



Zdzisław Hejducki
Magdalena Rogalska

Harmonogramowanie procesów budowlanych metodami sprzężeń czasowych

MONOGRAFIE

Wyrażamy podziękowanie Profesorowi Juliuszowi Mrozowiczowi z Politechniki Wrocławskiej i Profesorowi Wiktorowi Aleksejewiczowi Afanasjewowi z Uniwersytetu Architektoniczno-Budowlanego z Sankt Petersburgu za inspirację niniejszą tematyką. Praca ta jest kontynuacją Ich idei naukowych.

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Zdzisław Hejducki
Magdalena Rogalska

Harmonogramowanie procesów budowlanych metodami sprzężeń czasowych



Politechnika Lubelska
Lublin 2017

Recenzenci:

gen. bryg. dr hab. inż. Dariusz Skorupka, WSO Wojsk Lądowych we Wrocławiu
dr hab. inż. Ryszard Dachowski, prof. Politechniki Świątokrzyskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2017

ISBN: 978-83-7947-246-8

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

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

Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie w problematykę	9
2. Zdefiniowanie problemu	11
2.1. Analiza opublikowanych prac dotyczących problematyki harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych	12
2.2. Podstawowe etapy badawcze.....	12
2.3. Zastosowania opracowanej metodologii.	15
3. Modelowanie przedsięwzięć budowlanych w systemie potokowym	17
3.1. Modele macierzowe.....	17
3.2. System potokowy w budownictwie	20
4. Założenia oraz ograniczenia techniczne i technologiczne w systemach potokowych typu TCM.....	23
4.1. Metody Sprzężeń Czasowych w ujęciu teorii szeregowania zadań.....	24
4.2. Metody Sprzężeń Czasowych w systemach potokowych typu Linear Scheduling Method (LSM).....	27
4.3. Metoda wyznaczania najkrótszego czasu wykonania kolejnych procesów (LT)	29
4.4. Wyznaczenie minimalnego czasu trwania zadania (TT)	35
4.5. Ustalenie przebiegu drogi krytycznej	36
4.6. Wyznaczenie najbliższego usytuowania procesów budowlanych LT z uwzględnieniem pojedynczych procesów blokowych na działkach	36
4.7. Podsumowanie.....	39
5. Założenia modelowe i metodyka obliczeń charakterystyk czasowych robót budowlanych z zastosowaniem potokowej metody organizacji z ciągłym prowadzeniem robót TCM I	41
5.1. Zasady obliczeń charakterystyk czasowych robót.....	42
5.1.1. Charakterystyka Metody TCM I	43
5.2. Aplikacja Microsoft EXCEL	44
5.3. Przykład obliczeniowy	48
5.4. Podsumowanie.....	51
6. Założenia modelowe i metodyka obliczeń charakterystyk czasowych robót budowlanych z zastosowaniem metody potokowej organizacji z ciągłym prowadzeniem robot na frontach roboczych TCM II	53
6.1. Określenie całkowitego czasu realizacji.....	53
6.2. Aplikacja Microsoft Excel.....	57
6.3. Przykład obliczeniowy	59
6.4. Podsumowanie.....	63

7. Założenia modelowe i metodyka obliczeń charakterystyk czasowych robót budowlanych z zastosowaniem potokowej metody organizacji z uwzględnieniem krytyczności robót TCM III	65
7.1. Sposób przeprowadzenia obliczeń.....	65
7.2. Oznaczenia osi.....	66
7.3. Zagadnienie szeregowania zadań – ustalanie kolejności realizacji robót przy założeniu minimalnego czasu wykonania i ustalonych zasobach.....	66
7.2.1. Algorytmy obliczeń TCM III	70
7.4. Zastosowanie algorytmów metaheurystycznych w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem metody TCM III	75
7.3.1. Charakterystyka algorytmów optymalizacji dyskretnej	75
7.3.2. Algorytm przeszukiwania z zabronieniami (<i>tabu search</i>)	76
7.3.3. Algorytm przeszukiwania genetycznego (<i>genetic search</i>)....	76
7.3.4. Algorytm symulowanego wyżarzania (<i>simulated annealing</i>).....	78
7.3.5. Implementacja metod obliczeniowych.....	79
8. Zastosowanie Metod Sprzężeń Czasowych w harmonogramowaniu procesów budowlanych	83
8.1. Techniki wyznaczenia czasów realizacji procesów budowlanych	83
8.2. Metoda przeszukiwania z tabu	85
8.2.1. Schemat algorytmu przeszukiwania z tabu (TSF).....	85
8.2.2. Ruch i otoczenie.....	86
8.2.3. Lista ruchów zakazanych	86
8.3. Algorytm przeszukiwania z tabu (<i>TSF</i>) z rozmytymi czasami wykonania robót	86
8.3.1. Eksperyment obliczeniowy	89
8.4. Obliczanie czasu realizacji procesów budowlanych Metodą Prognostyczno-Regresyjną	91
8.5. Obliczenia charakterystyk czasowych robót budowlanych z zastosowaniem MS EXCEL	92
8.5.1. Obliczenia cyklu wykonania robót budowlanych z zastosowaniem metody organizacji z ciągłym prowadzeniem robót TCM I	93
8.5.2. Obliczenia cyklu wykonania robót budowlanych z zastosowaniem metody organizacji z ciągłym prowadzeniem robót na działkach roboczych TCM II	103
8.5.3. Obliczenia cyklu wykonania robót budowlanych z zastosowaniem metody organizacji z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi TCM III.....	110
9. Zastosowanie metodyki TCM do analizy parametrów typu czas/koszt w systemach potokowych	115

9.1.	Analiza buforów czasu w harmonogramowaniu procesów budowlanych z użyciem algorytmów ewolucyjnych.....	115
9.1.1.	Podstawowe założenia do obliczeń.....	116
9.1.2.	Analiza buforów czasu w systemie TCM	117
9.1.3.	Podsumowanie	122
9.2.	Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w badaniu zależności czasu i kosztu wykorzystywania sumarycznego buforu czasu łańcucha krytycznego	122
9.2.1.	Sformułowanie problemu.....	124
9.2.2.	Eksperyment obliczeniowy	124
9.2.3.	Podstawowe założenia	125
9.2.4.	Podsumowanie	128
10.	Harmonogramowanie procesów budowlanych z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych i aplikacji MS EXCEL	129
10.1.	Aplikacja MS EXCEL.....	129
10.2.	Algorytmy obliczeń z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych TCM	131
10.2.1.	Algorytmy obliczeń TCM I.....	132
10.2.2.	Algorytmy obliczeń TCM II	134
10.2.3.	Algorytmy obliczeń TCM III	137
10.3.	Analiza parametrów czasowych harmonogramów z zastosowaniem metodyki TCM, uwzględnieniem metody Goldratta oraz zmiennej kolejności działek roboczych.....	140
10.3.1.	Dane wejściowe	140
10.3.2.	Harmonogram z zastosowaniem TCM I	141
10.3.3.	Harmonogram z zastosowaniem TCM I i metody Goldratta....	146
10.3.4.	Harmonogram z zastosowaniem TCM I z optymalną kolejnością działek roboczych	151
10.3.5.	Harmonogram z zastosowaniem TCM I z wyznaczoną kolejnością działek roboczych i metody Goldratta	156
10.3.6.	Harmonogram z zastosowaniem TCM I dla najbardziej niekorzystnej kolejności działek roboczych.....	161
10.3.7.	Harmonogram z zastosowaniem TCM II.....	166
10.3.8.	Harmonogram z zastosowaniem TCM II i metody Goldratta... 171	
10.3.9.	Harmonogram z zastosowaniem TCM II z wyznaczoną kolejnością działek roboczych	176
10.3.10.	Harmonogram z zastosowaniem TCM II z optymalną kolejnością działek roboczych z użyciem metody Goldratta	181
10.3.11.	Harmonogram z zastosowaniem TCM II dla najbardziej niekorzystnej kolejności działek roboczych.....	186
10.3.12.	Harmonogram z zastosowaniem TCM III.....	191
10.3.13.	Harmonogram z zastosowaniem TCM III i metody Goldratta	196

10.3.14. Harmonogram z zastosowaniem TCM III i optymalną kolejnością działek roboczych	201
10.3.15. Harmonogram z zastosowaniem TCM III z optymalną kolejnością działek roboczych i łańcuchem krytycznym	206
10.3.16. Harmonogram z zastosowaniem TCM III i najbardziej niekorzystną kolejnością działek roboczych	211
10.4. Wnioski z analizy	216
11. Podsumowanie.....	219
12. Załączniki	221
Bibliografia	239

1. Wprowadzenie w problematykę

W pracy przedstawiono szczególne podejście do rozwiązywania zagadnień harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem zbioru pojęć i metod umożliwiających: identyfikację problemów szczegółowych, opracowanie modeli obliczeniowych, przeprowadzenie obliczeń i weryfikację wyników, oraz ocenę błędów. Opracowanie stanowi podsumowanie wieloletnich badań nad rozwojem i doskonaleniem sposobów harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych (ang. Time Couplings Method TCM). Przedstawiono główne etapy i kierunki prac badawczych zmierzające do opracowania uzasadnionych naukowo podstaw teoretycznych oraz metod obliczeniowych o charakterze algorytmicznym. Zapewniają one prowadzenie analiz i obliczeń z powtarzalnością procedur oraz z oceną uzyskanych wyników, (ocen cząstkowych i kompleksowych). Podstawowym celem opracowania jest zebranie i usystematyzowanie zagadnień przedstawionych w wielu publikacjach autorów, w celu zaznaczenia obszaru badawczego o szczególnych właściwościach. Przyjęto i rozwinięto założenia badawcze sformułowane przez zespoły profesora Wiktora Afanasjewa i Juliusza Mrozowicza.

Przystępując do formułowania problemów badawczych posłużono się analizą i syntezą zjawisk występujących w procesie budowlanym, a w szczególności w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Obserwacje zjawisk występujących w procesie realizacji przedsięwzięć budowlanych i doświadczenia praktyczne, pozwalają na identyfikację i formułowanie problemów badawczych. Do rozwiązania szeregu zagadnień i sprawdzenia uzyskanych wyników posłużono się metodami obliczeniowymi uzasadniającymi przyjęte założenia i możliwość znalezienia uogólnień. W celu upowszechnienia TCM przedstawiono przykłady obliczeniowe z zastosowaniem MS EXCEL.

