjno-budowlanych*. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 1995.
- [28] E. Radziszewska-Zielina and B. Sroka, “Priority Scheduling in the Planning of Multiple-Structure Construction Projects,” *Arch. Civ. Eng.*, vol. 63, no. 4, pp. 21–33, Dec. 2017.
- [29] M. Krzemiński, “KASS v.2.2. Scheduling Software for Construction with Optimization Criteria Description,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 130, no. 6, pp. 1439–1442, Dec. 2016.
- [30] P. Jaśkowski and S. Biruk, “The Method for Improving Stability of Construction Project Schedules through Buffer Allocation / Statybos Vykdyimo Grafiko Stabilumo užtikrinimas Paskirstant Laiko Rezervus,” *Technol. Econ. Dev. Econ.*, vol. 17, no. 3, pp. 429–444, Oct. 2011.
- [31] A. Dyżewski, *Doktryna pracy równomiernej w realizacji budowy*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Gospodarcze, 1949.
- [32] A. Więckowski, *Roboty Budowlane. Przerwy w równomiernej realizacji prac*, I. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
- [33] V. A. Afanasev and A. V. Afanasev, *Projektowanie organizacji stroitielstva. Designing of konstruktion works scheduling*. Leningrad: LISI, 1988.
- [34] J. Mrozowicz, *Methods of organizing consttuction activities taking into account time couplings*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, 1997.
- [35] Z. Hejducki and M. Rogalska, *Harmonogramowanie procesów budowlanych metodami sprzężeń czasowych*. Politechnika Lubelska, 2017.
- [36] D. Murguia and A. Urbina, “Complex Production Systems: Non-Linear and Non-Repetitive Projects,” 2018, pp. 858–868.

- [37] T. Hegazy, M. Abdel-Monem, and D. A. Saad, "Framework for enhanced progress tracking and control of linear projects," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 21, no. 1, pp. 94–110, Jan. 2014.
- [38] D.-H. Tran, D.-L. Luong, M.-T. Duong, T.-N. Le, and A.-D. Pham, "Opposition multiple objective symbiotic organisms search (OMOSOS) for time, cost, quality and work continuity tradeoff in repetitive projects," *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 160–172, Apr. 2018.
- [39] E. Palaneeswaran and M. M. Kumaraswamy, "Recent advances and proposed improvements in contractor prequalification methodologies," *Build. Environ.*, vol. 36, no. 1, pp. 73–87, Jan. 2001.
- [40] E. Plebankiewicz, "Contractor prequalification model using fuzzy sets," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 15, no. 4, pp. 377–385, Dec. 2009.
- [41] *Ustawa z dnia 23 kwietnia 1964 r. - Kodeks cywilny. Dz.U. 1964 Nr 16 poz. 93 U*, no. 16. Poland, 2019, p. 243.
- [42] *Ustawa z dnia 11 września 2019 r. - Prawo zamówień publicznych. Dz.U. 2019 poz. 2019*. Poland: Kancelaria Sejmu RP, 2019.
- [43] B. Słowiński, *Podstawy sprawnego działania*, Wydanie pi. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2008.
- [44] A. Grześ, "Wykres Gantta a metoda ścieżki krytycznej (CPM)," *Optimum. Stud. Ekon.*, no. 6(72), pp. 195–216, 2014.
- [45] H. Bieniok, *Metody sprawnego zarządzania*, IV. Warszawa: PLACET, 2004.
- [46] F. W. Taylor, *Shop Management*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1903.
- [47] J. Beliczyński, "Rozwój myśli z zakresu zarządzania w okresie przednaukowym – od Kartezjusza do Fredericka W. Taylora," *Zesz. Nauk. Małopolskiej Wyższej Szk. Ekon. w Tarnowie*, vol. 37, no. 1, pp. 35–51, 2018.
- [48] H. Gantt, *Work, Wages and Profit. their influence on the cost of living*. New York: The Engineering Magazine, 1910.
- [49] L. Euler, "Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis," *Comment. Acad. Sci. Petropolitanae*, vol. 1, pp. 128–140, 1741.
- [50] D. G. Malcolm, J. H. Roseboom, C. E. Clark, and W. Fazar, "Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation," *Oper. Res.*, vol. 7, no. 5, pp. 646–669, Oct. 1959.
- [51] J. E. Kelley and M. R. Walker, "Critical-path planning and scheduling," in *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference, IRE-AIEE-ACM 1959*, 1959, pp. 160–173.
- [52] J. W. Fondhal, "A non-computer approach to the critical path method for the construction industry," Stanford, CA, 1961.
- [53] M. Hajdu, G. Lucko, and Y. Su, "Singularity functions for continuous precedence relations and nonlinear activity-time-production functions," *Autom. Constr.*, vol. 79, pp. 31–38, Jul. 2017.

- [54] M. Hajdu and S. Isaac, "Sixty years of project planning: history and future," *Technol. Manag. Constr.*, vol. 8, pp. 1499–1510, 2016.
- [55] IBM, "User's Manual for IBM 1440 Project Control System (PCS)." 1964.
- [56] S. Biruk, *Metodyka planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2018.
- [57] A. Tomar and V. K. Bansal, "A Novel Step Toward Repetitive Projects Scheduling Using Geographic Information Systems," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 45, no. 5, pp. 3983–3997, May 2020.
- [58] X. Zou and L. Zhang, "A constraint programming approach for scheduling repetitive projects with atypical activities considering soft logic," *Autom. Constr.*, vol. 109, Jan. 2020.
- [59] M. A. Ammar, "Optimization of line of balance scheduling considering work interruption," *Int. J. Constr. Manag.*, 2019.
- [60] A. Hassan and K. El-Rayes, "Quantifying the interruption impact of activity delays in non-serial repetitive construction projects," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 38, no. 6, pp. 515–533, Jun. 2020.
- [61] G. Heravi and S. Moridi, "Resource-Constrained Time-Cost Tradeoff for Repetitive Construction Projects," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 3265–3274, Aug. 2019.
- [62] L. C. Ungureanu, T. Hartmann, and I. Serbanoiu, "Quantitative lean assessment of line of balance schedules' quality," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 26, no. 2, pp. 224–244, Mar. 2019.
- [63] M. S. Eid, E. Elbeltagi, and I. H. El-Adaway, "Simultaneous multi-criteria optimization for scheduling linear infrastructure projects," *Int. J. Constr. Manag.*, 2018.
- [64] M. C. B. de Araújo, L. H. Alencar, and C. M. de Miranda Mota, "Project procurement management: A structured literature review," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 35, no. 3, pp. 353–377, Apr. 2017.
- [65] S. Seuring and M. Müller, "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management," *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 15, pp. 1699–1710, Oct. 2008.
- [66] W. Korłub, "Optymalizacja strategii sieci inteligentnych agentów za pomocą programowania genetycznego w systemie rozproszonym realizującym paradygmat volunteer computing," Politechnika Gdańska, 2016.
- [67] D. Manjarres *et al.*, "A survey on applications of the harmony search algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 8. Elsevier Ltd, pp. 1818–1831, 01-Sep-2013.
- [68] A. Jaafari, "Criticism of CPM for project planning analysis," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 110, no. 2, pp. 222–233, 1984.
- [69] E. N. Chrzanowski and D. W. Johnston, "Application of linear scheduling," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 112, no. 4, pp. 476–491, 1986.

- [70] R. M. Reda, "RPM: Repetitive Project Modeling," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 116, no. 2, pp. 316–330, 1990.
- [71] L. J. R. Cole, "Construction scheduling: Principles, practices, and six case studies," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 117, no. 4, pp. 579–588, 1991.
- [72] R. B. Harris and P. G. Ioannou, "Scheduling projects with repeating activities," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 124, no. 4, pp. 269–278, 1998.
- [73] D. J. Harmelink and J. E. Rowings, "Linear scheduling model: Development of controlling activity path," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 124, no. 4, pp. 263–268, Jul. 1998.
- [74] J. J. O'Brien, F. C. Kreitzberg, and W. F. Mikes, "Network scheduling variations for repetitive work," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 111, no. 2, pp. 105–116, 1985.
- [75] A. Kallantzis, J. Soldatos, and S. Lambropoulos, "Linear versus network scheduling: A critical path comparison," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 133, no. 7, pp. 483–491, 2007.
- [76] B. A. Senior, "Late-time computation for task chains using discrete-event simulation," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 121, no. 4, pp. 397–403, 1995.
- [77] A. D. Russell and W. C. M. Wong, "New generation of planning structures," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 119, no. 2, pp. 196–214, 1993.
- [78] B. A. Senior and D. W. Halpin, "Simplified simulation system for construction projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 124, no. 1, pp. 72–81, 1998.
- [79] M. A. Ammar, "Float analysis of non-serial repetitive activities," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 21, no. 5, pp. 535–542, 2003.
- [80] D. Arditi and M. Z. Albulak, "Line-of-Balance scheduling in pavement construction," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 112, no. 3, pp. 411–424, 1986.
- [81] Z. M. A. Sarraj, "Formal development of line-of-balance technique," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 116, no. 4, pp. 689–704, 1990.
- [82] A. Gouda, O. Hosny, and K. Nassar, "Optimal crew routing for linear repetitive projects using graph theory," *Autom. Constr.*, vol. 81, pp. 411–421, 2017.
- [83] D. Arditi, O. B. Tokdemir, and K. Suh, "Challenges in line-of-balance scheduling," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 128, no. 6, pp. 545–556, 2002.
- [84] D. Arditi, O. B. Tokdemir, and K. Suh, "Scheduling system for repetitive unit construction using line-of-balance technology," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 8, no. 2, pp. 90–103, 2001.
- [85] D. Arditi, P. Sikangwan, and O. B. Tokdemir, "Scheduling system for high rise building construction," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 20, no. 4, pp. 353–364, 2002.
- [86] M. M. Ali and A. Elazouni, "Finance-based CPM/LOB scheduling of projects with repetitive non-serial activities," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 27, no. 9, pp. 839–856, 2009.

- [87] S. M. Hafez, "Practical limitations of line-of-balance in scheduling repetitive construction units," *AEJ - Alexandria Eng. J.*, vol. 43, no. 5, pp. 653–661, 2004.
- [88] M. A. Ammar, "LOB and CPM integrated method for scheduling repetitive projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 139, no. 1, pp. 44–50, Jan. 2013.
- [89] J. D. Lutz and A. Hijazi, "Planning repetitive construction: Current practice," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 11, no. 2, pp. 99–110, 1993.
- [90] F. A. E. M. Agrama, "Linear projects scheduling using spreadsheets features," *Alexandria Eng. J.*, vol. 50, no. 2, pp. 179–185, Jun. 2011.
- [91] H. R. Zolfaghar Dolabi, A. Afshar, and R. Abbasnia, "CPM/LOB scheduling method for project deadline constraint satisfaction," *Autom. Constr.*, vol. 48, pp. 107–118, Dec. 2014.
- [92] K. G. Mattila and A. Park, "Comparison of linear scheduling model and repetitive scheduling method," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 129, no. 1, pp. 56–64, 2003.
- [93] G. Lucko and G. Gattei, "Line-of-balance against linear scheduling: Critical comparison," *Proc. Inst. Civ. Eng. Manag. Procure. Law*, vol. 169, no. 1, pp. 26–44, 2016.
- [94] I.-T. Yang and P. G. Ioannou, "Scheduling system with focus on practical concerns in repetitive projects," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 22, no. 6, pp. 619–630, 2004.
- [95] A. Maravas and J.-P. Pantouvakis, "Fuzzy repetitive scheduling method for projects with repeating activities," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 137, no. 7, pp. 561–564, 2011.
- [96] P. G. Ioannou and I.-T. Yang, "Repetitive Scheduling Method: Requirements, Modeling, and Implementation," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 142, no. 5, 2016.
- [97] Z. Hejducki, "Scheduling model of construction activity with time couplings," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 9, no. 4, pp. 284–291, Jan. 2003.
- [98] C.-H. Wang and Y.-C. Huang, "Controlling activity interval times in LOB scheduling," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 16, no. 1, pp. 5–16, 1998.
- [99] R.-Y. Huang and D. W. Halpin, "Graphically based LP modelling for linear scheduling analysis: The POLO system," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 7, no. 1, pp. 41–51, 2000.
- [100] Y.-C. Huang, "Graphical-based multistage scheduling method for RC buildings," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 24, no. 1, pp. 5–18, 2006.
- [101] P. Bonnal, M. Baudin, and J. De Jonghe, "Merging PDM, RSM and LSM scheduling approaches: Into a single construction project scheduling system," *J. Mod. Proj. Manag.*, vol. 1, no. 2, pp. 6–17, 2013.
- [102] E. Shim and B.-C. Kim, "Batch-Size Based Repetitive Scheduling Method (BRSM)," *Int. J. Constr. Educ. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 140–156, 2014.
- [103] K. El-Rayes and O. Moselhi, "Resource-driven scheduling of repetitive activities," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 16, no. 4, pp. 433–446, 1998.