2. Zdefiniowanie problemu

Generalny problem sprowadza się do zagadnień doskonalenia metod harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych. W szczególności prowadzone są badania, których celem jest rozwinięcie metodologii harmonogramowania robót budowlanych z uwzględnieniem Metod Sprzężeń Czasowych. Modele obliczeniowe, uwzględniające zbiór tzw. sprzężeń czasowych (powiązań, zależności technologicznych, organizacyjnych i zasobowych) mogą odwzorowywać występujące w praktyce budowlanej ograniczenia wykonawcze. Przyjmowane w modelach obliczeniowych ograniczenia i uwarunkowania można zatem opisać zależnościami czasowymi (sprzężeniami). Jako funkcje celu w modelach przyjmuje się minimalizację czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych, minimalizację kosztów, optymalizację zasobów i inne.

Jednym z czynników decydujących o efektywności prowadzenia robót budowlanych jest ich właściwa kolejność, uwzględniająca technologiczne i organizacyjne ograniczenia. Jest to problem zaliczany do deterministycznej teorii szeregowania zadań, o charakterze permutacyjnym. W związku z tym traktowany jest jako zagadnienie o dużej złożoności obliczeniowej, z uwagi na wielką liczbę dopuszczalnych rozwiązań.

W praktyce ustalenie racjonalnej kolejności prowadzenia robót, jest możliwe drogą zmiany kolejności robót na poszczególnych frontach roboczych. Jednakże sprawdzenie wszystkich możliwych wariantów realizacyjnych, z uwagi na złożoność obliczeniową problemów kombinatorycznych, byłoby trudne. Aktualnie prowadzone prace badawcze dotyczą modelowania przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem narzędzi sztucznej inteligencji, w szczególności zastosowania teorii szeregowania zadań, optymalizacji zależności czasowo-kosztowych z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych, Tabu Search i in., harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych z rozmytymi czasami wykonania zadań, optymalnego planowania przedsięwzięć budowlanych z zależnościami typu czas/koszt/zasoby z użyciem algorytmów genetycznych i hybrydowego algorytmu ewolucyjnego.

W algorytmach obliczeniowych posłużono się dwoma sposobami zapisu procedur obliczeniowych. Przyjęto tradycyjny zapis wg. zasad rachunku macierzowego, wynikający z przyjęcia modelu macierzowego, jako rozpowszechnionego we wcześniejszych publikacjach schematu obliczeniowego. Zastosowano również w niektórych partiach pracy zapis i oznaczenia wynikające z określeń przyjętych w literaturze zagranicznej oraz w algorytmach używanych w publikacjach dotyczących zagadnień dyskretnych procesów produkcyjnych.

2.1. Analiza opublikowanych prac dotyczących problematyki harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych

Metody sprzężeń czasowych (ang. Time Couplings Method TCM) są naturalną konsekwencją przyjętej struktury podziału prac WBS (Work Breakdown Structures) w układzie sektorowym. Harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych metodą sprzężeń czasowych (Time Couplings Method TCM – sprzężenia czasowe to wewnętrzne powiązania czasowe pomiędzy procesami budowlanymi i sektorami z uwzględnieniem ograniczeń zasobowych i technicznych), polega na planowaniu realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem ww. ograniczeń oraz zagadnienia optymalizacji kolejnościowej (np.: B&B).

Metody LSM (Linear Scheduling Method), odpowiednik TCM, lecz uwzględniające odmienne podejście, rozwijały się głównie w Kanadzie i USA. O'Brien 1969 wprowadza pojęcie „Line of Balance”, zagadnieniem tym zajmują się również Carr i Meyer 1974, Halpin oraz Woodhead 1976. Peer 1974 i Selinger 1980, Handa i Barcia 1986 oraz Chrzanowski, Johnston 1986. Prace nad techniką planowania w budownictwie „Construction Planning Technique” prowadzą: O'Brien 1975 i Barrie Paulson 1978 „Vertical Production Method”; Birrell 1980 „Time –Location Matrix Model”; Johnston 1981, Stradal i Cacha 1982 „Time Space Scheduling Method”; Whiteman i Irwig 1988 „Disturbance Scheduling”; Thabet and Beliveau 1994 „Horizontal and Vertical Logic Scheduling for Multistory Projects”. O'Brien 1975, 1985, Arditi i Albulak 1979, 1986. Melin i Whiteaker 1981 rozwijali narzędzia do optymalizacji cyklogramów. Prace z ostatniego okresu, El-Rayes and Moselhi (1998, 2001) dotyczą optymalizacji zapotrzebowania na zasoby w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych. Harris oraz Ioannou (1998) zajmują się cyklogramami rytmicznymi z uwzględnieniem ograniczeń technicznych. Adeli i Karim (1997) pracowali nad zagadnieniami modelowania z zastosowaniem sieci neuronowych do optymalizacji kosztów przedsięwzięć budowlanych.

2.2. Podstawowe etapy badawcze

Kontynuując kierunek badań nad metodami organizacji robót budowlanych uwzględniającymi sprzężenia czasowe napotyka się na szereg nierozwiązanych zagadnień. Opracowane przed laty założenia pracy równomiernej, nie znalazły możliwości powszechnego stosowania z uwagi na charakter procesów budowlanych, które są niejednorodne i dyskretne (nieciągłe). Pojawiające się w praktyce budowlanej ograniczenia organizacyjne i technologiczne rodzą konieczność uwzględnienia szeregu logicznych uwarunkowań wynikających z doświadczeń praktyki budowlanej. Jednym z wielu sposobów ujęcia specyfiki harmonogramowania kompleksu prac budowlanych może być metodologia opracowana i rozwijana przez profesora Afanasjewa V.A. i jego zespół, bazująca na metodach potokowych utworzonych przez usystematyzowanie występujących

sprzężeń czasowych między robotami. Rozszerzając obszar zastosowań metod potokowych prowadzono badania nad tworzeniem zbioru wariantów organizacyjnych, przez rozszerzenie pojęcia sprzężeń czasowych oraz tworzenie zbioru metod, w szczególności równoległo-szeregowe, równoległo-potokowe i równoległo-szeregowo-potokowe. Umożliwia to planowanie realizacji z uwzględnieniem szczególnych ograniczeń. Zagadnienia te były przedmiotem badań przez Profesora Juliusza Mrozowicza i jego zespół. Praca ta jest kontynuacją przyjętych wcześniej założeń metodologicznych.

Przedmiotem pogłębionej analizy były sprzężenia diagonalne, odwrotne diagonalne przekątne oraz ich kombinacje w modelach organizacji robót. Umożliwiło to utworzenie nowych modeli organizacyjnych robót tworzących wewnętrzne struktury równoległe, szeregowe oraz ich połączenie. Podejście do pogłębionej analizy relacji technologicznych i organizacyjnych (tj. np.: równoległości i jednoczesności niektórych procesów budowlanych) z uwzględnieniem ww. sprzężeń czasowych w procesach budowlanych, pozwoliło na opracowanie algorytmów obliczeniowych z ich weryfikacją numeryczną uwzględniającą szereg praktycznych ograniczeń, np.: uwzględnieniem warunków jednoczesności rozpoczęcia wybranych robót, zakończenia, itp.

W szczególności badano nierozwiązane problemy modelowania i synchronizacji robót budowlanych o złożonej strukturze (szeregowej, równoległej i ich kombinacjach). Prace z tego okresu obejmowały następujące zagadnienia:

- badania nad możliwością wariantowania potokowych metod organizacji robót budowlanych z wykorzystaniem sprzężeń czasowych jako sposobu odwzorowania zależności technologicznych i organizacyjnych, identyfikację nowych relacji,
- opracowanie nowych modeli organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych, odwrotnie diagonalnych, rangowych i ich kombinacji, weryfikację na przykładach z praktyki budowlanej,
- doskonalenie metod potokowej organizacji robót z uwzględnieniem modelu kompleksu obiektów budowlanych o równoległej strukturze, z opracowaniem algorytmów obliczeniowych harmonogramów wykorzystując wariantowanie sprzężeń czasowych,
- próby uwzględniania w modelach obliczeniowych warunków ciągłości pracy brygad roboczych, zestawów maszyn, itp.,
- zagadnienia synchronizacji kompleksów robót budowlanych z zastosowaniem schematu szeregowania zdań typu B&B (Branch-and-Bound to schemat, który nie określa żadnego konkretnego algorytmu, lecz ogólne podejście oparte na dekompozycji i „inteligentnym” przeszukiwaniu zbioru rozwiązań dopuszczalnych problemu optymalizacyjnego).

Istotnymi zagadnieniami dotyczącymi następstw technologicznych i organizacyjnych występujących w procesach budowlanych, była identyfikacja i analiza

właściwości modeli organizacyjnych z zastosowaniem grupy sprzężeń diagonalnych. Sformułowano 8 właściwości i twierdzeń oraz dowodów logicznych określając szczególne właściwości modeli organizacyjnych i związane z tym warunki realizacji robót budowlanych. Opracowano metody obliczeniowe w celu wyznaczenia terminów realizacji z uwzględnieniem kombinacji ograniczeń, z zastosowaniem algorytmu B&B i funkcji celu typu T-min.

Aktualnie prowadzone prace badawcze dotyczą modelowania przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem narzędzi sztucznej inteligencji. Główne zagadnienia dotyczą doskonalenia metod sprzężeń czasowych, w szczególności zastosowanie teorii szeregowania zadań, optymalizację zależności czasowo-kosztowych z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych, Tabu Search i in., harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych z rozmytymi czasami wykonania zadań, optymalne planowanie przedsięwzięć budowlanych z zależnościami typu czas/koszt/zasoby, z użyciem algorytmów genetycznych i hybrydowego algorytmu ewolucyjnego. W szczególności opracowano:

- założenia i odpowiedniki pojęć z teorii szeregowania zadań oraz metod typu LSM (Linear Scheduling Methods), LOB (Line of Balance) i inne, w odniesieniu do występujących w literaturze światowej,
- zastosowanie w harmonogramowaniu robót czynników losowych metodą Goldratta (łańcucha krytycznego CC/BM) z zastosowaniem buforów czasu i teorii ograniczeń,
- potokowe metody harmonogramowania prac budowlanych z zastosowaniem algorytmów metaheurystycznych; genetycznych, HEA (hybrydowego algorytmu ewolucyjnego z zastosowaniem funkcji celu typu czas/koszt z ograniczeniami zasobowymi),
- tzw. przestrzenie harmonogramów w celu ustalania minimalnych kosztów przerw organizacyjnych związanych z uwzględnieniem ciągłości robót i przestojów na frontach roboczych z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych,
- weryfikację (na przykładach z praktyki budowlanej) nowych metod obliczeniowych w harmonogramowaniu robót budowlanych z zastosowaniem algorytmu Tabu Search i niepewnych danych,
- sposoby zastosowania metod statystycznych (regresji, sieci neuronowych i ARIMA) z wykorzystaniem programu Statistic StatSoft do prognozowania terminów wykonania robót budowlanych, awaryjności maszyn budowlanych, emisyjności CO₂ i inne.

2.3. Zastosowania opracowanej metodologii.

Opracowana metodologia harmonogramowania z uwzględnieniem Metod Sprzężeń Czasowych, pozwala na prowadzenie prac badawczych w ramach nurtu zagadnień prezentowanych w publikacjach zagranicznych. Modele i metody harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych są odpowiednikiem *flow shop problem*, w teorii szeregowania. Zagadnienia tego typu, np.: w odniesieniu do kryterium minimalizacji czasu zakończenia wszystkich obiektów należą do klasy problemów *silnie NP-trudnych*. Są to zatem zagadnienia o dużej złożoności obliczeniowej mieszczące się w aktualnym nurcie harmonogramowania typu LSM (Linear Scheduling Methods), LOB (Line of Balance) i innych występujących w literaturze światowej.

W praktyce metodologia obliczeń z uwzględnieniem sprzężeń czasowych została zastosowana m.in. w algorytmach programów PlanistaPlus oraz PlanGA i innych. Ponadto szczególne zależności (zerowe sprzężenia między frontami roboczymi i inne) zostały wykorzystane podczas realizacji zadania w ramach 7 programu UE, Trans-Ind, *New Industrialised Construction Process NMP-2008-3.4-2*, m.in. jako moduł harmonogramowania prac budowlanych w opracowanym programie CONSTRUCTION SCHEDULER, w raporcie Instytutu Budownictwa PWr, pt.: *Koncepcja modelowego zintegrowanego systemu transportu i montażu kompozytowych elementów obiektu mostowego* oraz pt.: *Integracja harmonogramów – system bazy danych*.

3. Modelowanie przedsięwzięć budowlanych w systemie potokowym

Harmonogramowanie procesu realizacji kompleksu obiektów budowlanych wymaga wykorzystania odpowiednich modeli. W praktyce najczęściej stosowane są modele graficzne (wykresy liniowe, linie cykliczne, sieci zależności), umożliwiające odwzorowanie przebiegu robót w czasie. Jedną z form modelu potoku (system organizacji robót polegający na tym, że prowadzi się jednocześnie różne rodzaje robót na różnych frontach roboczych, przy założeniu, że można realizować tylko jeden rodzaj robót na jednym froncie w danym momencie) mogą być macierze, przy czym rozróżnić będziemy macierz wejściową i pośrednie (przeznaczone do przeprowadzenia procesu obliczeniowego) oraz macierz końcową zawierającą charakterystyki robót.

3.1. Modele macierzowe

Macierz czasów, realizacji robót na frontach (działkach, sektorach) przez brygady robocze, $\mathbf{T} = [t_{ij}]$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$ ma wymiar $n \times m$.

Elementami macierzy mogą być czasy wykonania robót na frontach, wyznaczone na podstawie danych normatywnych lub po wyznaczeniu zależności regresyjnych (Rogalska 2016):

$$t_{ij} = f(P_{ij}, B_{ij}), \quad (3.1)$$

gdzie:

t_{ij} – element macierzy,

P_{ij} – pracochłonność robót j na obiekcie i ,

B_{ij} – ilościowy skład brygady roboczej wykonującej j -ty proces na i -tym obiekcie.

Przystępując do formowania macierzy czasów wykonania robót na frontach należy utworzyć: zbiór działek roboczych $d_i = \{d_i\} = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ oraz zbiór częściowych potoków $p_j = \{p_j\} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$. Liczba działek roboczych oraz ich wielkość uzależniona jest od konstrukcji obiektów, przyjętej technologii robót, maszyn i urządzeń stosowanych podczas realizacji, składu osobowego i liczby brygad oraz wielkości zadania inwestycyjnego. Przyjmując zalecenia publikowane w wielu pracach związanych z omawianą tematyką oraz wykorzystując doświadczenia z praktyki przedsiębiorstw budowlanych, przyjęto przy podziale obiektów na fronty robocze, zasadę bezkolizyjnej pracy brygady na działce. Ma ona bezpośredni wpływ na liczbę i wielkość frontów roboczych wyznaczonych na danym obiekcie.

Częściowe potoki p_j powstają w wyniku scalenia robót, przewidywanych do wykonania przez grupy robocze, zgodnie z zasadami technologii i organizacji robót. Zbiór działek roboczych $\{d_i\}$ oraz częściowych potoków $\{p_j\}$ można traktować jako zbiór argumentów i wartości funkcji, przyporządkowując

elementom ze zbioru działek kolejno przewidywane do wykonania roboty ze zbioru częściowych potoków. Wynikiem przyporządkowania jest macierz czasów wykonania robót na frontach roboczych $\mathbf{T} = [t_{ij}]$. Elementy macierzy można wyznaczyć posługując się aktualną bazą normatywną lub w inny uzasadniony sposób.

Przystępując do budowy macierzy, najdogodniej jest podzielić tę czynność na etapy. W etapie pierwszym określamy zbiór wektorów kolumnowych, odpowiadających poszczególnym rodzajom robót $(P_1, \dots, P_j, \dots, P_m)$, wykonywanym przez specjalizowane brygady $(1, \dots, j, \dots, m)$. Współrzędnymi tych wektorów są czasy wykonania danej roboty na działkach roboczych $(1, \dots, i, \dots, n)$.

$$P_1 = \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{21} \\ \dots \\ t_{i1} \\ \dots \\ t_{n1} \end{bmatrix}; \dots, P_j = \begin{bmatrix} t_{1j} \\ t_{2j} \\ \dots \\ t_{ij} \\ \dots \\ t_{nj} \end{bmatrix}; \dots, P_m = \begin{bmatrix} t_{1m} \\ t_{2m} \\ \dots \\ t_{im} \\ \dots \\ t_{nm} \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Jak wykazały obserwacje procesu realizacji dokonane na licznych budowach, liczby elementów w wektorach mogą być różne, na skutek niejednakowej wielkości działek roboczych oraz ich liczby w kompleksie. Na przykład roboty ziemne prowadzone są najczęściej na działce obejmującej rzut całego obiektu lub części oddzielonej przerwą dylatacyjną, natomiast np. roboty wykończeniowe wykonywane są zwykle na działce obejmującej w rzucie poziomym segment budynku i kondygnacji w rzucie pionowym. Wynika stąd konieczność uporządkowania macierzy czasów wykonania robót, drogą wprowadzania tzw. „robót zerowych” (zerowych elementów w macierzy). Jest to sposób zapisu występowania poprzedników i następników w metodzie TCM.

W etapie drugim budujemy macierz czasów wykonania robót (\mathbf{T}), grupując wektory kolumnowe w ustalonym porządku, wynikającym z technologii prowadzonych robót. Podczas budowy macierzy wejściowej, w szczególnych przypadkach uwzględniających zerowe elementy lub jednakowe liczby elementów w kolumnach, mogą pojawiać się trudności w obliczaniu charakterystyk czasowych modelowanego potoku. Rozwiązanie powyższego problemu, w przypadku niejednakowej liczby elementów w podmacierzach kolumnowych jest możliwe:

- drogą zwiększenia wielkości działek, przez sumowanie czasów wykonania robót, do wielkości dla działki największej w obiekcie lub kompleksie,
- przez podział macierzy czasów wykonania robót na podmacierze o jednakowej liczbie wierszy.

W modelach potokowych w przypadku konieczności scalenia działek roboczych macierz wejściową czasów można dzielić na dowolną liczbę podmacierzy. Po wykonaniu obliczeń w podmacierzach wyniki obliczeń należy scalić.

3.2. System potokowy w budownictwie

Rozwiązywanie zagadnień szeregowania zadań metodą TCM może być realizowane z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji (algorytmów genetycznych, Tabu Search i innych). Zastosowanie tych metod wymaga wprowadzenia specjalnego, innego niż standardowy, zapisu oraz sformułowania założeń do obliczeń (Rogalska, Bożejko, Hejducki 2008).

Można opisać przedsięwzięcie budowlane (BP) polegające na wykonaniu n obiektów ze zbioru $O = \{O^1, O^2, \dots, O^n\}$ przez m brygad ze zbioru $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$.

Każdy obiekt $O^i \in O$ jest ciągiem m prac $O^i = \{P^i_1, P^i_2, \dots, P^i_m\}$ przy czym praca P^i_j ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$) jest wykonywana przez brygadę B_j w czasie p^i_j . Prace na obiekcie $O^i \in O$ należy wykonać w zadanym porządku technologicznym, tzn. dowolna praca P^i_j ma być wykonywana po zakończeniu P^i_{j-1} , a przed rozpoczęciem P^i_{j+1} ($2 \leq j \leq m - 1$). Muszą być przy tym spełnione następujące ograniczenia:

1. każda praca (na obiekcie) może być wykonywana tylko przez jedną, określoną przez ciąg technologiczny brygadę,
2. żadna brygada nie może wykonywać jednocześnie więcej niż jedną pracę,
3. na każdym obiekcie musi być zachowany porządek technologiczny,
4. wykonywanie żadnej pracy nie może być przerwane przed jej zakończeniem.

Niech π będzie pewną permutacją obiektów (elementów zbioru O). Permutacja ta wyznacza kolejność wykonywania poszczególnych prac na obiektach, tj. brygada $B_j \in B$ wykonuje prace $P_j^{\pi(i)}$ na obiekcie $\pi(i) \in O$ dopiero po wykonaniu prac $P_j^{\pi(1)}, P_j^{\pi(2)}, \dots, P_j^{\pi(i-1)}$ kolejno na obiektach $\pi(1), \dots, \pi(i-1)$ a przed wykonaniem prac $P_j^{\pi(i+1)}, P_j^{\pi(i+2)}, \dots, P_j^{\pi(n)}$ na obiektach $\pi(i+1), \dots, \pi(n)$. Oznaczmy przez Φ zbiór wszystkich możliwych permutacji obiektów. Moc tego zbioru wynosi $n!$.