- [104] K. El-Rayes and O. Moselhi, "Optimizing resource utilization for repetitive construction projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 127, no. 1, pp. 18–26, 2001.
- [105] P. Bonnal, D. Gourc, A.-P. Hameri, and G. Lacoste, "A linear-discrete scheduling model for the resource-constrained project scheduling problem," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 23, no. 8, pp. 797–814, 2005.
- [106] R.-Y. Huang and K.-S. Sun, "Non-unit-based planning and scheduling of repetitive construction projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 132, no. 6, pp. 585–597, 2006.
- [107] R.-Y. Huang and K.-S. Sun, "An optimization model for workgroup-based repetitive scheduling," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 33, no. 9, pp. 1172–1194, 2006.
- [108] R.-Y. Huang and K.-S. Sun, "A GA optimization model for workgroup-based repetitive scheduling (WoRSM)," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 3, pp. 212–228, 2009.
- [109] J. D. D. García-Nieves, J. L. L. Ponz-Tienda, A. Salcedo-Bernal, and E. Pellicer, "The Multimode Resource-Constrained Project Scheduling Problem for Repetitive Activities in Construction Projects," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 33, no. 8, pp. 655–671, Aug. 2018.
- [110] S. Biruk and P. Jaśkowski, "The work continuity constraints problem in construction projects, network models," *Arch. Civ. Eng.*, vol. 55, no. 1, pp. 29–41, 2009.
- [111] L. Zhang, X. Zou, and X. Chen, "Resource-constrained scheduling in repetitive projects," *Adv. Inf. Sci. Serv. Sci.*, vol. 4, no. 14, pp. 287–294, 2012.
- [112] S. M. Hafez, "Developing classical schedule technology," *AEJ - Alexandria Eng. J.*, vol. 44, no. 2, pp. 267–277, 2005.
- [113] M. Vanhoucke, "Work continuity constraints in project scheduling," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 132, no. 1, pp. 14–25, 2006.
- [114] L. S. Kang, I. C. Park, and B. H. Lee, "Optimal schedule planning for multiple, repetitive construction process," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 127, no. 5, pp. 382–390, 2001.
- [115] A. Altuwaim and K. El-Rayes, "Optimizing the Scheduling of Repetitive Construction to Minimize Interruption Cost," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 7, p. 04018051, Jul. 2018.
- [116] M. Tomczak and P. Jaśkowski, "New Approach to Improve General Contractor Crew's Work Continuity in Repetitive Construction Projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 146, no. 5, p. 04020043, May 2020.
- [117] M. E. Georgy, "Evolutionary resource scheduler for linear projects," *Autom. Constr.*, vol. 17, no. 5, pp. 573–583, 2008.
- [118] A. Damci, D. Arditi, and G. Polat, "Multiresource leveling in line-of-balance scheduling," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 139, no. 9, pp. 1108–1116, Sep. 2013.

- [119] A. Damci, D. Arditi, and G. Polat, "Resource Leveling in Line-of-Balance Scheduling," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 28, no. 9, pp. 679–692, Oct. 2013.
- [120] M. A. Ammar, "Resource optimisation in line of balance scheduling," *Constr. Manag. Econ.*, 2019.
- [121] M. Dhanasekar, "Identification of optimal size resources for a repetitive housing construction," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 7, no. 4, pp. 347–361, 2000.
- [122] W. Y. Thabet and Y. J. Beliveau, "Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 120, no. 1, pp. 96–116, 1994.
- [123] W. Y. Thabet and Y. J. Beliveau, "SCaRC: Space-Constrained Resource-Constrained scheduling system," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 48–59, 1997.
- [124] S. Tao, C. Wu, Z. Sheng, and X. Wang, "Space-Time Repetitive Project Scheduling Considering Location and Congestion," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 32, no. 3, 2018.
- [125] M. Lu and H. Li, "Resource-activity critical-path method for construction planning," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 129, no. 4, pp. 412–420, 2003.
- [126] I.-T. Yang and C.-Y. Chang, "Stochastic resource-constrained scheduling for repetitive construction projects with uncertain supply of resources and funding," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 23, no. 7, pp. 546–553, 2005.
- [127] W. Bożejko, Z. Hejducki, M. Uchroński, and M. Wodecki, "Solving resource-constrained construction scheduling problems with overlaps by metaheuristic," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 20, no. 5, pp. 649–659, Sep. 2014.
- [128] K. El-Rayes, "Object-oriented model for repetitive construction scheduling," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 127, no. 3, pp. 199–205, May 2001.
- [129] A. Hassanein and O. Moselhi, "Planning and scheduling highway construction," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 130, no. 5, pp. 638–646, 2004.
- [130] A. Elhakeem and T. Hegazy, "Graphical approach for manpower planning in infrastructure networks," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 131, no. 2, pp. 168–175, 2005.
- [131] M. Krzemiński, "Optimization of Work Schedules Executed using the Flow Shop Model, Assuming Multitasking Performed by Work Crews," *Arch. Civ. Eng.*, vol. 63, no. 4, pp. 3–19, Dec. 2017.
- [132] A. L. Naresh and C. T. Jahren, "Learning outcomes from construction simulation modeling," *J. Civ. Eng. Environ. Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 129–144, 1999.
- [133] K. C. Lam, D. Lee, and T. Hu, "Understanding the effect of the learning-forgetting phenomenon to duration of projects construction," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 19, no. 7, pp. 411–420, 2001.

- [134] J. P. Couto and J. C. Teixeira, "Using linear model for learning curve effect on highrise floor construction," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 23, no. 4, pp. 355–364, 2005.
- [135] L. Zhang, X. Zou, and Z. Kan, "Improved strategy for resource allocation in repetitive projects considering the learning effect," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 140, no. 11, 2014.
- [136] F. Jordan Srour, D. Kiomjian, and I. M. Srour, "Automating the Use of Learning Curve Models in Construction Task Duration Estimates," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 7, 2018.
- [137] D. Arditi, O. B. Tokdemir, and K. Suh, "Effect of learning on line-of-balance scheduling," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 19, no. 5, pp. 265–277, 2001.
- [138] M. A. Ammar and A. F. Abdel-Maged, "Modeling of LOB scheduling with learning development effect," *Int. J. Constr. Manag.*, vol. 18, no. 6, pp. 517–526, 2018.
- [139] O. B. Tokdemir, H. Erol, and I. Dikmen, "Delay Risk Assessment of Repetitive Construction Projects Using Line-of-Balance Scheduling and Monte Carlo Simulation," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 145, no. 2, 2019.
- [140] S. Biruk and Ł. Rzepecki, "The impact of learning-forgetting phenomenon on duration of repetitive construction processes conducted in random conditions | Wpływ zjawiska uczenia się i zapominania na czas realizacji powtarzalnych procesów budowlanych realizowanych w warunkach losowych," *Sci. Rev. Eng. Environ. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 202–209, 2017.
- [141] G. Duffy, A. Woldesenbet, D. H. S. Jeong, and G. D. Oberlender, "Advanced linear scheduling program with varying production rates for pipeline construction projects," *Autom. Constr.*, vol. 27, pp. 99–110, 2012.
- [142] M. H. Baqerin, Y. Shafahi, and H. Kashani, "Application of Weibull analysis to evaluate and forecast schedule performance in repetitive projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 142, no. 2, 2016.
- [143] F. Moreno, F. Orozco, O. Rojas, B. A. Senior, M. Poshdar, and E. Forcael, "A Fixed Start Scheduling Approach for Repetitive Construction Projects," *KSCE J. Civ. Eng.*, 2020.
- [144] L. Zhang, G. Dai, X. Zou, and J. Qi, "Robustness-based multi-objective optimization for repetitive projects under work continuity uncertainty," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, 2020.
- [145] G. Lucko, "Productivity scheduling method compared to linear and repetitive project scheduling methods," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 134, no. 9, pp. 711–720, 2008.
- [146] Y. Su and G. Lucko, "Linear scheduling with multiple crews based on line-of-balance and productivity scheduling method with singularity functions," *Autom. Constr.*, vol. 70, pp. 38–50, Oct. 2016.
- [147] M. Rogalska and Z. Hejducki, "Time buffers in construction process scheduling," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 13, no. 2, pp. 143–148, 2007.

- [148] V. González, L. F. Alarcón, and K. Molenaar, “Multiobjective design of Work-In-Process buffer for scheduling repetitive building projects,” *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 2, pp. 95–108, 2009.
- [149] I. Bakry, O. Moselhi, and T. Zayed, “Optimized scheduling and buffering of repetitive construction projects under uncertainty,” *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 23, no. 6, pp. 782–800, 2016.
- [150] S. Lee, S. Lee, and J. Son, “Developing a process model for optimizing linear process plans based on three types of buffers and brute-force algorithm,” *J. Asian Archit. Build. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 215–222, 2016.
- [151] J.-S. Lee, “Estimating Cumulative Damages due to Disruptions in Repetitive Construction,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 142, no. 11, 2016.
- [152] T. Salama, A. Salah, and O. Moselhi, “Integration of linear scheduling method and the critical chain project management,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 30–40, Jan. 2018.
- [153] G. Lucko, T. D. C. L. Alves, and V. L. Angelim, “Challenges and opportunities for productivity improvement studies in linear, repetitive, and location-based scheduling,” *Constr. Manag. Econ.*, vol. 32, no. 6, pp. 575–594, 2014.
- [154] S. S. Leu and S. T. Hwang, “Optimal repetitive scheduling model with shareable resource constraint,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 127, no. 4, pp. 270–280, Jul. 2001.
- [155] K. Nassar, “Evolutionary optimization of resource allocation in repetitive construction schedules,” *Electron. J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 10, 2005.
- [156] M. Hsie, C.-J. Chang, I.-T. Yang, and C.-Y. Huang, “Resource-constrained scheduling for continuous repetitive projects with time-based production units,” *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 7, pp. 942–949, 2009.
- [157] H. Zhang, H. Li, and C. M. Tam, “Heuristic scheduling of resource-constrained, multiple-mode and repetitive projects,” *Constr. Manag. Econ.*, vol. 24, no. 2, pp. 159–169, Feb. 2006.
- [158] D.-H. Tran, J.-S. Chou, and D.-L. Luong, “Optimizing non-unit repetitive project resource and scheduling by evolutionary algorithms,” *Oper. Res.*, 2020.
- [159] S. S. Liu and C. J. Wang, “Optimizing linear project scheduling with multi-skilled crews,” *Autom. Constr.*, vol. 24, pp. 16–23, Jul. 2012.
- [160] A. D. Russell and W. F. Caselton, “Extensions to linear scheduling optimization,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 114, no. 1, pp. 36–52, 1988.
- [161] P. Jaśkowski and S. Biruk, “Minimizing the Duration of Repetitive Construction Processes with Work Continuity Constraints,” *Computation*, vol. 7, no. 1, p. 14, Mar. 2019.
- [162] S.-L. Fan and H. P. Tserng, “Object-oriented scheduling for repetitive projects with soft logics,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 132, no. 1, pp. 35–48, 2006.

- [163] K. Cho, T. Hong, and C. Hyun, "Space zoning concept-based scheduling model for repetitive construction process," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 19, no. 3, pp. 409–421, 2013.
- [164] I. Bakry, O. Moselhi, and T. Zayed, "Optimized acceleration of repetitive construction projects," *Autom. Constr.*, vol. 39, pp. 145–151, 2014.
- [165] D. Lee, D.-S. Kim, G.-H. Kim, and S. Kim, "Time reduction effect of the enhanced TACT method for high-rise residential buildings," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 22, no. 7, pp. 944–953, 2016.
- [166] A. Hassanein and O. Moselhi, "Accelerating linear projects," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 23, no. 4, pp. 377–385, 2005.
- [167] G. Lucko, H. M. M. Said, and A. Bouferguene, "Construction spatial modeling and scheduling with three-dimensional singularity functions," *Autom. Constr.*, vol. 43, pp. 132–143, 2014.
- [168] M. Podolski, "Management of resources in multiunit construction projects with the use of a tabu search algorithm," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 23, no. 2, pp. 263–272, Feb. 2017.
- [169] E. Radziszewska-Zielina and B. Sroka, "Planning repetitive construction projects considering technological constraints," *Open Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 500–505, 2018.
- [170] M. Suresh, P. Dutta, and K. Jain, "Analysis of an EPC project: A solution to the resource constrained project scheduling problem using genetic algorithms," *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 251–269, 2011.
- [171] L. Zhang and J. Qi, "Controlling Path and Controlling Segment Analysis in Repetitive Scheduling Method," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 138, no. 11, pp. 1341–1345, Nov. 2012.
- [172] O. Moselhi and K. El-Rayes, "Least cost scheduling for repetitive projects," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 5, pp. 834–843, 1993.
- [173] O. Moselhi and K. El-Rayes, "Scheduling of Repetitive Projects with Cost Optimization," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 119, no. 4, pp. 681–697, Dec. 1993.
- [174] T. Hegazy and N. Wassef, "Cost optimization in projects with repetitive nonserial activities," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 127, no. 3, pp. 183–191, 2001.
- [175] T. Hegazy, A. Elhakeem, and E. Elbeltagi, "Distributed Scheduling Model for Infrastructure Networks," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 130, no. 2, pp. 160–167, Apr. 2004.
- [176] T. Hegazy and E. Kamarah, "Efficient repetitive scheduling for high-rise construction," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 134, no. 4, pp. 253–264, 2008.
- [177] Y. Huang, X. Zou, and L. Zhang, "Genetic algorithm-based method for the deadline problem in repetitive construction projects considering soft logic," *J. Manag. Eng.*, vol. 32, no. 4, 2016.