Jeżeli roboty na obiektach są wykonywane w kolejności $\Phi \in \pi$ oraz $p_{\pi(i),j}$ jest czasem wykonywania pracy $P_j^{\pi(i)}$, ($i \in 1, 2, \dots, n, j \in 1, 2, \dots, m$) to moment zakończenia tej pracy $C_{\pi(i),j}$ możemy wyznaczyć z następujących zależności rekurencyjnej:

$$C_{\pi(i),j} = \begin{cases} \sum_{k=1}^i p_{\pi(i),j}, & \text{gdy } j = 1, \\ C_{\pi(i),j-1} + p_{\pi(i),j}, & \text{gdy } i = 1, j > 1, \\ \max\{C_{\pi(i),j-1}, C_{\pi(i-1),j}\} + p_{\pi(i),j}, & \text{gdy } i > 1, j > 1, \end{cases} \quad (3.5)$$

a moment rozpoczęcia jej wykonywania:

$$S_{\pi(i),j} = C_{\pi(i),j} - C_{\pi(i),j}. \quad (3.6)$$

Można łatwo sprawdzić, że określone przez (3.5) i (3.6) momenty rozpoczęcia i zakończenia prac na obiektach spełniają ograniczenia (3.1 – 3.4), więc są rozwiązaniem dopuszczalnym problemu BP.

Model opisanego wyżej przedsięwzięcia budowlanego jest znany w teorii szeregowania jako *flow shop problem*. Jeżeli rozpatrujemy kryterium minimalizacji czasu zakończenia wszystkich obiektów (C_{\max}), wówczas problem ten należy on do klasy problemów *silnie NP-trudnych*. Zagadnienia te w ogólnej postaci były rozwiązywane metodami heurystycznymi z zastosowaniem narzędzi sztucznej inteligencji, (m.in.: Bożejko i Wodecki 2005, Nowicki 1999, Smutnicki 2002, Grabowski, Reeves, Yamada 1998).

W praktyce budowlanej bardzo ważnym kryterium jest wykonanie w terminie każdej pracy, lub ewentualna minimalizacja kar za przekroczenie ustalonych w kontrakcie terminów.

Dla pracy P_j^i , ($i \in O$, $j \in B$) niech d_{ij} , w_{ij} będą odpowiednio ustalonym w kontrakcie terminem wykonania oraz współczynnikiem kary za spóźnienie. Macierze p , d , w , gdzie $p = [p_{ij}]_{n \times m}$ jest to macierz czasów wykonania prac, $d = [d_{ij}]_{n \times m}$ – macierz terminów, $w = [w_{ij}]_{n \times m}$ – macierz współczynników kary, jest przykładem danych deterministycznych.

Jeżeli $\pi \in \Phi$ jest kolejnością wykonywania obiektów oraz $C_{\pi(i),j}$ jest terminem ukończenia pracy $P_j^{\pi(i)}$, to:

$$U_{\pi(i),j} = \begin{cases} 1, & \text{gdy } C_{\pi(i),j} > d_{\pi(i),j}, \\ 0, & \text{gdy } C_{\pi(i),j} \leq d_{\pi(i),j}, \end{cases} \quad (3.7)$$

jest spóźnieniem, a $w_{\pi(i),j} U_{\pi(i),j}$ karą za spóźnienie. Wówczas:

$$W(\pi) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{\pi(i),j} \cdot U_{\pi(i),j}, \quad (3.8)$$

jest sumą kar za przekroczenie terminów wykonania prac (w skrócie, kosztem permutacji π).

Rozpatrywany w pracy problem polega na wyznaczenia optymalnej kolejności wykonywania, obiektów w systemie potokowym, minimalizującej funkcję kary. Sprowadza się to do wyznaczenia permutacji $\pi^* \in \Phi$ takiej, że:

$$W(\pi^*) = \min\{W(\pi) : \pi \in \Phi\}. \quad (3.9)$$

Dla $m = 1$ jest on równoważny *silnie NP-trudnemu* jednomaszynowemu problemowi szeregowania zadań $1||\Sigma w_i U_i$ (Karp, Navaz 1983). Obecnie nie są znane algorytmy optymalne rozwiązywania takich problemów o wielomianowej złożoności obliczeniowej.

4. Założenia oraz ograniczenia techniczne i technologiczne w systemach potokowych typu TCM

Nowością wyróżniającą szczególne podejście do harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych w systemach potokowych, jest wprowadzenie pojęcia „sprzężenia czasowe” (Afanasjew 2000, Mrozowicz 1997, Hejducki, Rogalska 2011). Wydaje się, że można znaleźć pewne uogólnienie i uzasadnienie w modelach sieciowych, jako łuki w grafach skierowanych, reprezentujące zależności między zdarzeniami. Jednakże, w analizowanych systemach potokowych nadaje im się szczególne znaczenie jako sposoby wyrażania ograniczeń: technologicznych, organizacyjnych, kolejnościowych, czasowych, strukturalnych, wiążących oddzielne roboty budowlane w model przedsięwzięcia budowlanego (harmonogram realizacyjny w systemie potokowym).

W procesie modelowania kompleksu robót przyjęto, że pomiędzy robotami występują sprzężenia czasowe, o następujących cechach:

- sprzężenia między środkami realizacji wiążą roboty jednego rodzaju, występujące w częściowym potoku (częściowym lub kompleksowym),
- sprzężenia między frontami roboczymi (działkami), wiążą występujące w ciągu technologicznym roboty różnych rodzajów, wykonywane na tej samej działce, w potokach częściowych lub kompleksowych,
- sprzężenia diagonalne, wiążą roboty występujące w sąsiednich częściowych potokach, na danej i poprzedniej działce (froncie),
- sprzężenie odwrotne diagonalne, wiążą roboty na danej działce roboczej, w danym częściowym potoku, z robotami na następnej działce, w poprzedzającym częściowym potoku,
- sprzężenie przekątne, wiążą roboty danego rodzaju wykonywane na danej działce (froncie), z robotami poprzedzającymi w porządku technologicznym, prowadzonymi na poprzedniej działce.

Metody sprzężeń czasowych (ang. *Time Couplings Method TCM*) różnią się od prezentowanych w zagranicznych publikacjach sposobów harmonogramowania tym, że na wstępie przyjmuje się technologie wykonania robót oraz zapotrzebowanie zasobowe tj.: w metodzie TCM I – brak przestoju pracowników, w metodzie TCM II – brak przestoju w sektorach (działkach), a w metodzie TCM III – minimalny czas wykonania, możliwe przestoje pracowników i w sektorach, metody TCM IV, V, VI, uwzględniają minimum czasu i dodatkowe ograniczenia.

Metody organizacji robót budowlanych (TCM) uwzględniające sprzężenia czasowe wymagają przyjęcia odpowiednich założeń, tworzących aparat pojęciowy. Aktualna ich specyfika jest następująca:

- Podział ogólnego kompleksu działek roboczych na poszczególne działki robocze.
- Podział ogólnego kompleksu robót na częściowe potoki łączące te roboty, które można wykonać na każdej z działek (zbiory robót dla każdej z działek są takie same).
- Założenie wykonywania w tym samym momencie przez daną grupę roboczą tylko jednej roboty na jednej działce oraz wykonywania w tym samym momencie na jednej działce tylko jednego rodzaju robót (wartości sprzężeń czasowych wszystkich rodzajów są zawsze nieujemne).
- Zastosowanie modelu macierzowego do zapisu danych wejściowych.
- Podstawą do tworzenia modelu są znane warunki technologiczne i organizacyjne przedsięwzięcia budowlanego określone przy pomocy sprzężeń czasowych i ich kombinacji.
- Przeprowadza się optymalizację przyjmując minimalny czas wykonania kompleksu obiektów budowlanych poprzez szeregowanie kolejności wykonywania prac na działkach roboczych.

4.1. Metody Sprzężeń Czasowych w ujęciu teorii szeregowania zadań

Analizując założenia TCM, można znaleźć wspólne podstawy, modele obliczeniowe, funkcje celu, z elementami teorii szeregowania zadań. Istnieją też różnice pojęć i ograniczeń, wynikające ze specyfiki przedsięwzięć budowlanych. Stąd opracowano aparat pojęciowy i warunki ograniczające, aby w modelach obliczeniowych posłużyć się metodologią odpowiadającą specyfice przedsięwzięć budowlanych. Modele te mogą służyć do rozwiązywania zagadnień harmonogramowania robót budowlanych z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych, szczególnych odpowiedników systemu pracy potokowej w budownictwie, uwzględniających ograniczenia technologiczne i organizacyjne. W teorii szeregowania zadań odpowiednikiem systemów potokowych w budownictwie są tzw. permutacyjne problemy przepływowe (ang. *flow shop problem*). Podstawowy problem naukowy dotyczy optymalizacji (np. minimalizacji czasu cyklu) planowania realizacji przedsięwzięć budowlanych. Jako kryteria optymalizacyjne przyjmuje się minimalizację czasu, kosztów i zasobów oraz inne funkcje celu.

Można wskazać na analogie pomiędzy modelami obliczeniowymi z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych (TCM) umożliwiającymi rozwiązywanie zagadnień optymalizacji w planowaniu realizacji robót

budowlanych i niektórymi modelami teorii szeregowania zadań (TSZ) (Podolski 2009).

W teorii szeregowania zadań istnieje system twierdzeń i dowodów uzasadniających ich właściwości bazujące na matematyce dyskretnej, co uzasadnia poprawność logiczną w zastosowaniu Metod Sprzężeń Czasowych (TCM) w zagadnieniach harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych. Model wieloobiekowego (lub kompleksu obiektów budowlanych) przedsięwzięcia budowlanego jest znany w teorii szeregowania jako *flow shop problem*. Jeżeli rozpatrujemy kryterium minimalizacji czasu zakończenia wszystkich obiektów (C_{\max}), wówczas problem ten należy do klasy problemów *silnie NP-trudnych*, tj. o dużej, wykładniczej złożoności obliczeniowej (Podolski 2008, Hejducki, Podolski, Uchroński 2009).