- [178] M. Abdallah and A. Alshahri, "Optimizing planning of build–operate–transfer projects to maximize investor profit," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 46, no. 1, pp. 26–37, 2019.
- [179] M. Podolski and B. Sroka, "Cost optimization of multiunit construction projects using linear programming and metaheuristic-based simulated annealing algorithm," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 25, no. 8, pp. 848–857, Nov. 2019.
- [180] S.-L. Fan, K.-S. Sun, and Y.-R. Wang, "GA optimization model for repetitive projects with soft logic," *Autom. Constr.*, vol. 21, no. 1, pp. 253–261, 2012.
- [181] A. Shtub, L. J. LeBlanc, and Z. Cai, "Scheduling programs with repetitive projects: A comparison of a simulated annealing, a genetic and a pair-wise swap algorithm," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 88, no. 1, pp. 124–138, 1996.
- [182] W. Bożejko, Z. Hejducki, and M. Wodecki, "Applying metaheuristic strategies in construction projects management," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 18, no. 5, pp. 621–630, Oct. 2012.
- [183] O. Moselhi, I. Bakry, and A. Alshibani, "Accelerating repetitive construction projects: With uncertainty and contractors' judgment," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 43, no. 11, pp. 949–957, 2016.
- [184] H. Adeli and A. Karim, "Scheduling/cost optimization and neural dynamics model for construction," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 123, no. 4, pp. 450–458, 1997.
- [185] A. S. Ezeldin and A. Soliman, "Hybrid time-cost optimization of nonserial repetitive construction projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 135, no. 1, pp. 42–55, 2009.
- [186] L. D. Long and A. Ohsato, "A genetic algorithm-based method for scheduling repetitive construction projects," *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 4, pp. 499–511, 2009.
- [187] O. Moselhi and A. Hassanein, "Optimized scheduling of linear projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 129, no. 6, pp. 664–673, 2003.
- [188] K. H. Hyari, K. El-Rayes, and M. El-Mashaleh, "Automated trade-off between time and cost in planning repetitive construction projects," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 27, no. 8, pp. 749–761, 2009.
- [189] M. Rogalska, W. Bożejko, and Z. Hejducki, "Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling," *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 1, pp. 24–31, Dec. 2008.
- [190] K. Cho, T. Hong, and C. Hyun, "Integrated schedule and cost model for repetitive construction process," *J. Manag. Eng.*, vol. 26, no. 2, pp. 78–88, 2010.
- [191] H.-S. Lee, S. Roh, M.-S. Park, and H.-G. Ryu, "Optimal Option Selection for Finishing Works of High-Rise Building," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 639–651, 2010.

- [192] L. Zhang, X. Zou, and J. Qi, "A trade-off between time and cost in scheduling repetitive construction projects," *J. Ind. Manag. Optim.*, vol. 11, no. 4, pp. 1423–1434, 2015.
- [193] X. Zou, S.-C. Fang, Y.-S. Huang, and L. Zhang, "Mixed-Integer Linear Programming Approach for Scheduling Repetitive Projects with Time-Cost Trade-Off Consideration," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 3, 2017.
- [194] D.-H. Tran, J.-S. Chou, and D.-L. Luong, "Multi-objective symbiotic organisms optimization for making time-cost tradeoffs in repetitive project scheduling problem," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 25, no. 4, pp. 322–339, 2019.
- [195] K. H. Hyari and K. El-Rayes, "Optimal planning and scheduling for repetitive construction projects," *J. Manag. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 11–19, 2006.
- [196] A. Altuwaim and K. El-Rayes, "Minimizing duration and crew work interruptions of repetitive construction projects," *Autom. Constr.*, vol. 88, pp. 59–72, Apr. 2018.
- [197] P. G. Ipsilandis, "Multiobjective linear programming model for scheduling linear repetitive projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 133, no. 6, pp. 417–424, 2007.
- [198] S. S. Liu and C. J. Wang, "Two-stage profit optimization model for linear scheduling problems considering cash flow," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 27, no. 11, pp. 1023–1037, 2009.
- [199] S. S. Liu and C. J. Wang, "Optimization model for resource assignment problems of linear construction projects," *Autom. Constr.*, vol. 16, no. 4, pp. 460–473, Jul. 2007.
- [200] R. H. Abd El Razek, A. M. Diab, S. M. Hafez, and R. F. Aziz, "Time-cost-quality trade-off software by using simplified Genetic algorithm for typical-repetitive construction projects," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 61, pp. 312–321, 2010.
- [201] T. Wang, M. Abdallah, C. Clevenger, and S. Monghasemi, "Time–cost–quality trade-off analysis for planning construction projects," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, 2019.
- [202] F. A. E. M. Agrama, "Multi-objective genetic optimization for scheduling a multi-storey building," *Autom. Constr.*, vol. 44, pp. 119–128, 2014.
- [203] M. Tomczak, "Modeling of the harmonization method for executing a multi-unit construction project," *Open Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 282–291, Jul. 2019.
- [204] T. Salama and O. Moselhi, "Multi-objective optimization for repetitive scheduling under uncertainty," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 26, no. 7, pp. 1294–1320, Aug. 2019.
- [205] T.-M. Cheng, C.-W. Feng, and Y.-L. Chen, "A hybrid mechanism for optimizing construction simulation models," *Autom. Constr.*, vol. 14, no. 1, pp. 85–98, 2005.

- [206] A. D. Russell, "MICROCOMPUTERS, MANAGEMENT, AND HIGH-RISE CONSTRUCTION: THE NEXT STEP.," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 396–414, 1985.
- [207] K. J. Yi, H.-S. Lee, and Y. K. Choi, "Network creation and development for repetitive-unit projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 128, no. 3, pp. 257–264, 2002.
- [208] R.-Y. Huang and K.-S. Sun, "System development for non-unit based repetitive project scheduling," *Autom. Constr.*, vol. 14, no. 5, pp. 650–665, 2005.
- [209] O. B. Tokdemir, D. Arditi, and C. Balcik, "ALISS: Advanced Linear Scheduling System," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 24, no. 12, pp. 1253–1267, 2006.
- [210] K. Cho, T. Hong, and C. Hyun, "Scheduling model for repetitive construction processes for high-rise buildings," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 36–48, 2011.
- [211] M. Abdallah and M. Marzouk, "Planning of tunneling projects using computer simulation and fuzzy decision making," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 19, no. 4, pp. 591–607, 2013.
- [212] M. Hajdasz, "Flexible management of repetitive construction processes by an intelligent support system," *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 4 PART 1, pp. 962–973, 2014.
- [213] D. P. Kavanagh, "Siren: A repetitive construction simulation model," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 111, no. 3, pp. 308–323, 1985.
- [214] H. Zhang, G. M. Tam, and J. J. Shi, "Simulation-based methodology for project scheduling," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 20, no. 8, pp. 667–678, 2002.
- [215] A. Sawhney, A. Mund, and T. Chaitavatputtiporn, "Petri Net-based scheduling of construction projects," *Civ. Eng. Environ. Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 255–271, 2003.
- [216] S. Biruk and P. Jaśkowski, "Simulation modelling construction project with repetitive tasks using petri nets theory," *J. Bus. Econ. Manag.*, vol. 9, no. 3, pp. 219–226, 2008.
- [217] R. J. Dzung, W. C. Wang, and H. P. Tserng, "Module-based construction schedule administration for public infrastructure agencies," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 130, no. 1, pp. 5–14, 2004.
- [218] S. Han, S. Lee, and F. Peña-Mora, "Identification and quantification of non-value-adding effort from errors and changes in design and construction projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 138, no. 1, pp. 98–109, 2012.
- [219] G. Lucko, L. G. Araújo, and G. R. Cates, "Slip Chart-Inspired Project Schedule Diagramming: Origins, Buffers, and Extension to Linear Schedules," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 142, no. 5, 2016.

- [220] S. Sharma and V. K. Bansal, "Location-based planning and scheduling of highway construction projects in hilly terrain using GIS," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 45, no. 7, pp. 570–582, 2018.
- [221] A. Tomar and V. K. Bansal, "Generation, visualization, and evaluation schedule of repetitive construction projects using GIS," *Int. J. Constr. Manag.*, 2019.
- [222] A. Tomar and V. K. Bansal, "Scheduling of repetitive construction projects using geographic information systems: an integration of critical path method and line of balance," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 549–562, 2019.
- [223] K. El-Rayes, R. Ramanathan, and O. Moselhi, "An object-oriented model for planning and control of housing construction," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 20, no. 3, pp. 201–210, 2002.
- [224] D. Hu and Y. Mohamed, "Simulation-model-structuring methodology for industrial construction fabrication shops," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 140, no. 5, 2014.
- [225] R. Eiris Pereira and I. Flood, "Impact of linear correlation on construction project performance using stochastic linear scheduling," *Vis. Eng.*, vol. 5, no. 1, 2017.
- [226] J. D. D. García-Nieves, J. L. L. Ponz-Tienda, A. Ospina-Alvarado, and M. Bonilla-Palacios, "Multipurpose linear programming optimization model for repetitive activities scheduling in construction projects," *Autom. Constr.*, vol. 105, 2019.
- [227] W. Pang *et al.*, "Modified particle swarm optimization based on space transformation for solving traveling salesman problem," in *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2004, vol. 4, pp. 2342–2346.
- [228] J. Montusiewicz, *Wspomaganie procesów projektowania i planowania wytwarzania w budowie i eksploatacji maszyn metodami analizy wielokryterialnej*. Politechnika Lubelska, 2012.
- [229] M. Bereta, "Algorytmy ewolucyjne," 2019. .
- [230] P. Jaśkowski, "Metoda projektowania struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego," Lublin University of Technology, 2003.
- [231] M. Hapke, "Rozmyte wielokryterialne programowanie sieciowe," Politechnika Poznańska, 1998.
- [232] M. Hapke, A. Jaszkievicz, and R. Słowiński, "Interactive analysis of multiple-criteria project scheduling problems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 107, no. 2, pp. 315–324, Jun. 1998.
- [233] L. Mikhailov, "Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 134, no. 3, pp. 365–385, Mar. 2003.
- [234] L. Mikhailov, "Group prioritization in the AHP by fuzzy preference programming method," *Comput. Oper. Res.*, vol. 31, no. 2, pp. 293–301, 2004.

- [235] M. Tomczak and P. Jaśkowski, "Application of Type-2 Interval Fuzzy Sets to Contractor Qualification Process," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 8, pp. 2702–2713, Aug. 2018.
- [236] A. Jaszkievicz and R. Słowiński, "The Light Beam Search — Outranking Based Interactive Procedure for Multiple-Objective Mathematical Programming," Springer, Boston, MA, 1995, pp. 129–146.
- [237] A. Jaszkievicz and R. Słowiński, "The 'Light Beam Search' approach - an overview of methodology and applications," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 113, no. 2, pp. 300–314, Mar. 1999.
- [238] C. Kahraman, B. Öztayşi, I. Uçal Sari, and E. Turanoğlu, "Fuzzy analytic hierarchy process with interval type-2 fuzzy sets," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 59, pp. 48–57, Mar. 2014.
- [239] S. M. Chen and L. W. Lee, "Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the ranking values and the arithmetic operations of interval type-2 fuzzy sets," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 1, pp. 824–833, Jan. 2010.
- [240] M. Tomczak and Ł. Rzepecki, "Evaluation of Supply Chain Management Systems Used in Civil Engineering," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 245, no. 7.
- [241] T. L. Saaty, "The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP approach," *Oper. Res.*, vol. 61, no. 5, pp. 1101–1118, Sep. 2013.
- [242] T. L. Saaty and L. G. Vargas, "Dispersion of group judgments," *Math. Comput. Model.*, vol. 46, no. 7–8, pp. 918–925, Oct. 2007.
- [243] C. W. Chang, C. R. Wu, and H. L. Lin, "Applying fuzzy hierarchy multiple attributes to construct an expert decision making process," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 4, pp. 7363–7368, May 2009.
- [244] L. C. Tang, T. N. Goh, H. S. Yam, and T. Yoap, "Six Sigma. Advanced tools for black belts and master black belts." 2006.
- [245] J.-J. Zimmermann, "Fuzzy set theory – and its application." Springer Science + Business Media, 2001.
- [246] T. L. Saaty and M. S. Ozdemir, "Why the magic number seven plus or minus two," *Math. Comput. Model.*, vol. 38, no. 3–4, pp. 233–244, Aug. 2003.
- [247] T. Trzaskalik, Ed., *Wielokryterialne Wspomaganie Decyzji. Metody i zastosowania*. PWE, 2014.
- [248] S. Grabański, "Wyznaczanie lokalizacji centrum dystrybucji. Modelowanie z wykorzystaniem systemów geoinformacji," 2015.
- [249] P. Kostrzewa-Demczuk and M. Rogalska, "Anticipating the Length of Employees' Working Time," *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 413, Mar. 2020.