Modele badane w ramach teorii szeregowania zadań opisują funkcjonowanie systemów wytwarzania w wielu dziedzinach techniki np. informatyce, automatyce, przemyśle: chemicznym, motoryzacyjnym, elektronicznym. Są stosowane do rozwiązywania praktycznych problemów optymalizacji występujących w dyskretnych systemach produkcyjnych, elastycznych systemach wytwarzania i systemach operacyjnych komputerów. Ze względu na praktyczne rozmiary zagadnień ich modele mają najczęściej charakter deterministyczny, choć są również rozpatrywane modele z parametrami o charakterze probabilistycznym i rozmytym.

W zagadnieniach szeregowania występują zadania i zasoby. Zadanie polega na wykonaniu ciągu czynności zwanych operacjami, z których każda wymaga zaangażowania określonych zasobów. Zasobami mogą być urządzenia, materiały, kapitał, surowce. W teorii szeregowania zadań ograniczono się do rozpatrywania zasobów odnawialnych zwanych maszynami.

Opisywane są za pomocą trzech cech. Pierwszą z nich jest typ zagadnienia (sposób „przejścia” zadań przez system maszyn), który może być m.in.:

- jednomaszynowy,
- F – przepływowy (*flow-shop*) – wszystkie zadania mają marszrutę technologiczną (kolejność przejścia przez maszyny), zaś każda z maszyn wymaga określenia oddzielnej sekwencji wprowadzania zadań,
- FP – przepływowy permutacyjny (*permutation flow-shop*) – założenie jw. z dodatkowym wymaganie, aby kolejność wprowadzania zadań na wszystkich maszynach była jednakowa,
- J – gniazdowy (*job-shop*) – różne zadania mogą posiadać różne co do liczby jak i kolejności odwiedzania stanowisk marszrutę technologiczną,
- O – otwarty (*open-shop*) – operacje zadań nie mają określonej kolejności technologicznej,
- R – z maszynami równoległymi (*parallel-shop*).

Druga z cech dotyczy dodatkowych założeń i ograniczeń, które mogą być następujące m.in.:

- *prec* – istnieje narzucony częściowy porządek technologiczny wykonywania zadań, który może przyjmować postać grafu,
- występują żądane terminy rozpoczęcia r_j i zakończenia wykonywania d_j zadań,
- *no wait* (bez czekania) – poszczególne zadania są wykonywane bez przerwy,
- *no store* (bez magazynowania) – brak jest możliwości składowania zadania na składowisku międzyoperacyjnym, co powoduje, że maszyny pracują bez przerw,
- *pmtn* (przerywać) – dopuszcza się możliwość przerywania wykonywania operacji,
- *setup* (przebrojenia) – występują dodatkowe czasy pomiędzy wykonywaniem zadań, które są wymagane ze względu na przygotowanie maszyn do realizacji różnych zadań, przebrojenia mogą być zależne od sekwencji czynności (kolejności zadań) – *seq setup*,
- *transport* – występują dodatkowe czasy dla operacji związane z przeniesieniem zadania z maszyny poprzedniej na następną; czasy te mogą przyjmować wartości ujemne (*time lag*) lub dodatnie (*transfer time*).

Trzecia z cech wiąże się z przyjętym kryterium optymalizacji (funkcją celu) m.in.:

- C_{\max} (*makespan*) – termin zakończenia wykonania wszystkich zadań:

$$C_{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} C_j, \quad (4.1)$$

gdzie: n – ilość zadań, C_j – termin zakończenia wykonania zadania j ,

- kryteria związane z terminami zakończenia wykonywania zadań: suma terminów zakończenia wykonywania wszystkich zadań, średni termin zakończenia wykonywania wszystkich zadań oraz kryteria ważone uwzględniające pilność różnych zadań,
- maksymalna nieterminowość zakończenia wykonywania zadań (gdy są określone pożądane terminy zakończenia wykonywania zadań d_j):

$$L_{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} L_j = \max_{1 \leq j \leq n} (C_j - d_j), \quad (4.2)$$

- kryteria związane z nieterminowością zakończenia wykonywania zadań: suma nieterminowości zakończenia wykonywania zadań, ważona suma nieterminowości zakończenia wykonywania zadań, średnia nieterminowość zakończenia wykonywania zadań,
- kryteria związane z oceną precyzji zakończenia wykonywania zadań np. maksymalna kara za odchylenie od żadanego przedziału wykonywania $[r_j, d_j]$.
Rozwiązaniem każdego problemu jest harmonogram rozpoczęcia i zakończenia wykonywania wszystkich operacji na poszczególnych maszynach.

Z przedstawionej powyżej charakterystyki wynika, że istnieje analogia podstawowych pojęć i parametrów w TCM i TSZ, tj.:

- kompleksowi działek roboczych Z odpowiada zbiór zadań do wykonania $J = \{1, 2, 3, \dots, n\}$,
- zbiorowi grup roboczych B odpowiada zbiór różnych typów maszyn $M = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ potrzebnych do wykonania zbioru zadań J ,
- zbiorowi robót P_j dla wykonania działki $Z_j \in Z$ odpowiada ciąg operacji $\{O_{1j}, O_{2j}, O_{3j}, \dots, O_{mj}\}$ dla wykonania zadania $j \in J$,
- typ zagadnienia: przepływowy permutacyjny,
- dodatkowe założenia i ograniczenia:
 - założenie metody TCM I (z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji) jest równoważne przyjęciu ograniczenia „bez magazynowania”,
 - założenie metody TCM II (z zerowymi sprzężeniami między działkami roboczymi) jest równoważne przyjęciu ograniczenia „bez czekania”,
 - założenie metody TCM III (ze sprzężeniami między środkami realizacji i sprzężeniami między działkami roboczymi) jest równoważne nie formułowaniu dodatkowych ograniczeń,
- funkcja celu (kryterium): C_{\max} (*makespan*) – poszukiwane jest minimum tego kryterium.

Wyżej opisane deterministyczne modele planowania produkcji, których parametry i zmienne decyzyjne przyjmują wartości dyskretne, należą z obliczeniowego punktu widzenia do zagadnień tzw. *NP-trudnych* (czas obliczeń algorytmu komputerowego jest szybko rosnącą (wykładniczą) funkcją rozmiaru rozwiązywanego problemu). Metody rozwiązywania modeli optymalizacji dyskretnej można podzielić na dwie grupy:

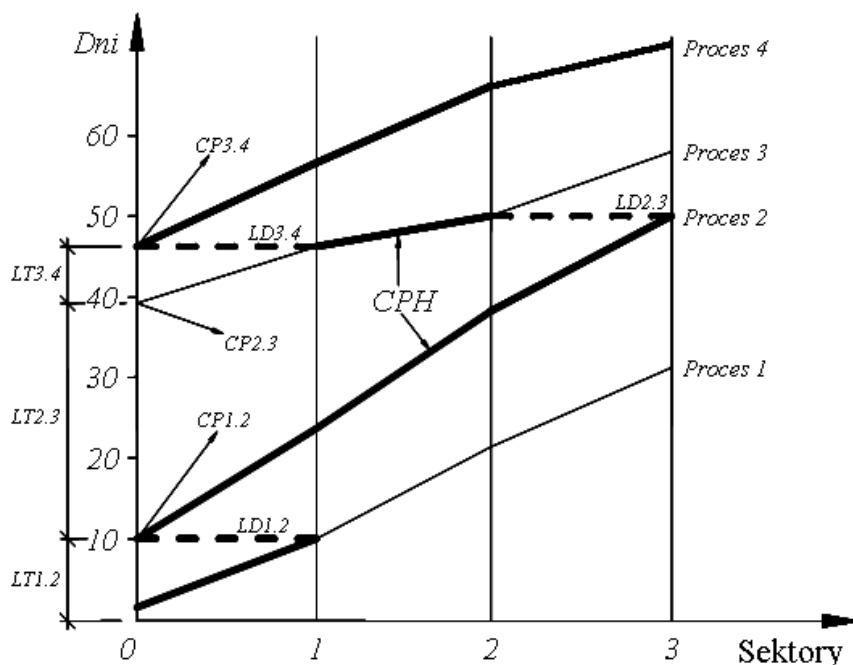
- metody pozwalające uzyskać rozwiązanie dokładne (np.: schemat B&B, programowanie dynamiczne),
- metody przybliżone, które pozwalają uzyskać rozwiązanie bliskie dokładnemu (np. algorytmy konstrukcyjne (CA), poszukiwania ewolucyjnego (GS), poszukiwania z zakazami – tabu search (TS), symulowanego wyżarzanie (SA).

4.2. Metody Sprzężeń Czasowych w systemach potokowych typu Linear Scheduling Method (LSM)

System potokowy charakteryzuje się prowadzeniem robót budowlanych z uwzględnieniem ciągłości procesów, w szczególności w robotach liniowych. Pojawia się potrzeba powiązania robót w czasie i przestrzeni przy spełnieniu warunku ciągłości robót i równomierności wykorzystania zasobów (grup roboczych, zestawów maszyn). Modelem graficznym przedsięwzięcia budowlanego o ciągłym charakterze robót może być cyklogram, odwzorowujący podstawowe parametry robót, wyznaczane na podstawie opracowanych sposobów obliczeń. Dotyczy to w szczególności: analitycznego wyznaczenia najbliższego

usytuowania procesów budowlanych LT, punktów krytycznych zbliżenia procesów CP oraz wyznaczenie całkowitego minimalnego czasu realizacji zadania TT. Zostanie uwzględniona jednoczesność występowania schematu zbieżnych oraz rozbieżnych procesów. Ważne jest również określenie krytycznych procesów budowlanych tworzących łańcuch wzajemnych zależności poprzez minimalizowanie przerw pomiędzy różnymi procesami na kolejnych działkach.

- LT – (*least time*) najkrótszy czas pomiędzy procesem w toku a kolejnym procesem – najmniejszy dystans czasowy,
- LD – (*least distance*) najmniejsza odległość miejsca pomiędzy procesem w toku a kolejnym procesem,
- CPH – (*controlling path*) – droga krytyczna procesów budowlanych,
- CL – (*controlling link*) ścieżka krytyczna – połączenie graficzne pomiędzy kolejnymi procesami,
- CP – (*controlling point*) punkt krytyczny odpowiadający rozpoczęciu kolejnego procesu,
- T – czas trwania procesu,
- TT – (*time total*) całkowity czas wykonania zadania,
- PB – (*patial-span blok*) proces typu blok o charakterze nieliniowym.