- [250] C. Koo, T. Hong, C. Hyun, and K. Koo, "A CBR-based hybrid model for predicting a construction duration and cost based on project characteristics in multi-family housing projects," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 37, no. 5, pp. 739–752, May 2010.
- [251] D. W. M. Chan and M. M. Kumaraswamy, "Modelling and predicting construction durations in Hong Kong public housing," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 17, no. 3, pp. 351–362, 1999.
- [252] M. Szczepanik, *Algorytmy rojowe w optymalizacji układów mechanicznych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [253] J. Kennedy, "Particle swarm: Social adaptation of knowledge," in *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC*, 1997, pp. 303–308.
- [254] J. Kennedy *et al.*, *Swarm Intelligence The Morgan Kaufmann Series in Evolutionary Computation*. Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [255] J. Kennedy, "Small worlds and mega-minds: Effects of neighborhood topology on particle swarm performance," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, CEC 1999*, 1999, vol. 3, pp. 1931–1938.
- [256] Y. Shi and R. C. Eberhart, "Modified particle swarm optimizer," in *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC*, 1998, pp. 69–73.
- [257] Y. Shi and R. C. Eberhart, "Parameter selection in particle swarm optimization," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1998, vol. 1447, pp. 591–600.
- [258] C. Worasuchep, "A Particle Swarm Optimization with stagnation detection and dispersion," in *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2008*, 2008, pp. 424–429.
- [259] A. Lihu and Ş. Holban, "Particle swarm optimization with disagreements on stagnation," *Stud. Comput. Intell.*, vol. 381, pp. 103–113, 2011.
- [260] M. Li, X.-L. Ji, and W. Li, "An improved constriction factor particle swarm optimization algorithm to overcome the local optimum," in *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, 2011, pp. 5400–5402.
- [261] M. Clerc, *Particle swarm optimization*. London, Newport Beach: ISTE Ltd, 2010.
- [262] A. Rezaee Jordehi and J. Jasni, "Parameter selection in particle swarm optimisation: A survey," *J. Exp. Theor. Artif. Intell.*, vol. 25, no. 4, pp. 527–542, Dec. 2013.
- [263] E. Ozcan and C. K. Mohan, "Particle swarm optimization: Surfing the waves," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, CEC 1999*, 1999, vol. 3, pp. 1939–1944.

- [264] J. Sagan, "Wspomaganie decyzji w logistyce odzysku odpadów betonowych," Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2018.
- [265] M. Karkula, "Weryfikacja i walidacja dynamicznych modeli symulacyjnych procesów logistycznych," *Logistyka - Nauk.*, vol. 2, pp. 717–726, 2012.
- [266] F. Y. Min, M. Yang, and Z. C. Wang, "Knowledge-based method for the validation of complex simulation models," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 18, no. 5, pp. 500–515, May 2010.

Załącznik A

Tabela A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Tradycyjne metody i narzędzia harmonogramowania przedsięwzięć powtarzalnych						
Jaafari A.	Criticism of CPM for project planning analysis	1984	Journal of Construction Engineering and Management	110	2	222-233
O'Brien J.J., Kreitzberg F.C., Mikes W.F.	Network scheduling variations for repetitive work	1985	Journal of Construction Engineering and Management	111	2	105-116
Arditi D., Albulak M.Z.	Line-of-Balance scheduling in pavement construction	1986	Journal of Construction Engineering and Management	112	3	411-424
Chrzanowski E.N., Jr., Johnston D.W.	Application of linear scheduling	1986	Journal of Construction Engineering and Management	112	4	476-491
Reda R.M.	RPM: Repetitive Project Modeling	1990	Journal of Construction Engineering and Management	116	2	316-330
Sarraj Z.M.A.	Formal development of line-of-balance technique	1990	Journal of Construction Engineering and Management	116	4	689-704
Cole L.J.R.	Construction scheduling: Principles, practices, and six case studies	1991	Journal of Construction Engineering and Management	117	4	579-588

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
Lutz J.D., Hijazi A.	Planning repetitive construction: Current practice	1993	Construction Management and Economics	11	2	99–110
Russell A.D., Wong W.C.M.	New generation of planning structures	1993	Journal of Construction Engineering and Management	119	2	196–214
Suhail S.A., Neale R.H.	CPM/LOB: New methodology to integrate cpm and line of balance	1994	Journal of Construction Engineering and Management	120	3	667–684
Senior B.A.	Late-time computation for task chains using discrete-event simulation	1995	Journal of Construction Engineering and Management	121	4	397–403
Harmelink D.J., Rowings J.E.	Linear scheduling model: Development of controlling activity path	1998	Journal of Construction Engineering and Management	124	4	263–268
Harris R.B., Ioannou P.G.	Scheduling projects with repeating activities	1998	Journal of Construction Engineering and Management	124	4	269–278
Senior B.A., Halpin D.W.	Simplified simulation system for construction projects	1998	Journal of Construction Engineering and Management	124	1	72–81
Wang C.-H., Huang Y.-C.	Controlling activity interval times in LOB scheduling	1998	Construction Management and Economics	16	1	5–16

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Huang R.-Y., Halpin D.W.	Graphically based LP modelling for linear scheduling analysis: The POLO system	2000	Engineering, Construction and Architectural Management	7	1	41–51
Arditi D., Tokdemir O.B., Suh K.	Scheduling system for repetitive unit construction using line-of-balance technology	2001	Engineering, Construction and Architectural Management	8	2	90–103
Hegazy T.	Critical path method-line of balance model for efficient scheduling of repetitive construction projects	2001	Transportation Research Record	176	1	124–129
Arditi D., Sikangwan P., Tokdemir O.B.	Scheduling system for high rise building construction	2002	Construction Management and Economics	20	4	353–364
Arditi D., Tokdemir O.B., Suh K.	Challenges in line-of-balance scheduling	2002	Journal of Construction Engineering and Management	128	6	545–556
Anmar M.A.	Float analysis of non-serial repetitive activities	2003	Construction Management and Economics	21	5	535–542
Hejducki Z.	Scheduling model of construction activity with time couplings	2003	Journal of Civil Engineering and Management	9	4	284–291
Mattila K.G., Park A.	Comparison of linear scheduling model and repetitive scheduling method	2003	Journal of Construction Engineering and Management	129	1	56–64

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Hafez S.M.	Practical limitations of line-of-balance in scheduling repetitive construction units	2004	AEJ - Alexandria Engineering Journal	43	5	653–661
Mahdi I.M.	A new LSM approach for planning repetitive housing projects	2004	International Journal of Project Management	22	4	339–346
Yang I.-T., Ioannou P.G.	Scheduling system with focus on practical concerns in repetitive projects	2004	Construction Management and Economics	22	6	619–630
Huang Y.C.	Graphical-based multistage scheduling method for RC buildings	2006	Construction Management and Economics	24	1	5–18
Kallantzis A., Soldatos J., Lambropoulos S.	Linear versus network scheduling: A critical path comparison	2007	Journal of Construction Engineering and Management	133	7	483–491
Agrama F.A.E.M.	Linear projects scheduling using spreadsheets features	2011	Alexandria Engineering Journal	50	2	179–185
Maravas A., Pantouvakis J.-P.	Fuzzy repetitive scheduling method for projects with repeating activities	2011	Journal of Construction Engineering and Management	137	7	561–564
Ammar M.A.	LOB and CPM integrated method for scheduling repetitive projects	2013	Journal of Construction Engineering and Management	139	1	44–50

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Bonnal P., Baudin M., De Jonghe J.	Merging PDM, RSM and LSM scheduling approaches: Into a single construction project scheduling system	2013	Journal of Modern Project Management	1	2	6–17
Shim E., Kim B.-C.	Batch-Size Based Repetitive Scheduling Method (BRSM)	2014	International Journal of Construction Education and Research	10	2	140–156
Zolfaghar Dolabi H.R., Afshar A., Abbasnia R.	CPM/LOB scheduling method for project deadline constraint satisfaction	2014	Automation in Construction	48		107–118
Ioannou P.G., Yang I.-T.	Repetitive Scheduling Method: Requirements, Modeling, and Implementation	2016	Journal of Construction Engineering and Management	142	5	4016002
Lucko G., Gattei G.	Line-of-balance against linear scheduling: Critical comparison	2016	Proceedings of Institution of Civil Engineers: Management, Procurement and Law	169	1	26–44
Gouda A., Hosny O., Nassar K.	Optimal crew routing for linear repetitive projects using graph theory	2017	Automation in Construction	81		411–421

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Ungureanu L.C., Hartmann T., Serbanoiu I.	Quantitative lean assessment of line of balance schedules' quality	2019	Engineering, Construction and Architectural Management	26	2	224-244
Harmonogramowanie budowlanych przedsięwzięć powtarzalnych zorientowane na zasoby						
Thabet W.Y., Beliveau Y.J.	Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings	1994	Journal of Construction Engineering and Management	120	1	96-116
Thabet W.Y., Beliveau Y.J.	SCaRC: Space-Constrained Resource-Constrained scheduling system	1997	Journal of Computing in Civil Engineering	11	1	48-59
El-Rayes K., Moselhi O.	Resource-driven scheduling of repetitive activities	1998	Construction Management and Economics	16	4	433-446
Dhanasekar M.	Identification of optimal size resources for a repetitive housing construction	2000	Engineering, Construction and Architectural Management	7	4	347-361
El-Rayes K.	Object-oriented model for repetitive construction scheduling	2001	Journal of Construction Engineering and Management	127	3	199-205
El-Rayes K., Moselhi O.	Optimizing resource utilization for repetitive construction projects	2001	Journal of Construction Engineering and Management	127	1	18-26

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Kang L.S., Park I.C., Lee B.H.	Optimal schedule planning for multiple, repetitive construction process	2001	Journal of Construction Engineering and Management	127	5	382-390
Lu M., Li H.	Resource-activity critical-path method for construction planning	2003	Journal of Construction Engineering and Management	129	4	412-420
Hassanein A., Moselhi O.	Planning and scheduling highway construction	2004	Journal of Construction Engineering and Management	130	5	638-646
Bonnal P., Gourc D., Hameri A.-P., Lacoste G.	A linear-discrete scheduling model for the resource-constrained project scheduling problem	2005	Construction Management and Economics	23	8	797-814
Elhakeem A., Hegazy T.	Graphical approach for manpower planning in infrastructure networks	2005	Journal of Construction Engineering and Management	131	2	168-175
Hafez S.M.	Developing classical schedule technology	2005	AEJ - Alexandria Engineering Journal	44	2	267-277
Yang I.-T., Chang C.-Y.	Stochastic resource-constrained scheduling for repetitive construction projects with uncertain supply of resources and funding	2005	International Journal of Project Management	23	7	546-553

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Huang R.-Y., Sun K.-S.	Non-unit-based planning and scheduling of repetitive construction projects	2006	Journal of Construction Engineering and Management	132	6	585–597
Huang R.-Y., Sun K.-S.	An optimization model for workgroup-based repetitive scheduling	2006	Canadian Journal of Civil Engineering	33	9	1172–1194
Vanhoucke M.	Work continuity constraints in project scheduling	2006	Journal of Construction Engineering and Management	132	1	14–25
Georgy M.E.	Evolutionary resource scheduler for linear projects	2008	Automation in Construction	17	5	573–583
Biruk S., Jaśkowski P.	The work continuity constraints problem in construction projects, network models	2009	Archives of Civil Engineering	55	1	29–41
Huang R.-Y., Sun K.-S.	A GA optimization model for workgroup-based repetitive scheduling (WoRSM)	2009	Advances in Engineering Software	40	3	212–228
Suresh M., Dutta P., Jain K.	Analysis of an EPC project: A solution to the resource constrained project scheduling problem using genetic algorithms	2011	International Journal of Industrial and Systems Engineering	8	2	251–269

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Zhang L., Zou X., Chen X.	Resource-constrained scheduling in repetitive projects	2012	Advances in Information Sciences and Service Sciences	4	14	287–294
Damci A., Arditi D., Polat G.	Multiresource leveling in line-of-balance scheduling	2013	Journal of Construction Engineering and Management	139	9	1108–1116
Damci A., Arditi D., Polat G.	Resource leveling in line-of-balance scheduling	2013	Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	28	9	679–692
Bozejko W., Hejducki Z., Uchroński M., Wodecki M.	Solving resource-constrained construction scheduling problems with overlaps by metaheuristic	2014	Journal of Civil Engineering and Management	20	5	649–659
Altuwaim A., El-Rayes K.	Optimizing the Scheduling of Repetitive Construction to Minimize Interruption Cost	2018	Journal of Construction Engineering and Management	144	7	4018051
Garcia-Nieves J.D., Ponz-Tienda J.L., Salced-Bernal A., Pellicer E.	The Multimode Resource-Constrained Project Scheduling Problem for Repetitive Activities in Construction Projects	2018	Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	33	8	655–671

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Tao S., Wu C., Sheng Z., Wang X.	Space-Time Repetitive Project Scheduling Considering Location and Congestion	2018	Journal of Computing in Civil Engineering	32	3	4018017
Ammar M.A.	Resource optimisation in line of balance scheduling	2019	Construction Management and Economics			
Ammar M.A.	Optimization of line of balance scheduling considering work interruption	2019	International Journal of Construction Management			
Hassan A., El-Rayes K.	Quantifying the interruption impact of activity delays in non-serial repetitive construction projects	2020	Construction Management and Economics	38	6	515–533
Tomczak M., Jaśkowski P.	New Approach to Improve General Contractor Crew's Work Continuity in Repetitive Construction Projects	2020	Journal of Construction Engineering and Management	146	5	1824
Zwiększanie niezawodności oraz odporności harmonogramów na zdarzenia losowe						
Naresh A.L., Jahren C.T.	Learning outcomes from construction simulation modeling	1999	Civil Engineering and Environmental Systems	16	2	129–144
Naresh A.L., Jahren C.T.	Learning outcomes from construction simulation modeling	2000	Cladistics	16	2	129–144
Arditi D., Tokdemir O.B., Suh K.	Effect of learning on line-of-balance scheduling	2001	International Journal of Project Management	19	5	265–277