Rys. 4.1. Cyklogram w systemie potokowym

Czasy $T_{n,1}$ są to czasy wykonywania robót przez wykonawcę 1 na działkach n , czyli $T_{1,1}$ oznacza czas wykonania zadania przez wykonawcę 1, na działce 1. $T_{2,1}$ oznacza wykonanie przez wykonawcę 1 zadania na działce 2, $T_{3,2}$ oznacza natomiast wykonanie przez wykonawcę 2, zadania na działce 3, itd. Powyższe oznaczenia dotyczą macierzy czasów wykonania robót, składającej się z wierszy określających działki robocze oznaczone od 1 do n , oraz kolumn odwzorowujących wykonawców realizujących procesy budowlane, oznaczone od 1 do m . Elementami macierzy procesów, która jest modelem przedsięwzięcia są czasy przebiegu procesów na działkach roboczych T_{ij} gdzie: $i = 1, 2, \dots, n$, oraz $j = 1, 2, \dots, m$.

Szukając możliwości najbliższego usytuowania procesu 2 w odniesieniu do procesu 1, czyli poszukując najwcześniejszej możliwości rozpoczęcia procesu 2 należy obliczyć wartość $LT_{n,m}$ czyli najmniejszy dystans czasowy pomiędzy procesami. Należy wykonać następujące czynności:

1. Zbudować tabelę czasów wykonania czynności tak, aby wiersze odpowiadały działkom, a kolumny procesom technologicznym.
2. Na przecięciu kolumny 1 i wiersza 1 umieszczamy $T_{1,1}$. Czas ten wprowadzany jest deterministycznie z przedmiaru robót. Następnie w kolumnie 1 i wierszu 2 umieszczamy deterministycznie wyznaczony czas trwania procesu $T_{2,1}$. W wierszu 3, 4, 5 kolumny 1, umieszczamy czasy trwania procesów $T_{3,1}$, $T_{4,1}$, $T_{5,1}$. Opisane wyżej czasy $T_{1,1}, \dots, T_{5,1}$ odpowiadają procesowi 1, wykonywanemu na działkach 1 do 5 przez wykonawcę 1.
3. Następnie, do pierwszego wiersza kolumny 2, wstawiamy czas wykonania procesu 2, ulokowanego na działce 1 i wykonywanego przez wykonawcę 2. Pozostałe wiersze kolumny 2, uzupełniamy czasami wykonania procesu 2 przez wykonawcę 2, na kolejnych działkach.
4. Określamy $LT_{1,2}$ (Rys. 4.1.) najwcześniejszy, możliwy czas wejścia drugiego wykonawcy i rozpoczęcie procesu 2. Wartości tej poszukujemy aby wyznaczyć drogę krytyczną CPH.

4.3. Metoda wyznaczania najkrótszego czasu wykonania kolejnych procesów (LT)

Zaprezentujemy ją na najprostszym przykładzie. Przyjęto do obliczeń dwa procesy oraz trzy działki robocze. Macierz czasów wykonania zaprezentowana jest w Tab. 4.1.

Tab. 4.1. Tabela czasów wykonania robót 1, 2 na działkach 1, 2, 3

Numer działki	Proces 1	Proces 2
1	T1.1	T1.2
2	T2.1	T2.2
4	T3.1	T3.2

Wykonawca 2 może wejść na działkę 1 wtedy, gdy wykonawca 1 zakończy na niej pracę. Musimy znaleźć takie ułożenie łamanej linii procesu 2, aby znalazła się ona jak najbliżej linii łamanej procesu 1. Zatem poszukujemy takiego punktu rozpoczęcia procesu 2, który odpowiada punktowi krytycznemu CP1.2 znajdującego się na osi czasu i odpowiada rozpoczęciu pracy wykonawcy 2 (Rys. 4.1). W tym celu należy dokonać obliczeń. Tworzymy macierz jednokolumnową $\mathbf{M}_{n,m}$ określającą strukturę zadania.

Przykład liczbowy

Przyjmujemy następujące wartości liczbowe odpowiadające czasom wykonania:

Tab. 4.2. Tabela czasów wykonania robót 1, 2 na działkach 1, 2, 3

Numer działki	Proces 1	Proces 2
1	T1.1 = 10	T1.2 = 13
2	T2.1 = 12	T2.2 = 15
3	T3.1 = 9	T3.2 = 12

$$\mathbf{M}_{1,2} = \begin{bmatrix} 10 \\ 10+12-13 \\ 10+12+9-13-15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 9 \\ 3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Elementem macierzy o największej wartości jest wyraz pierwszy równy 10 i przyjmujemy tą wielkość jako LT1.2. Z punktu krytycznego CP1.2 znajdującego się na osi czasu i będącego początkiem procesu 2, prowadzimy w prawo linię poziomą do procesu 1 i w ten sposób wyznaczamy LD1.2 pomiędzy procesami 1 i 2. W postaci ogólnej przeprowadzony schemat obliczeń można przedstawić następująco:

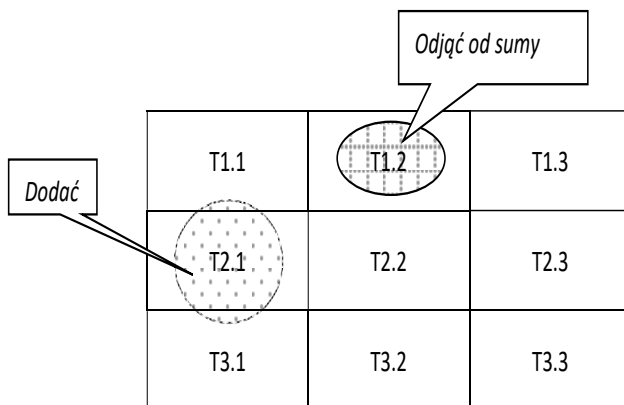
$$\mathbf{M}_{1,2} = \begin{bmatrix} T1.1 \\ T1.1+T2.1+T1.2 \\ T1.1+T2.1+T3.1-T2.2-T1.2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Z obliczonych elementów macierzy $M_{1,2}$ wybieramy wyraz o największej wartości. Wartość ta naniesiona na oś czasu jest punktem startowym procesu 2. Po narysowaniu łamanej procesu 2 znajdujemy graficznie LD1.2 (najmniejszą odległość pomiędzy procesami 1 i 2). Kończącą czynnością jest ustalenie drogi krytycznej CPH. Zaczyna się ona na końcu ostatniego procesu i postępuje w tył po ścieżce krytycznej i następnie przechodzi do poprzedzającego procesu.

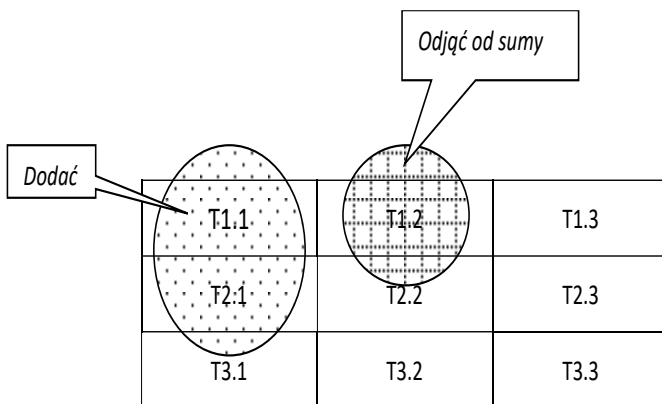
W postaci ogólnej można zapisać wyznaczenie CP i LT pomiędzy procesami 1 i 2 w następujący sposób:

$$M_{1,2} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ \dots \\ m_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T1.1 \\ T1.1 + T2.1 + T1.2 \\ T1.1 + T2.1 + T3.1 - T2.2 - T1.2 \\ \dots \\ xxxxxxxx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_1 + T2.1 - T1.2 \\ m_2 + T3.1 - T2.2 \\ \dots \\ m_{n-1} + T_{n,1} - T(n-1).2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Sposób obliczenia przedstawiono na Rys. 4.2. i Rys. 4.3.



Rys. 4.2. Graficzny model sposobu obliczania LT – krok I



Rys. 4.3. Graficzny model sposobu obliczania LT – krok II

Obliczenie wyrazów macierzy \mathbf{M} polega na sumowaniu wyrazów z kolumny po lewej stronie od pierwszego wyrazu, idac w dól do wyrazu oznaczonego kolejną liczbą m i odejmujemy wyrazy z kolumny drugiej, ale o jedną wartość mniej od dołu niż sumowane wyrazy z kolumny pierwszej. Czyli aby wyznaczyć m_3 musimy dodać trzy wartości z kolumny pierwszej i odjąć dwie wartości od góry kolumny drugiej. Wyznaczając CP i LT dla kolejnych procesów, tworzymy macierze z kolumn przynależnych do nich. Zatem tabela ogólna trwania procesów przyjmuje postać (Tab. 4.3):

Tab. 4.3. Tabela ogólna czasów trwania procesów

Numer działki	Proces 1	Proces 2	Proces ...	Proces j	Proces ...	Proces m
1	T1.1	T1.2	...	T1. j	...	T1. m
2	T2.1	T2.2	...	T2. j	...	T2. m
...
i	T i .1	T i .2	...	T i . j	...	T i . m
...
n	T n .1	T n .2	...	T n . j	...	T n . m

Wyznaczając CP i LT dla kolejnych procesów tworzymy macierze analogiczne do macierzy (4.3) z kolumn przynależnych do nich. Szukając na przykład CP_{3.4} tworzymy macierz $\mathbf{M}_{3.4}$ z kolumn 3 i 4 wykorzystując przekształcenia (4.3) znajdujemy wartość maksymalną wyrazów. Wartość ta odpowiada usytuowaniu CP_{3.4} na osi czasu i wyznacza początek procesu 4.