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
Lam K.C., Lee D., Hu T.	Understanding the effect of the learning-forgetting phenomenon to duration of projects construction	2001	International Journal of Project Management	19	7	411–420
Couto J.P., Teixeira J.C.	Using linear model for learning curve effect on highrise floor construction	2005	Construction Management and Economics	23	4	355–364
Rogalska M., Hejducki Z.	Time buffers in construction process scheduling	2007	Journal of Civil Engineering and Management	13	2	143–148
Lucko G.	Productivity scheduling method compared to linear and repetitive project scheduling methods	2008	Journal of Construction Engineering and Management	134	9	711–720
González V., Alarcón L.F., Molenaar K.	Multiobjective design of Work-In-Process buffer for scheduling repetitive building projects	2009	Automation in Construction	18	2	95–108
Duffy G., Woldesenbet A., Jeong D.H.S., Oberlander G.D.	Advanced linear scheduling program with varying production rates for pipeline construction projects	2012	Automation in Construction	27		99–110
Lucko G., Alves T.D.C.L., Angelim V.L.	Challenges and opportunities for productivity improvement studies in linear, repetitive, and location-based scheduling	2014	Construction Management and Economics	32	6	575–594

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Zhang L., Zou X., Kan Z.	Improved strategy for resource allocation in repetitive projects considering the learning effect	2014	Journal of Construction Engineering and Management	140	11	401-4053
Bakry I., Mosehli O., Zayed T.	Optimized scheduling and buffering of repetitive construction projects under uncertainty	2016	Engineering, Construction and Architectural Management	23	6	782-800
Baqerin M.H., Shafahi Y., Kashani H.	Application of Weibull analysis to evaluate and forecast schedule performance in repetitive projects	2016	Journal of Construction Engineering and Management	142	2	401-5058
Lee J.-S.	Estimating Cumulative Damages due to Disruptions in Repetitive Construction	2016	Journal of Construction Engineering and Management	142	11	401-6064
Lee S., Lee S., Son J.	Developing a process model for optimizing linear process plans based on three types of buffers and brute-force algorithm	2016	Journal of Asian Architecture and Building Engineering	15	2	215-222
Su Y., Lucko G.	Linear scheduling with multiple crews based on line-of-balance and productivity scheduling method with singularity functions	2016	Automation in Construction	70		38-50
Biruk S., Rzepecki L.	The impact of learning-forgetting phenomenon on duration of repetitive construction processes conducted in random conditions	2017	Scientific Review Engineering and Environmental Sciences	26	2	202-209

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
Anmar M.A., Abdel-Maged A.F.	Modeling of LOB scheduling with learning development effect	2018	International Journal of Construction Management	18	6	517–526
Jordan Srour F., Kiomjian D., Srour I.M.	Automating the Use of Learning Curve Models in Construction Task Duration Estimates	2018	Journal of Construction Engineering and Management	144	7	4018055
Salama T., Salah A., Moselhi O.	Integration of linear scheduling method and the critical chain project management	2018	Canadian Journal of Civil Engineering	45	1	30–40
Tokdemir O.B., Erol H., Dikmen I.	Delay Risk Assessment of Repetitive Construction Projects Using Line-of- Balance Scheduling and Monte Carlo Simulation	2019	Journal of Construction Engineering and Management	145	2	4018132
Moreno F., Orozo F., Rojas O., Senior B., Poshdar M., Forcael E.	A Fixed Start Scheduling Approach for Repetitive Construction Projects	2020	KSCE Journal of Civil Engineering	24	6	1671–1682
Zhang L., Dai G., Zou X., Qi J.	Robustness-based multi-objective optimization for repetitive projects under work continuity uncertainty	2020	Engineering, Construction and Architectural Management			

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
Minimalizacja czasu wykonywania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych						
Russell A.D., Caselton W.F.	Extensions to linear scheduling optimization	1988	Journal of Construction Engineering and Management	114	1	36–52
Leu S.-S., Hwang S.-T.	Optimal repetitive scheduling model with shareable resource constraint	2001	Journal of Construction Engineering and Management	127	4	270–280
Sawhney A., Mund A., Chaitavatputtipon T.	Petri Net-based scheduling of construction projects	2003	Civil Engineering and Environmental Systems	20	4	255–271
Hassanein A., Moselhi O.	Accelerating linear projects	2005	Construction Management and Economics	23	4	377–385
Nassar K.	Evolutionary optimization of resource allocation in repetitive construction schedules	2005	Electronic Journal of Information Technology in Construction	10		
Fan S.-L., Tserng H.P.	Object-oriented scheduling for repetitive projects with soft logics	2006	Journal of Construction Engineering and Management	132	1	35–48
Zhang H., Li H., Tam C.M.	Heuristic scheduling of resource-constrained, multiple-mode and repetitive projects	2006	Construction Management and Economics	24	2	159–169

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
Hsie M., Chang C.-J., Yang I.-T., Huang C.-Y.	Resource-constrained scheduling for continuous repetitive projects with time-based production units	2009	Automation in Construction	18	7	942-949
Liu S.-S., Wang C.-J.	Optimizing linear project scheduling with multi-skilled crews	2012	Automation in Construction	24		16-23
Zhang L., Qi J.	Controlling path and controlling segment analysis in repetitive scheduling method	2012	Journal of Construction Engineering and Management	138	11	1341-1345
Cho K., Hong T., Hyun C.T.	Space zoning concept-based scheduling model for repetitive construction process	2013	Journal of Civil Engineering and Management	19	3	409-421
Bakry I., Moselhi O., Zayed T.	Optimized acceleration of repetitive construction projects	2014	Automation in Construction	39		145-151
Lucko G., Said H.M.M., Bouferguene A.	Construction spatial modeling and scheduling with three-dimensional singularity functions	2014	Automation in Construction	43		132-143
Lee D., Kim D.-S., Kim G.-H., Kim S.	Time reduction effect of the enhanced TACT method for high-rise residential buildings	2016	Journal of Civil Engineering and Management	22	7	944-953

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Podolski M.	Management of resources in multiunit construction projects with the use of a tabu search algorithm	2017	Journal of Civil Engineering and Management	23	2	263–272
Radziszewska-Zielina E., Sroka B.	Planning repetitive construction projects considering technological constraints	2018	Open Engineering	8	1	500–505
Jaśkowski P., Biruk S.	Minimizing the Duration of Repetitive Construction Processes with Work Continuity Constraints	2019	Computation	7	1	14
Tran D.-H., Chou J.-S., Luong D.-L.	Optimizing non-unit repetitive project resource and scheduling by evolutionary algorithms	2020	Operational Research			
Minimalizacja kosztu realizacji powtarzalnego przedsięwzięcia budowlanego						
Moselhi O., El-Rayes K.	Scheduling of repetitive projects with cost optimization	1993	Journal of Construction Engineering and Management	119	4	681–697
Moselhi O., El-Rayes K.	Least cost scheduling for repetitive projects	1993	Canadian journal of civil engineering	20	5	834–843
Shtub A., LeBlanc L.J., Cai Z.	Scheduling programs with repetitive projects: A comparison of a simulated annealing, a genetic and a pair-wise swap algorithm	1996	European Journal of Operational Research	88	1	124–138

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Hegazy T., Wassef N.	Cost optimization in projects with repetitive nonserial activities	2001	Journal of Construction Engineering and Management	127	3	183–191
Hegazy T., Elhakeem A., Elbeltagi E.	Distributed scheduling model for infrastructure networks	2004	Journal of Construction Engineering and Management	130	2	160–167
Hegazy T., Kamarah E.	Efficient repetitive scheduling for high-rise construction	2008	Journal of Construction Engineering and Management	134	4	253–264
Ali M.M., Elazouni A.	Finance-based CPM/LOB scheduling of projects with repetitive non-serial activities	2009	Construction Management and Economics	27	9	839–856
Bożejko W., Hejducki Z., Wodecki M.	Applying metaheuristic strategies in construction projects management	2012	Journal of Civil Engineering and Management	18	5	621–630
Fan S.-L., Sun K.-S., Wang Y.-R.	GA optimization model for repetitive projects with soft logic	2012	Automation in Construction	21	1	253–261
Huang Y., Zou X., Zhang L.	Genetic algorithm-based method for the deadline problem in repetitive construction projects considering soft logic	2016	Journal of Management in Engineering	32	4	4016002

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T. Nr	Str. / Nr
Moselhi O., Bakry I., Alshibani A.	Accelerating repetitive construction projects: With uncertainty and contractors' judgment	2016	Canadian Journal of Civil Engineering	43 11	949–957
Abdallah M., Alshahri A.	Optimizing planning of build–operate–transfer projects to maximize investor profit	2019	Canadian Journal of Civil Engineering	46 1	26–37
Podolski M., Sroka B.	Cost optimization of multiunit construction projects using linear programming and metaheuristic-based simulated annealing algorithm	2019	Journal of Civil Engineering and Management	25 8	848–857
Zou X., Zhang L.	A constraint programming approach for scheduling repetitive projects with atypical activities considering soft logic	2020	Automation in Construction	109	102990
Pozostałe podejścia do harmonogramowania powtarzalnych przedsięwzięć budowlanych					
Kavanagh D.P.	Siren: A repetitive construction simulation model	1985	Journal of Construction Engineering and Management	111 3	308–323
Russell Alan D.	Microcomputers, Management, And High-Rise Construction: The Next Step	1985	Canadian journal of civil engineering	12 2	396–414
Adeli H., Karim A.	Scheduling/cost optimization and neural dynamics model for construction	1997	Journal of Construction Engineering and Management	123 4	450–458

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
El-Rayes K., Ramanathan R., Moselhi O.	An object-oriented model for planning and control of housing construction	2002	Construction Management and Economics	20	3	201–210
Yi K.J., Lee H.-S., Choi Y.K.	Network creation and development for repetitive-unit projects	2002	Journal of Construction Engineering and Management	128	3	257–264
Zhang H., Tam G.M., Shi J.J.	Simulation-based methodology for project scheduling	2002	Construction Management and Economics	20	8	667–678
Moselhi O., Hassanein A.	Optimized scheduling of linear projects	2003	Journal of Construction Engineering and Management	129	6	664–673
Dzeng R.J., Wang W.C., Tserng H.P.	Module-based construction schedule administration for public infrastructure agencies	2004	Journal of Construction Engineering and Management	130	1	5–14
Cheng T.-M., Feng C.-W., Chen Y.-L.	A hybrid mechanism for optimizing construction simulation models	2005	Automation in Construction	14	1	85–98
Huang R.-Y., Sun K.-S.	System development for non-unit based repetitive project scheduling	2005	Automation in Construction	14	5	650–665
Hyari K., El-Rayes K.	Optimal planning and scheduling for repetitive construction projects	2006	Journal of Management in Engineering	22	1	11–19

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
Tokdemir O.B., Arditi D., Balciak C.	ALISS: Advanced Linear Scheduling System	2006	Construction Management and Economics	24	12	1253–1267
Ipsilandis P.G.	Multiobjective linear programming model for scheduling linear repetitive projects	2007	Journal of Construction Engineering and Management	133	6	417–424
Liu S.-S., Wang C.-J.	Optimization model for resource assignment problems of linear construction projects	2007	Automation in Construction	16	4	460–473
Biruk S., Jaśkowski P.	Simulation modelling construction project with repetitive tasks using petri nets theory	2008	Journal of Business Economics and Management	9	3	219–226
Rogalska M., Bozejko W., Hejducki Z.	Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling	2008	Automation in Construction	18	1	24–31
Ezeldin A.S., Soliman A.	Hybrid time-cost optimization of nonserial repetitive construction projects	2009	Journal of Construction Engineering and Management	135	1	42–55
Hyari K.H., El-Rayes K., El-Mashaleh M.	Automated trade-off between time and cost in planning repetitive construction projects	2009	Construction Management and Economics	27	8	749–761

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
Liu S.-S., Wang C.-J.	Two-stage profit optimization model for linear scheduling problems considering cash flow	2009	Construction Management and Economics	27	11	1023–1037
Long L.D., Ohsato A.	A genetic algorithm-based method for scheduling repetitive construction projects	2009	Automation in Construction	18	4	499–511
Abd El Razeq R.H., Diab A.M., Hafez S.M., Aziz R.F.	Time-cost-quality trade-off software by using simplified Genetic algorithm for typical-repetitive construction projects	2010	World Academy of Science, Engineering and Technology	61		312–321
Cho K., Hong T., Hyun C.	Integrated schedule and cost model for repetitive construction process	2010	Journal of Management in Engineering	26	2	78–88
Lee H.-S., Roh S., Park M.-S., Ryu H.-G.	Optimal Option Selection for Finishing Works of High-Rise Building	2010	KSCE Journal of Civil Engineering	14	5	639–651
Cho K., Hong T., Hyun C.	Scheduling model for repetitive construction processes for high-rise buildings	2011	Canadian Journal of Civil Engineering	38	1	36–48

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. /Nr
Han S., Lee S., Peña-Mora F.	Identification and quantification of non-value-adding effort from errors and changes in design and construction projects	2012	Journal of Construction Engineering and Management	138	1	98–109
Abdallah M., Marzouk M.	Planning of tunneling projects using computer simulation and fuzzy decision making	2013	Journal of Civil Engineering and Management	19	4	591–607
Agrama F.A.	Multi-objective genetic optimization for scheduling a multi-storey building	2014	Automation in Construction	44		119–128
Hajdasz M.	Flexible management of repetitive construction processes by an intelligent support system	2014	Expert Systems with Applications	41	4	962–973
Hegazy T., Abdel-Monem M., Saad D.A.	Framework for enhanced progress tracking and control of linear projects	2014	Engineering, Construction and Architectural Management	21	1	94–110
Hu D., Mohamed Y.	Simulation-model-structuring methodology for industrial construction fabrication shops	2014	Journal of Construction Engineering and Management	140	5	4014002
Zhang L., Zou X., Qi J.	A trade-off between time and cost in scheduling repetitive construction projects	2015	Journal of Industrial and Management Optimization	11	4	1423–1434

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Lucko G., Araújo L.G., Cates G.R.	Slip Chart-Inspired Project Schedule Diagramming: Origins, Buffers, and Extension to Linear Schedules	2016	Journal of Construction Engineering and Management	142	5	4015101
Eiris Pereira R., Flood I.	Impact of linear correlation on construction project performance using stochastic linear scheduling	2017	Visualization in Engineering	5	1	8
Zou X., Fang S.-C., Huang Y.-S., Zhang L.-H.	Mixed-Integer Linear Programming Approach for Scheduling Repetitive Projects with Time-Cost Trade-Off Consideration	2017	Journal of Computing in Civil Engineering	31	3	6016003
Altuwaim A., El-Rayes K.	Minimizing duration and crew work interruptions of repetitive construction projects	2018	Automation in Construction	88		59–72
Eid M.S., Elbeltagi E.E., El-Adaway I.H.	Simultaneous multi-criteria optimization for scheduling linear infrastructure projects	2018	International Journal of Construction Management			
Sharma S., Bansal V.K.	Location-based planning and scheduling of highway construction projects in hilly terrain using GIS	2018	Canadian Journal of Civil Engineering	45	7	570–582
Tran D.-H., Luong-Duc L., Duong M.-T., Le T.-N., Pham A.-D.	Opposition multiple objective symbiotic organisms search (OMOSOS) for time, cost, quality and work continuity tradeoff in repetitive projects	2018	Journal of Computational Design and Engineering	5	2	160–172

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
García-Nieves J.D., Ponz-Tienda J.L., Ospina-Alvarad o A., Bonilla-Palacios M.	Multipurpose linear programming optimization model for repetitive activities scheduling in construction projects	2019	Automation in Construction	105		102799
Heravi G, Moridi S.	Resource-Constrained Time-Cost Tradeoff for Repetitive Construction Projects	2019	KSCE Journal of Civil Engineering	23	8	3265–3274
Salama T., Mosehli O.	Multi-objective optimization for repetitive scheduling under uncertainty	2019	Engineering, Construction and Architectural Management	26	7	1294–1320
Tomar A., Bansal V.K.	Generation, visualization, and evaluation schedule of repetitive construction projects using GIS	2019	International Journal of Construction Management			
Tomar A., Bansal V.K.	Scheduling of repetitive construction projects using geographic information systems: an integration of critical path method and line of balance	2019	Asian Journal of Civil Engineering	20	4	549–562

c. d. Tabeli A.1. Przyporządkowanie poszczególnych artykułów do kategorii

Autorzy	Tytuł	Rok	Czasopismo	T.	Nr	Str. / Nr
Tomczak M.	Modeling of the harmonization method for executing a multi-unit construction project	2019	Open Engineering	9	1	282–291
Tran D.-H., Chou J.-S., Luong D.-L.	Multi-objective symbiotic organisms optimization for making time-cost tradeoffs in repetitive project scheduling problem	2019	Journal of Civil Engineering and Management	25	4	322–339
Wang T., Abdallah M., Clevenger C., Morghasemi S.	Time-cost-quality trade-off analysis for planning construction projects	2019	Engineering, Construction and Architectural Management			
Tomar A., Bansal V.K.	A Novel Step Toward Repetitive Projects Scheduling Using Geographic Information Systems	2020	Arabian Journal for Science and Engineering	45	5	3983–3997

Załącznik B

KWESTIONARIUSZ DOTYCZĄCY HARMONOGRAMOWANIA I ORGANIZACJI PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH

I. PYTANIA METRYCZKOWE

1. Jakie Pan/Pani zajmuje stanowisko?
 kierownik budowy kierownik robót
 inżynier budowy kierownik kontraktu
 majster inne, jakie?
2. Jak długo zajmuje Pan/Pani wyżej wymienione stanowisko?
.....
3. Jak długo pracuje Pan/Pani w branży budowlanej?
.....
4. Jaka jest przeciętna wielkość budowy (wyrażona w milionach złotych) realizowanej przez Pana/Panią?
.....

II. PYTANIA WPROWADZAJĄCE

5. Czy w procesie realizacji inwestycji/budowy wykorzystuje Pan/Pani harmonogramy?
 tak nie
W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „nie” należy pominąć pytania nr 6–11.
6. Kto jest odpowiedzialny za opracowanie harmonogramu?
 inwestor kierownik budowy inżynier budowy
 dział przygotowania produkcji inny, jaki?
7. Z jakich powodów tworzony jest harmonogram?
 obowiązek narzucony przez inwestora
 obowiązek wynikły z procedur przetargowych
 ułatwienie pracy kierownictwa budowy
 narzędzie synchronizacji pracy brygad
 ustalenie terminów zatrudnienia podwykonawców/brygad
 podstawa do opracowania planów dostaw
 inny, jaki?

8. Czy harmonogram jest aktualizowany?
- tak, jak często?
- nie
- W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „nie” należy pominąć pytanie nr 9.**
9. Czy aktualizacje harmonogramu odbywają się z ustaloną odgórnie częstotliwością?
- tak nie
10. Czy w przypadku opóźnień względem harmonogramu podejmowane są plany naprawcze?
- tak, jakie?
- nie
11. Jakie narzędzia są stosowane do wspomagania harmonogramowania robót?
- MS Project ProjectLibre Planista
- Primavera inne, jakie?
- nie wykorzystuje się takich narzędzi

III. PRZERWY W PRACY BRYGAD

12. Jak ważne jest dla Pana/Pani zachowanie ciągłości pracy brygad?
- bardzo ważne ważne raczej ważne trudno powiedzieć
- raczej mało ważne mało ważne bardzo mało ważne
- W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „bardzo ważne”, „ważne” bądź „raczej ważne” należy wypełnić pytanie nr 13.**
13. Dlaczego zapewnienie ciągłości pracy brygad jest ważne? Proszę wymienić co najmniej jeden powód.
-
-
14. Jak często zdarzają się przerwy w pracy brygad?
- zawsze czasami rzadko nigdy
- W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „nigdy” należy pominąć pytanie nr 15–17.**
15. Czy przestoje w pracy brygad związane są z dodatkowymi kosztami ponoszonymi przez Pana/Pani firmę?
- tak, jakimi?
- nie

16. Jakie zadania wykonują brygady w trakcie przerw?

.....
.....

17. Jak przerwy w pracy wpływają na morale pracowników?

- pozytywnie raczej pozytywnie trudno powiedzieć
 raczej negatywnie negatywnie

IV. ORGANIZACJA PRACY NA BUDOWIE

18. Czy stosuje Pan/Pani metody organizacji pracy na budowie?

- tak, jakie nie

19. Jak ważne jest dla Pana/Pani zachowanie ciągłości pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie?

- bardzo ważne ważne raczej ważne trudno powiedzieć
 raczej mało ważne mało ważne bardzo mało ważne

W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „bardzo ważne”, „ważne” bądź „raczej ważne” należy wypełnić pytanie nr 20.

20. Dlaczego zapewnienie ciągłości pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie jest ważne? Proszę wymienić co najmniej jeden powód.

.....
.....

21. Jak często zdarzają się przerwy w pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie?

- zawsze czasami rzadko nigdy

W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „nigdy” należy pominąć pytanie nr 22.

22. Czy inwestor kontroluje postępy prac na froncie robót/działce roboczej/obiekcie?

- tak, w jaki sposób?
.....
 nie

V. TERMIN REALIZACJI INWESTYCJI

23. Jak ważne jest dla Pana/Pani zachowanie terminu realizacji inwestycji?
- bardzo ważne ważne raczej ważne trudno powiedzieć
 raczej mało ważne mało ważne bardzo mało ważne
- W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „bardzo ważne”, „ważne” bądź „raczej ważne” należy wypełnić pytanie nr 24.**
24. Dlaczego zachowanie terminu realizacji inwestycji jest ważne?
Proszę wymienić co najmniej jeden powód.
.....
25. Na jakim procencie budów realizowanych przez Pana zdarzało się niedotrzymanie terminu realizacji inwestycji?
.....
W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „0%” należy pominąć pytanie nr 26.
26. Ile (średnio) procent względem pierwotnego terminu zakończenia budowy wynosi wydłużenie w realizacji inwestycji?
.....
27. Jakie stosuje Pan/Pani sposoby na unikanie opóźnień w realizacji inwestycji?
.....
28. Czy za zakończenie budowy przed terminem określonym w umowie zdarzają się premie dla wykonawcy (często, rzadko)? W jakiej wysokości bywają te premie (Proszę podać procent wartości kontraktu)?
.....
29. Ile (średnio) wynoszą kary umowne za opóźnienia w realizacji inwestycji (w złotych za każdy dzień opóźnienia)?
.....
30. Jaki procent uposażenia podstawowego w Pana/Pani firmie stanowią premie finansowe dla osób zarządzających budową za skrócenie czasu trwania realizacji inwestycji (względem terminu umownego)?
.....

- 31.** Co jest dla Pana/Pani ważniejsze: zachowanie ciągłości w pracy brygad czy zachowanie ciągłości w pracy na froncie robót?
- zdecydowanie zachowanie ciągłości w pracy brygad
 - raczej zachowanie ciągłości w pracy brygad
 - trudno powiedzieć
 - raczej zachowanie ciągłości w pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie
 - zdecydowanie zachowanie ciągłości w pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie
- 32.** Co jest dla Pana/Pani ważniejsze: zachowanie ciągłości w pracy brygad czy zachowanie terminu realizacji inwestycji?
- zdecydowanie zachowanie ciągłości w pracy brygad
 - raczej zachowanie ciągłości w pracy brygad
 - trudno powiedzieć
 - raczej zachowanie terminu realizacji inwestycji
 - zdecydowanie zachowanie terminu realizacji inwestycji
- 33.** Co jest dla Pana/Pani ważniejsze: zachowanie ciągłości w pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie czy zachowanie terminu realizacji inwestycji?
- zdecydowanie zachowanie ciągłości w pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie
 - raczej zachowanie ciągłości w pracy na froncie robót
 - trudno powiedzieć
 - raczej zachowanie terminu realizacji inwestycji
 - zdecydowanie zachowanie terminu realizacji inwestycji

VI. DOBÓR BRYGAD DO ZADAŃ

- 34.** Czy w Pana/Pani firmie istnieją stałe składy brygad, które są przypisywane do realizacji poszczególnych zadań, czy każdorazowo składy brygad są dobierane pod konkretne zadanie?
- stałe składy brygad roboczych
 - brak stałych składów brygad roboczych
 - brygady obejmują kilka zespołów roboczych o stałym składzie (liczba zespołów zależy od wielkości zadania)
 - system mieszany trudno powiedzieć

- 35.** Jakiego rodzaju brygady występują w Pana/Pani firmie?
- wielobranżowe branżowe specjalistyczne
 kompleksowe trudno powiedzieć
- 36.** Jaki procent zadań w inwestycjach w których bierze Pan/Pani udział wykonują podwykonawcy (mierzonej wartością wykonanych prac)?
.....
- 37.** Jaki sposób rozliczania się z pracownikami dominuje w Pana/Pani firmie?
- wynagrodzenie wg czasu pracy (stawka za godzinę pracy)
 system akordowy
 stałe wynagrodzenie miesięczne inne, jakie?