Ustalenie najbliższego usytuowania kolejnego procesu 3 (LT)

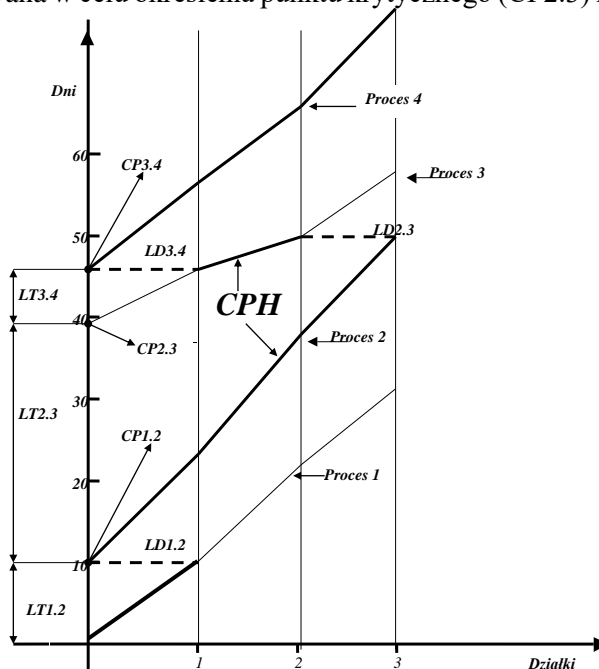
Szukając możliwości usytuowania procesu 3 w odniesieniu do procesu 2, czyli ustalając najwcześniejszy moment rozpoczęcia procesu 3 należy:

1. Zbudować kolejną tabelę czasów wykonania czynności tak, aby wiersze odpowiadały działkom, kolumny procesom 2 i 3. Dotyczy to procesu 2 i procesu 3.

Tab. 4.4. Tabela czasów wykonania robót 2, 3 na działkach 1, 2, 3

Numer działki	Proces 2	Proces 3
1	T1.2 = 13	T1.3 = 6
2	T2.2 = 15	T2.3 = 5
3	T3.2 = 12	T3.3 = 7

2. Tabelę wypełniamy deterministycznymi czasami wykonania procesów 2 i 3 na poszczególnych działkach według zasady opisanej powyżej.
3. Następnie należy wyznaczyć LT2.3 (Rys. 4.3) czyli najwcześniejszy, możliwy czas wejścia trzeciego wykonawcy i rozpoczęcia procesu 3. Wartość ta jest poszukiwana w celu określenia punktu krytycznego (CP2.3) i drogi krytycznej.



Rys. 4.4. Procesy ciągłe

Przykład liczbowy

Dane jest:

Numer działki	Proces 2	Proces 3
1	T1.2 = 13	T1.3 = 6
2	T2.2 = 15	T2.3 = 5
3	T3.2 = 12	T3.3 = 7

$$\rightarrow M_{2,3} = \begin{bmatrix} 13 \\ 13+15-6 \\ 13+15+12-6-5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13 \\ 22 \\ 29 \end{bmatrix} \xrightarrow{\max} 29$$

Zatem wartość maksymalna LT2.3 wynosi 29 oraz:

$$CP2.3 = LT1.2 + LT2.3$$

$$CP2.3 = 10 + 29 = 39$$

CP2.3 = 39 jest to wartość na osi czasu odpowiadająca najwcześniejszemu czasowi rozpoczęcia procesu 3.

Ustalenie najbliższego usytuowania procesu 4 (LT 3.4)

Szukając możliwości usytuowania procesu 4 w odniesieniu do procesu 3, czyli ustalając najwcześniejszy moment rozpoczęcia procesu 4, należy:

1. Zbudować kolejną tabelę czasów wykonania czynności tak, aby wiersze odpowiadały działkom a kolumny procesom 3 i 4.

Tab. 4.5. Tabela czasów wykonania robót 3, 4 na działkach 1, 2, 3

Numer działki	Proces 3	Proces 4
1	T1.3 = 6	T1.4 = 12
2	T2.3 = 5	T2.4 = 10
3	T3.3 = 7	T3.4 = 11

2. Tabelę wypełniamy czasami wykonania procesów 3 i 4 na poszczególnych działkach, według zasady opisanej powyżej. Następnie wyznaczamy LT3.4 (Rys. 4.3), czyli najwcześniejszy możliwy czas wejścia czwartego wykonawcy i rozpoczęcie procesu 4. Wartość ta jest poszukiwana w celu określenia punktu kontrolnego CP3.4 i drogi krytycznej.

Ilustracja liczbowa

Dane jest:

Numer działki	Proces 3	Proces 4
1	T1.3 = 6	T1.4 = 12
2	T2.3 = 5	T2.4 = 10
3	T3.3 = 7	T3.4 = 11

$$\rightarrow M_{3,4} = \begin{bmatrix} 6 \\ 6+5-12 \\ 6+5+7-12-10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ -1 \\ -4 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{mx}} 6$$

Zatem wartość maksymalna LT3.4 wynosi 6 oraz:

$$CP3.4 = LT1.2 + LT2.3 + LT3.4$$

$$CP3.4 = 10 + 29 + 6 = 45$$

CP3.4 = 45 jest to wartość na osi czasu odpowiadająca najwcześniejszemu czasowi rozpoczęcia procesu 4 (Rys. 4.3).

4.4. Wyznaczenie minimalnego czasu trwania zadania (TT)

Przedstawiona powyżej procedura umożliwia obliczenie najbliższego usytuowania kolejnych procesów budowlanych. Ważnym zagadnieniem jest również wyznaczenie drogi krytycznej CPH oraz całkowitego, czasu wykonania zadania TT. Jak można zauważyć analizując schemat (Rys. 4.4) odwzorowane procesy mają charakter zbieżny oraz rozbieżny. Wyznaczając najbliższe usytuowanie procesów budowlanych LT, uwzględnia się zbieżny i rozbieżny charakter procesów.

Aby wyznaczyć całkowity, minimalny czas wykonania zadania należy zsumować kolejne odcinki czasu pomiędzy punktami krytycznymi CP oraz dodać czas trwania ostatniego procesu. Jest to widoczne na schemacie (Rys. 4.4).

Obliczenie najkrótszego całkowitego czasu wykonania zadania

Ilustracja liczbowa

Czasy poszczególnych procesów na działkach (Tab. 4.6):

Tab. 4.6. Czasy poszczególnych procesów na działkach

Numer działki	Proces 1	Proces 2	Proces 3	Proces 4
1	10	13	6	12
2	12	15	5	10
3	9	12	7	11

Odległości pomiędzy punktami krytycznymi CP:

$$CP3.4 = LT1.2 + LT2.3 + LT3.4 = 10 + 29 + 6 = 45$$

$$TT1.4 = CP3.4 + T1.4 + T2.4 + T3.4 = 45 + 12 + 10 + 11 = 78$$

Zatem całkowity czas wykonania procesów 1-4 wynosi 78 dni.

4.5. Ustalenie przebiegu drogi krytycznej

Zaczyna się ona na końcu ostatniego procesu, a następnie przenosi się z jednego schematu procesu do poprzedniego. Przebieg drogi krytycznej z jednego procesu do poprzedniego odbywa się z uwzględnieniem najmniejszej odległości pomiędzy procesami LT. Oznacza to znalezienie tych działek, na których kolejne procesy wykonywane są w sposób ciągły, bez przerw. Pomiedzy tymi momentami, wykonywane procesy na działkach, do początku pierwszego procesu mają charakter krytyczny, a łącznie tworzą drogę krytyczną. Droga krytyczna obejmuje więc (Rys. 4.4):

- część procesu 1 do punktu krytycznego CP1.2 na działce 1,
- proces 2 od punktu krytycznego CP1.2 na działce 1 do końca procesu 2,
- część procesu 3, na działce 2,
- proces 4 od punktu krytycznego CP3.4 do końca procesu 4.

Ilustracja liczbowa

Droga krytyczna wiąże ze sobą częściowe procesy:

$$\sum T_{i,j} CPH1.4 = T 1.1 + T 1.2 + T 2.2 + T 3.2 + T 2.3 + T1.4 + T2.4 + T3.4$$

$$\sum T_{i,j} CPH1.4 = 10 + 13 + 15 + 12 + 5 + 12 + 10 + 11$$

$$\sum T_{i,j} CPH1.4 = 88$$

Suma czasów procesów na drodze krytycznej wynosi 88, natomiast całkowity czas wykonania zadania:

$$TT = CP3.4 + T4.1 + T4.2 + T4.3 = 45 + 12 + 10 + 11 = 78.$$

4.6. Wyznaczenie najbliższego usytuowania procesów budowlanych LT z uwzględnieniem pojedynczych procesów blokowych na działkach

Wiele procesów może pojawiać się jedynie na niektórych działkach. Wymaga to opracowania dodatkowego sposobu synchronizacji procesów tak, aby zapewnić najbliższe ich usytuowanie. Zagadnienie to było przedstawione w wielu pracach, np. Hamerlink (1995) i Hamerlink i Rowings (1998) dla techniki synchronizacji procesów zbieżnych (LSM) oraz Harris (1996) i Harris i Ioannou (1998), w przypadku pojedynczych procesów na działkach i zadań lokalnych. Problem ten prezentowany przez Mattila, i Park (2003) ma rozwiązanie graficzne. Za jego pomocą można określić minimalną odległość na działce oraz minimalną przerwę w czasie. Proponuje się rozwiązanie analityczne na schemacie tabelaryczno-

macierzowym, dla przypadku niezależnych działek. Sposób obliczenia najbliższego usytuowania procesów jest następujący:

1. Zbudować tabelę czasów wykonania czynności składającą się z takiej ilości kolumn jak liczba procesów. Kolumny odpowiadają procesom, wiersze działkom.
2. Tabelę wypełniamy czasami wykonania procesów 1, 2, 3 na poszczególnych działkach według zasady opisanej powyżej. Należy zaznaczyć, że dla opisanego przypadku, gdzie niektóre procesy będą jedynie wykonywane na niektórych działkach, na pozostałych gdzie nie są wykonywane – wprowadzamy do tabeli wartości zero.

Tab. 4.7. Tabela czasów wykonania robót 1, 2, 3 na działkach 1, 2, 3

Numer działki	Proces 1	Proces 2	Proces 3
1	T1.1	T1.2	T1.3
2	T2.1	T2.2	T2.3
3	T3.1	T3.2	T3.3

3. Następnie obliczamy $LT_{1,2}$, oraz $LT_{2,3}$, uwzględniając dwa przypadki dla $LT_{2,3}$:
 - jeżeli $LT > 0$ przyjmujemy tę wartość dla procesów rozbieżnych,
 - jeżeli $LT < 0$ przyjmujemy wartość ujemną dla procesów zbieżnych ale nie mniejszą niż $T_{1,1}$.