Załącznik C

Tabela C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
1	Jakie Pan/Pani zajmuje stanowisko?	inżynier budowy	28 (38%)
		kierownik budowy	15 (20%)
		kierownik robót	14 (19%)
		majster	12 (16%)
		kierownik kontraktu	5 (7%)
		inspektor nadzoru inwestorskiego	2 (3%)
		projektant	2 (3%)
		kosztorysant	1 (1%)
		2	Jak długo zajmuje Pan/Pani wyżej wymienione stanowisko?
od 1 roku do mniej niż 5 lat	36 (49%)		
od 5 lat do mniej niż 10 lat	14 (19%)		
10 lat i więcej	6 (8%)		
3	Jak długo pracuje Pan/Pani w branży budowlanej?	mniej niż 1 rok	5 (7%)
		od 1 roku do mniej niż 5 lat	31 (42%)
		od 5 lat do mniej niż 10 lat	18 (24%)
		10 lat i więcej	20 (27%)
4	Jaka jest przeciętna wartość kontraktu (wyrażona w milionach złotych) przy realizacji którego Pan/Pani uczestniczy?	mniej niż 1 mln zł	10 (15%)
		od 1 mln zł do mniej niż 5 mln zł	17 (23%)
		od 5 mln zł do mniej niż 20 mln zł	20 (27%)
		od 20 mln zł do mniej niż 100 mln zł	15 (20%)
5	Czy w procesie realizacji inwestycji/budowy wykorzystuje Pan/Pani harmonogramy? W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „nie” należy pominąć pytania nr 6–11.	tak	59 (80%)
		nie	15 (20%)
6	Kto jest odpowiedzialny za opracowanie	kierownik budowy	41 (57%)
		inżynier budowy	12 (17%)

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
	harmonogramu (inwestor, kierownik budowy, inżynier budowy)?	dział przygotowania produkcji	11 (15%)
		inwestor	7 (10%)
		kierownik kontraktu	1 (1%)
7	Z jakich powodów tworzony jest harmonogram?	narzędzie synchronizacji pracy brygad	24 (40%)
		ułatwienie pracy kierownictwa budowy	24 (40%)
		ustalenie terminów zatrudnienia	23 (38%)
		podwykonawców/brygad	
		obowiązek narzucony przez inwestora	22 (37%)
		podstawa do opracowania planów dostaw	19 (32%)
		obowiązek wynikły z procedur przetargowych	15 (25%)
		kontrola postępu prac i opóźnień	1 (2%)
		kontrola terminu wykonania zadania	1 (2%)
		kontrola budżetu	1 (2%)
8		Czy harmonogram jest aktualizowany? Jeśli tak, to jak często? W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „nie” należy pominąć pytanie nr 9.	nie
	tak, na bieżąco		14 (23%)
	tak, raz na miesiąc lub raz na dwa miesiące		11 (18%)
	tak, raz na tydzień lub raz na dwa tygodnie		10 (16%)
	tak, w miarę potrzeb		6 (9%)
	tak		2 (3%)
9	Czy aktualizacje harmonogramu odbywają się z ustaloną ogólnie częstotliwością?	nie	32 (68%)
		tak	16 (33%)

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
10	Czy w przypadku opóźnień względem harmonogramu podejmowane są działania naprawcze?	nie	59 (32%)
		tak, zatrudnienie podwykonawców	22 (37%)
		tak, przesunięcie brygad z innych budów	20 (34%)
		tak	16 (27%)
		tak, zmiana technologii	9 (15%)
		tak, zastosowanie bardziej wydajnych maszyn	6 (10%)
		tak, negocjacje z inwestorem	2 (3%)
		tak, praca w nadgodzinach i w dni wolne	1 (2%)
11	Jakie narzędzia są stosowane do wspomaganie harmonogramowania robót?	MS Project	27 (45%)
		nie wykorzystuje się takich narzędzi	24 (40%)
		MS Excel	13 (22%)
		Primavera	3 (5%)
		Planista	1 (2%)
		ProjectLibre	1 (2%)
12	Jak ważne jest dla Pana/Pani zachowanie ciągłości pracy brygad? W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „bardzo ważne”, „ważne” bądź „raczej ważne” należy wypełnić pytanie nr 13.	bardzo ważne	43 (58%)
		ważne	28 (38%)
		raczej ważne	2 (3%)
		trudno powiedzieć	1 (1%)
13	Dlaczego zapewnienie ciągłości pracy brygad jest ważne? Proszę wymienić co najmniej jeden powód.	ponoszenie kosztów przerzutu brygad na inne budowy	31 (43%)
		konieczność wypłaty wynagrodzenia dla pracowników nie rozliczanych ryczałtem	29 (40%)

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
		ponoszenie kosztów pośrednich/ zależnych od czasu mimo przerwy w pracy	22 (31%)
		niebezpieczeństwo rozpoczęcia realizacji nowego zlecenia przez podwykonawcę na innej budowie	18 (25%)
		obniżenie wydajności pracy po przerwie	16 (22%)
		wzrost zagrożenia dochowania terminu umownego	12 (17%)
		zwiększa efektywność pracowników, brak potrzeby przyuczania nowych pracowników, brak zagrożenia zwolnienia się pracowników	2 (3%)
14	Jak często zdarzają się przerwy w pracy brygad? W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „nigdy” należy pominąć pytania nr 15–17.	rzadko	35 (47%)
		czasami	29 (39%)
		nigdy	7 (9%)
		zawsze	1 (1%)
15	Czy przestoje w pracy brygad związane są z dodatkowymi kosztami ponoszonymi przez Pana/Pani firmę?	tak, zwiększone koszty stałe budowy	29 (45%)
		nie	16 (25%)
		tak, obniżona wydajność pracowników	12 (19%)
		tak, koszt przerwania pracowników na inną budowę	10 (16%)
		tak	5 (8%)
		tak, koszt przestoju sprzętu	2 (3%)

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
16	Jakie zadania wykonują brygady w trakcie przerw?	przydzielanie innych, drugorzędnych zadań	32 (50%)
		przenoszenie na inne budowy	30 (47%)
		rozbijanie brygady i dołączanie pracowników do innych zadań	12 (19%)
		wysłanie pracowników na urlop	2 (3%)
		nie dotyczy	2(3%)
17	Jak przerwy w pracy wpływają na morale pracowników?	trudno powiedzieć	32 (46%)
		raczej negatywnie	15 (22%)
		negatywnie	12 (17%)
		raczej pozytywnie	7 (10%)
		pozytywnie	1 (1%)
18	Czy stosuje Pan/Pani metody organizacji pracy na budowie?	nie	67 (92%)
		Metoda pracy równomiernej	5 (7%)
		Line of Balance	2 (3%)
19	Jak ważne jest dla Pana/Pani zachowanie ciągłości pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie (i tym samym minimalizacja czasu realizacji działki)? W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „bardzo ważne”, „ważne” bądź „raczej ważne” należy wypełnić pytanie nr 20.	ważne	30 (41%)
		bardzo ważne	29 (39%)
		raczej ważne	12 (16%)
		trudno powiedzieć	2 (3%)
		mało ważne	1 (1%)

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
20	Dlaczego minimalizacja przestojów w pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie (i tym samym minimalizacja czasu realizacji działki) jest ważna? Proszę wymienić co najmniej jeden powód.	wydłużają czas realizacji całej budowy	42 (62%)
		ponoszenie kosztów zależnych od czasu	34 (50%)
		inwestor odnosi wrażenie, że wykonawca nie posiada odpowiednich zasobów	13 (19%)
		niezadowolenie opinii publicznej	11 (16%)
		konieczność zapewnienia innej pracy brygadam	6 (9%)
		może świadczyć o złym planowaniu przez kadrę kierowniczą	3 (4%)
		21	Jak często zdarzają się przerwy w pracy na froncie robót/działce roboczej/obiekcie? W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „nigdy” należy pominąć pytanie nr 22.
czasami	31 (42%)		
nigdy	6 (8%)		
22	Czy inwestor kontroluje postępy prac na froncie robót/działce roboczej/obiekcie?	tak, poprzez nadzór inwestorski	30 (46%)
		nie	28 (43%)
		tak, sprawdzanie postępu robót zgodnie z harmonogramem w założonych odstępach czasowych	14 (22%)
		tak, wizytacje lokalne	11 (17%)
		tak, narady budowy	5 (8%)
		tak	2 (3%)
		23	Jak ważne jest dla Pana/Pani zachowanie terminu realizacji inwestycji? W przypadku zaznaczenia odpowiedzi
ważne	17 (23%)		
raczej ważne	4 (5%)		
trudno powiedzieć	2 (3%)		

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
	„bardzo ważne”, „ważne” bądź „raczej ważne” należy wypełnić pytanie nr 24.		
24	Dlaczego zachowanie terminu / skrócenie czasu realizacji inwestycji jest ważne? Proszę wymienić co najmniej jeden powód.	kary umowne	55 (77%)
		wzrost kosztów zależnych od czasu	38 (54%)
		obniżenie reputacji firmy	23 (32%)
		brak premii	14 (20%)
		umożliwienie wykonania robót zgodnie z technologią w sprzyjających warunkach atmosferycznych	4 (6%)
		jak najszybsze otrzymanie zapłaty	3 (4%)
		indywidualny cel i satysfakcja z dobrze zrealizowanego projektu	2 (3%)
25	W przypadku ilu budów (w %) budów realizowanych przez Pana/Panią zdarzało się niedotrzymanie terminu realizacji inwestycji? W przypadku zaznaczenia odpowiedzi „0%” należy pominąć pytanie nr 26.	0%	30 (42%)
		więcej niż 0% i mniej niż 50%	23 (32%)
		co najmniej 50% i mniej niż 100%	14 (20%)
		100%	4 (6%)
26	Ile (średnio) procent względem pierwotnego terminu zakończenia budowy wynosi wydłużenie w realizacji inwestycji?	mniej niż 10%	10 (24%)
		co najmniej 10% i mniej niż 20%	23 (56%)
		co najmniej 20% i mniej niż 50%	5 (12%)
		co najmniej 50%	3 (7%)

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
27	Jakie stosuje Pan/Pani sposoby na unikanie opóźnień w realizacji inwestycji?	zaangażowanie	49 (66%)
		dotychczasowych zasobów	
		zmiana organizacji pracy	35 (47%)
		zmiana technologii robót	14 (19%)
28	Czy za zakończenie budowy przed terminem określonym w umowie zdarzają się premie dla wykonawcy (często, rzadko)? W jakiej wysokości bywają te premie (Proszę podać procent wartości kontraktu)?	zwiększona mobilizacja pracowników od samego początku realizacji budowy	1 (1%)
		nigdy	32 (44%)
		nie wiem	15 (21%)
		rzadko, do 5%	15 (21%)
		do 2,5%	2 (3%)
29	Ile (średnio) wynoszą kary umowne za opóźnienia w realizacji inwestycji (w złotych lub w % wartości kontraktu za każdy dzień opóźnienia)?	do 20% zysku	2 (3%)
		co najmniej 0,5%	11 (17%)
		więcej niż 0% i mniej niż 0,5%	11 (17%)
		10 000 zł i więcej	13 (20%)
		co najmniej 2000 zł i mniej niż 10 000 zł	10 (16%)
		nie wiem	10 (16%)
		do 2000 zł	5 (8%)
0 zł	3 (5%)		
30	Jaki procent uposażenia podstawowego w Pana/Pani firmie stanowią premie finansowe dla osób zarządzających budową za skrócenie czasu trwania realizacji inwestycji (względem terminu umownego)?	0%	34 (51%)
		więcej niż 0% i mniej niż 10%	6 (9%)
		co najmniej 10 % i mniej niż 20%	13 (19%)
		20% i więcej	6 (9%)
		nie wiem	13 (19%)

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
31	Co jest dla Pana/Pani ważniejsze: zachowanie ciągłości w pracy brygad czy minimalizacja czasu wykonania robót i redukcja przestojów na froncie robót?	raczej minimalizacja czasu wykonania robót na froncie robót/działce roboczej/obiekcie	27 (38%)
		raczej zachowanie ciągłości w pracy brygad	15 (21%)
		zdecydowanie minimalizacja czasu wykonania robót na froncie robót/działce roboczej/obiekcie	11 (15%)
		zdecydowanie zachowanie ciągłości w pracy brygad	9 (13%)
		trudno powiedzieć	8 (11%)
32	Co jest dla Pana/Pani ważniejsze: zachowanie ciągłości w pracy brygad czy zachowanie terminu realizacji inwestycji?	zdecydowanie zachowanie terminu realizacji inwestycji	35 (48%)
		raczej zachowanie terminu realizacji inwestycji	27 (37%)
		raczej zachowanie w ciągłości pracy brygad	4 (5%)
		zdecydowanie zachowanie ciągłości w pracy brygad	3 (4%)
		trudno powiedzieć	2 (3%)
33	Co jest dla Pana/Pani ważniejsze: minimalizacja czasu wykonania robót na froncie robót/działce roboczej/obiekcie czy zachowanie terminu realizacji inwestycji?	zdecydowanie zachowanie terminu realizacji inwestycji	36 (50%)
		raczej zachowanie terminu realizacji inwestycji	25 (35%)
		trudno powiedzieć	4 (6%)
		raczej minimalizacja czasu wykonania robót na froncie robót/działce roboczej/obiekcie	3 (4%)

c. d. Tabeli C.1. Zestaw pytań ankietowych oraz wynik przeprowadzonych badań

Nr	Treść pytania	Udzielone odpowiedzi	Uzyskane odpowiedzi i ich procentowy udział
		zdecydowanie minimalizacja czasu wykonania robót na froncie robót/działce roboczej/obiekcie	2 (3%)
34	Czy w Pana/Pani firmie istnieją stałe składy brygad, które są przypisywane do realizacji poszczególnych zadań, czy każdorazowo składy brygad są dobierane pod konkretne zadanie?	stałe składy brygad roboczych	23 (32%)
		system mieszany	20 (28%)
		brygady obejmują kilka zespołów o stałym składzie	9 (13%)
		brak stałych składów roboczych brygad	5 (7%)
		trudno powiedzieć	1 (1%)
35	Jakie rodzaje brygad występują w Pana/Pani firmie?	branżowe	29 (40%)
		specjalistyczne	17 (23%)
		wielobranżowe	16 (22%)
		kompleksowe	7 (10%)
		trudno powiedzieć	3 (4%)
36	Jaki procent zadań w inwestycjach w których bierze Pan/Pani udział wykonują podwykonawcy (mierzony wartością wykonanych prac)?	0%	1 (1%)
		mniej niż 25%	18 (25%)
		co najmniej 25% i mniej niż 50%	13 (18%)
		co najmniej 50% i mniej niż 75%	19 (26%)
		co najmniej 75%	21 (29%)
37	Jaki sposób rozliczania się z pracownikami dominuje w Pana/Pani firmie?	wynagrodzenie według czasu pracy	49 (67%)
		stałe wynagrodzenie miesięczne	16 (22%)
		system akordowy	7 (10%)
		umowa na realizację poszczególnych zadań	2 (3%)

Załącznik D

Tabela D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\bar{K}	\bar{R}	\bar{R}	\bar{R}	\bar{c}_1^x	\bar{c}_2^x	\bar{c}_1^x	\bar{c}_2^x	\bar{c}_1^w	\bar{c}_2^w	$\bar{\omega}_2^w$	$\bar{\omega}_2^{\max}$	$\bar{\omega}^{\min}$	\bar{v}_x^{\max}	\bar{v}_w^{\max}	\bar{v}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\alpha,p}$	
1	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,5	1,5	1,5	nie	nie	213	98	892	0,56
2	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,5	1,5	1,5	nie	nie	213	22	875	1,11
3	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,5	1,5	1,5	nie	nie	213	125	888	0,43
4	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1	1,5	1,5	nie	nie	213	22	876	1,26
5	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1	1,5	1,5	nie	nie	213	122	890	0,41
6	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1	1,5	1,5	nie	nie	213	22	875	1,52
7	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	0,5	1,5	1,5	nie	nie	213	22	891	1,12
8	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	0,5	1,5	1,5	nie	nie	213	98	875	0,50
9	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	0,5	1,5	1,5	nie	nie	213	98	875	0,54
10	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,2	1,5	1,5	nie	nie	213	98	875	0,50
11	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,2	1,5	1,5	nie	nie	213	122	877	0,48
12	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,2	1,5	1,5	nie	nie	213	98	875	0,51
13	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	0,8	1,5	1,5	nie	nie	213	98	875	0,56
14	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	0,8	1,5	1,5	nie	nie	213	22	877	1,15
15	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	0,8	1,5	1,5	nie	nie	213	98	875	0,63
16	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1	1	1,5	1,5	nie	nie	213	128	892	0,40

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\tilde{K}	\tilde{R}	\tilde{R}	\tilde{c}_1^x	\tilde{c}_2^x	\tilde{c}_1^w	\tilde{c}_2^w	$\hat{\omega}_2^w$	$\hat{\omega}_2^{\max}$	$\hat{\omega}^{\min}$	\tilde{V}_x^{\max}	\tilde{V}_w^{\max}	\tilde{V}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\bar{m},\bar{s}}$
17	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1	1	1,5	nie	nie	213	98	899	0,56
18	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1	1	1,5	nie	nie	213	22	876	2,18
19	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	0,5	1	1,5	nie	nie	213	22	875	1,16
20	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	0,5	1	1,5	nie	nie	213	22	887	1,54
21	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	0,5	1	1,5	nie	nie	213	124	889	0,39
22	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,5	nie	nie	213	22	875	1,33
23	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,5	nie	nie	213	22	875	1,30
24	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,5	nie	nie	213	22	876	1,98
25	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	2,00
26	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	876	1,44
27	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	2,03
28	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,3	nie	nie	213	122	875	0,44
29	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,3	nie	nie	213	22	892	1,31
30	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,3	1	1,3	nie	nie	213	98	876	0,51
31	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	1	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	122	875	0,41
32	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	1	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	123	892	0,50
33	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	1	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	892	2,00

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\tilde{K}	\tilde{R}	\tilde{R}	\tilde{c}_1^x	\tilde{c}_2^x	\tilde{c}_1^w	\tilde{c}_2^w	$\hat{\omega}_2^w$	$\hat{\omega}_2^{\max}$	$\hat{\omega}_x^{\min}$	\tilde{V}_x^{\max}	\tilde{V}_w^{\max}	\tilde{V}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\alpha,\rho}$
34	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,8	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	892	2,00
35	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,8	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	875	0,56
36	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,8	0,3	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	875	0,48
37	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,4	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	877	1,13
38	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,4	1,3	1	1,7	nie	nie	216	22	906	1,72
39	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,4	1,3	1	1,7	nie	nie	213	128	875	0,49
40	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,5	1,3	1	1,7	nie	nie	213	128	877	0,44
41	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,5	1,3	1	1,7	nie	nie	213	26	899	1,67
42	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,5	1,3	1	1,7	nie	nie	213	26	899	1,73
43	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	876	1,93
44	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	1,43
45	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	876	1,86
46	20	1	2000	-	-	2	2	2,2	1,8	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	876	1,25
47	20	1	2000	-	-	2	2	2,2	1,8	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	1,16
48	20	1	2000	-	-	2	2	2,2	1,8	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	875	0,55
49	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	877	1,22
50	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	1,72

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\tilde{K}	\tilde{R}	\tilde{R}	\tilde{c}_1^x	\tilde{c}_2^x	\tilde{c}_1^w	\tilde{c}_2^w	$\hat{\omega}^{\max}$	$\hat{\omega}^{\min}$	\tilde{V}_x^{\max}	\tilde{V}_w^{\max}	\tilde{V}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\alpha,\rho}$		
51	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	1,17
52	20	1	2000	-	-	2	2	1,9	2,1	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	875	0,59
53	20	1	2000	-	-	2	2	1,9	2,1	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	122	875	0,54
54	20	1	2000	-	-	2	2	1,9	2,1	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	877	0,61
55	20	1	2000	-	-	2	2	1,7	2,3	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	892	1,22
56	20	1	2000	-	-	2	2	1,7	2,3	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	889	1,93
57	20	1	2000	-	-	2	2	1,7	2,3	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	892	0,56
58	20	1	2000	-	-	1,8	2,2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	885	1,43
59	20	1	2000	-	-	1,8	2,2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	1,07
60	20	1	2000	-	-	1,8	2,2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	122	875	0,52
61	20	1	2000	-	-	1,8	2,1	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	876	1,92
62	20	1	2000	-	-	1,8	2,1	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	117	875	0,51
63	20	1	2000	-	-	1,8	2,1	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	885	1,22
64	20	1	2000	-	-	2,2	1,8	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	890	0,60
65	20	1	2000	-	-	2,2	1,8	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	24	892	1,13
66	20	1	2000	-	-	2,2	1,8	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	1,76
67	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,8	2,2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	875	1,09

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\tilde{K}	\tilde{R}	\tilde{R}	\tilde{c}_1^x	\tilde{c}_2^x	\tilde{c}_1^w	\tilde{c}_2^w	$\hat{\omega}^{\max}$	$\hat{\omega}^{\min}$	\tilde{V}_x^{\max}	\tilde{V}_w^{\max}	\tilde{V}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\alpha,\rho}$		
68	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,8	2,2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	892	1,87
69	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,8	2,2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	882	1,11
70	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,9	2,1	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	876	1,58
71	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,9	2,1	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	892	1,20
72	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,9	2,1	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	892	1,20
73	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,7	2,3	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	24	875	1,16
74	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,7	2,3	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	875	0,67
75	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,7	2,3	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	877	0,55
76	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2,2	1,8	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	875	0,57
77	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2,2	1,8	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	877	2,07
78	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2,2	1,8	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	98	875	0,51
79	20	2	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	23	879	1,50
80	20	2	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	876	1,23
81	20	2	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	nie	nie	213	22	888	2,03
82	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,15
83	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,29
84	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	876	1,22

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\tilde{K}	\tilde{R}	\tilde{R}	\tilde{c}_1^x	\tilde{c}_2^x	\tilde{c}_1^w	\tilde{c}_2^w	\hat{c}_1^w	\hat{c}_2^w	$\hat{\omega}^{\max}$	$\hat{\omega}^{\min}$	\tilde{V}_x^{\max}	\tilde{V}_w^{\max}	\tilde{V}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\alpha,\rho}$
85	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,5	1,5	Tak	nie	213	28	900	1,16
86	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,5	1,5	Tak	nie	213	24	875	1,26
87	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	0,9	0,3	1,5	1,5	1,5	Tak	nie	213	22	875	1,16
88	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1,2	1,7	Tak	nie	213	24	899	1,33
89	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1,2	1,7	Tak	nie	214	24	875	1,33
90	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1,2	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,10
91	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	0,8	1,7	Tak	nie	213	24	892	1,37
92	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	0,8	1,7	Tak	nie	213	24	890	1,14
93	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	0,8	1,7	Tak	nie	213	22	877	1,36
94	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,5	Tak	nie	213	22	875	1,30
95	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,5	Tak	nie	213	28	875	1,18
96	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,5	Tak	nie	213	22	890	1,08
97	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,9	Tak	nie	213	22	877	1,18
98	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,9	Tak	nie	213	22	890	1,10
99	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,9	Tak	nie	213	24	875	1,26
100	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,5	1	1,7	Tak	nie	213	22	877	1,41
101	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,5	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,06

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\bar{K}	\bar{R}	\bar{R}	\bar{c}_1^x	\bar{c}_2^x	\bar{c}_1^w	\bar{c}_2^w	$\hat{\omega}^{\max}$	$\hat{\omega}^{\min}$	\bar{v}_x^{\max}	\bar{v}_w^{\max}	\bar{v}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\bar{m},\bar{s}}$		
102	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,5	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,21
103	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,1	1	1,7	Tak	nie	213	22	892	1,30
104	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,1	1	1,7	Tak	nie	213	22	890	1,12
105	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,1	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,34
106	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,2	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,13
107	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,2	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,61
108	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,2	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,09
109	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,5	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,42
110	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,5	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,28
111	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,5	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,33
112	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,8	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	876	1,51
113	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,8	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,33
114	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,8	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	876	1,25
115	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,7	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	876	1,14
116	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,7	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	890	1,14
117	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,7	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	876	1,18
118	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,29

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\bar{K}	\bar{R}	\bar{R}	\bar{c}_1^x	\bar{c}_2^x	\bar{c}_1^w	\bar{c}_2^w	$\hat{\omega}^{\max}$	$\hat{\omega}^{\min}$	\bar{v}_x^{\max}	\bar{v}_w^{\max}	\bar{v}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\text{max},\rho}$		
119	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,26		
120	20	1	2000	-	-	2	2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	28	875	1,19		
121	20	1	2000	-	-	2	2	1,6	2,4	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	877	1,16	
122	20	1	2000	-	-	2	2	1,6	2,4	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	892	1,41	
123	20	1	2000	-	-	2	2	1,6	2,4	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	28	876	1,14	
124	20	1	2000	-	-	1,8	2,2	1,8	2,2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	900	1,13	
125	20	1	2000	-	-	1,8	2,2	1,8	2,2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	892	1,02	
126	20	1	2000	-	-	1,8	2,2	1,8	2,2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	876	1,26	
127	20	1	2000	-	-	2,2	1,8	1,8	2,2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,17	
128	20	1	2000	-	-	2,2	1,8	1,8	2,2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	229	28	892	1,01	
129	20	1	2000	-	-	2,2	1,8	1,8	2,2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,39	
130	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,8	2,2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	882	1,32
131	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,8	2,2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,50
132	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,8	2,2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,26
133	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,9	2,1	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	900	1,26
134	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,9	2,1	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	890	1,36
135	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	1,9	2,1	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,36

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\bar{K}	\bar{R}	\bar{R}	\bar{c}_1^x	\bar{c}_2^x	\bar{c}_1^w	\bar{c}_2^w	$\hat{\omega}^{\max}$	$\hat{\omega}^{\min}$	\bar{v}_x^{\max}	\bar{v}_w^{\max}	\bar{v}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$Z_{\bar{m},\bar{s}}$		
136	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2,1	1,9	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,09
137	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2,1	1,9	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	877	1,38
138	20	1	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2,1	1,9	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	877	1,26
139	20	2	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	876	1,41
140	20	2	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	214	22	877	1,48
141	20	2	2000	-	-	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	877	1,17
142	20	1	2000	200	0,001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	214	28	876	1,22
143	20	1	2000	200	0,001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	215	28	892	1,56
144	20	1	2000	200	0,001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	220	22	890	1,21
145	20	1	2000	200	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	216	24	875	1,70
146	20	1	2000	200	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	214	22	875	1,29
147	20	1	2000	200	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	875	1,53
148	20	1	2000	200	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	Tak	227	41	888	1,30
149	20	1	2000	200	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	Tak	213	24	900	1,14
150	20	1	2000	200	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	Tak	217	22	892	1,68
151	20	1	2000	500	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,44
152	20	1	2000	500	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	24	908	1,01

c. d. Tabeli D.1. Wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości

L.p.	\bar{m}	\bar{s}	\bar{K}	\bar{R}	\bar{R}	\bar{c}_1^x	\bar{c}_2^x	\bar{c}_1^w	\bar{c}_2^w	$\hat{\omega}^{\max}$	$\hat{\omega}^{\min}$	\bar{v}_x^{\max}	\bar{v}_w^{\max}	\bar{v}_x^{\max}	RS	RM	C_1^o	C_2^o	C_3^o	$z_{\alpha,\rho}$		
153	20	1	2000	500	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	214	22	877	1,20
154	20	1	2000	750	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	253	41	877	0,98
155	20	1	2000	750	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	228	22	892	1,81
156	20	1	2000	750	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	236	24	892	1,01
157	20	1	2000	1500	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	251	24	900	2,50
158	20	1	2000	1500	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	877	1,58
159	20	1	2000	1500	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	900	1,17
160	20	1	2000	100	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	235	41	875	1,05
161	20	1	2000	100	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	223	22	886	1,86
162	20	1	2000	100	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	876	1,25
163	20	1	2000	20	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	221	22	876	1,33
164	20	1	2000	20	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,43
165	20	1	2000	20	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	876	1,13
166	20	1	2000	10	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,17
167	20	1	2000	10	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	22	875	1,17
168	20	1	2000	10	0,0001	2	2	1,8	2,2	2	2	0,9	0,6	1,3	1	1,7	Tak	nie	213	28	876	1,18