Przykład liczbowy

Czasy trwania procesów na działkach podano w Tab. 4.8:

Tab. 4.8. Tabela czasów wykonania procesów 1, 2, 3 na działkach 1, 2, 3.

Numer działki	Proces 1	Proces 2	Proces 3
1	10	0	6
2	12	15	5
3	9	0	7

Wyznaczenie $LT_{1,2}$:

Numer działki	Proces 1	Proces 2
1	10	0
2	12	15
3	9	0

$$\rightarrow M_{1,2} = \begin{bmatrix} 10 \\ 10+12-0 \\ 10+12+9-0-15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 22 \\ 16 \end{bmatrix} \xrightarrow{\max} 22$$

Wartość LT 1.2 wynosi zatem 22. Następnie wyznaczamy LT 2.3 budując kolejną dwukolumnową macierz:

Wyznaczenie LT 2.3:

Numer działki	Proces 2	Proces 3
1	0	6
2	15	5
3	0	7

$$\rightarrow \mathbf{M}_{2,3} = \begin{bmatrix} 0 & & \\ 0+15-6 & & \\ 0+15+0-6-5 & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 9 \\ 4 \end{bmatrix} \xrightarrow{\max} 9$$

Wartość LT 2.3 wynosi zatem 9.

Jest to przypadek dla procesów zbieżnych. Dla procesów rozbieżnych należy przyjąć wartość ujemną. Przeanalizujemy kolejny przykład dla LT 2.3, gdzie proces 3 jest rozbieżny:

Wyznaczenie LT 2.3:

Numer działki	Proces 2	Proces 3
1	0	20
2	15	13
3	0	7

$$\rightarrow \mathbf{M}_{2,3} = \begin{bmatrix} 0 & & \\ 0+15-20 & & \\ 0+15+0-20-5 & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -5 \\ -18 \end{bmatrix} \longrightarrow -5$$

Wybieramy tą wartość (nawet ujemną), która dotyczy rzeczywistych procesów, tj. -5, a nie -18.

Ustalenie przebiegu drogi krytycznej

Przebieg drogi krytycznej odbywa się z uwzględnieniem najmniejszej odległości pomiędzy procesami. Zaczyna się ona na końcu ostatniego procesu 3 i dochodzi do punktu krytycznego CP 2.3, następnie obejmuje proces 2 i część procesu 1 od punktu krytycznego CP 1.2. Droga krytyczna przebiega na schemacie uwzględniając (Rys. 4.4):

- część procesu 1, do punktu krytycznego CP1.2,
- proces 2, do punktu krytycznego CP2.3,
- część procesu 3 do końca.

Ilustracja liczbowa.

Przypadek pierwszy – procesy zbieżne (Rys. 4.6) Droga krytyczna wiąże ze sobą częściowe procesy na działkach będąc sumą robót krytycznych.

$$\Sigma T_{i,j} \text{ CPH1.3} = T_{1.1.} + T_{2.1} + T_{2.2} + T_{2.3} + T_{3.3}$$

$$\Sigma T_{i,j} \text{ CPH1.3} = 10 + 12 + 15 + 5 + 7$$

$$\Sigma T_{i,j} \text{ CPH1.3} = 49$$

Przypadek drugi – procesy rozbieżne (Rys. 4.5)

$$\sum T_{i,j} \text{ CPH1.3} = T_{1.1} + T_{2.1} + T_{2.2} + T_{2.3} + T_{3.3}$$

$$\sum T_{i,j} \text{ CPH1.3} = 10 + 12 + 15 + 13 + 7$$

$$\sum T_{i,j} \text{ CPH1.3} = 57$$

W obu przypadkach całkowity czas trwania procesów TT wynosi:

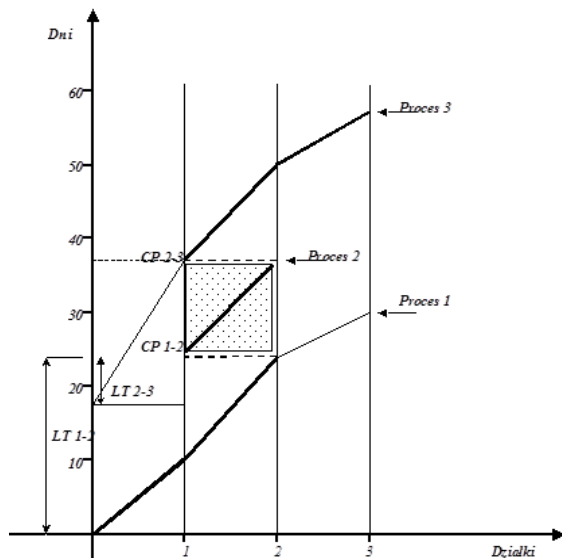
$$TT = LT_{1.2} + LT_{2.3} + T_{1.3} + T_{2.3} + T_{3.3} = 22 + 9 + 6 + 5 + 7 = 49$$

$$\text{oraz } TT = LT_{1.1} + LT_{2.3} + T_{1.3} + T_{2.3} + T_{3.3} = 22 + 5 + 20 + 13 + 7 = 57$$

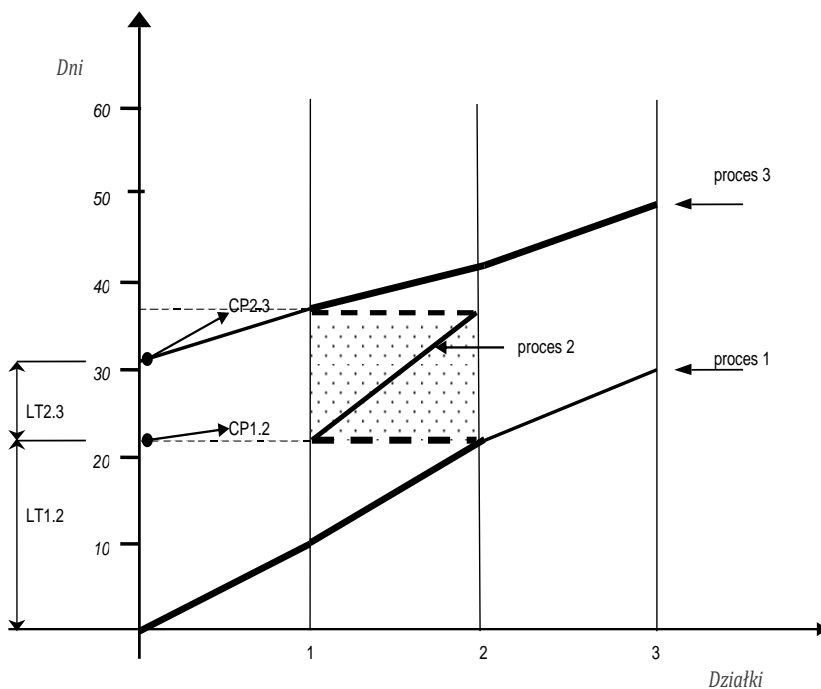
W obu przypadkach całkowity czas TT odpowiada sumie czasów robót krytycznych.

4.7. Podsumowanie

Zapewniając ciągłość wykonania procesów powodujemy, że niektóre z nich wykonywane będą równoległe. Tak więc droga krytyczna jako suma czasów wykonania robót krytycznych może być dłuższa od czasu zadania. Jednakże, ten harmonogram zapewnia najkrótszy czas wykonania prac z zachowaniem ciągłości procesów. Jest to zgodne z interesem wykonawcy dla którego przerwy w robotach zwykle oznaczają straty. Przedstawiona metoda analitycznego wyznaczania najbliższego usytuowania procesów w odniesieniu do siebie LT, obliczania położenia punktów krytycznych CP oraz identyfikacji drogi krytycznej jest rozwinięciem zagadnień prezentowanych w pracach: Hamerlink (1995), Hamerlink i Rowings (1998), Harris (1996) oraz Harris i Ioannou (1998), w przypadku pojedynczych procesów na działkach i zadań blokowych oraz przez Mattila, i Park (2003).



Rys. 4.5. Procesy ciągłe, rozbieżne z uwzględnieniem procesu blokowego



Rys. 4.6. Procesy ciągłe, zbieżne z uwzględnieniem procesu blokowego

Jeżeli mamy określone działki robocze, na których wykonywane są prace, to należy zapewnić na nich bezkolizyjność, czyli zachować zasadę, że na jednej działce pracuje jeden wykonawca. Ograniczenie to powoduje, że punkty krytyczne CP mogą być jedynie związane z terminami zakończenia prac na działkach oraz z rozpoczęciem następnych dla procesów zbieżnych lub rozbieżnych (Rys. 4.5, 4.6). Zróżnicowanie czasów prowadzenia prac na działkach powoduje, że najmniejszy dystans LD jest równy wielkości pojedynczej lub wielokrotności działek. Tak więc, ustalenie najbliższego usytuowania procesów LT, decyduje o minimalnym czasie wykonania zadania. Jak widać z analizy uzyskanych rezultatów oraz na podstawie rysunku, zachowanie ciągłości procesów, pomimo ich synchronizacji, powoduje przestoje na działkach. Wydaje się więc, że zapewnienie ciągłości procesom budowlanym nie zawsze zapewnia najkrótszy czas wykonania budowy.

Przyjęto oznaczenia i pojęcia występujące w publikacjach zagranicznych.

5. Założenia modelowe i metodyka obliczeń charakterystyk czasowych robót budowlanych z zastosowaniem potokowej metody organizacji z ciągłym prowadzeniem robót TCM I

Metoda ta, zapewnia ciągłość pracy grup roboczych, maszyn i urządzeń. Grupy robocze przechodzą bez przerw, z działki na działkę, zachowując ciągłość pracy w częściowych potokach. Jest to często spotykane ograniczenie organizacyjne. Modelowanie potoku przeprowadza się w dwóch etapach. Wyznacza się kolejność wykonywania robót na działkach (obiektach), z uwzględnieniem kryterium minimalizacji czasu, a następnie oblicza się czasowe charakterystyki niezbędne do sporządzania modelu graficznego (wykresów Gantta, cyklogramów, sieci zależności).

Rozwiązanie zagadnienia kolejnościowego można znaleźć wykorzystując zmodyfikowany algorytm Johnsona S. M. Zapewnia on wraz z metodą podziału i ograniczeń, właściwą kolejność prowadzenia robót na działkach (obiektach), zachowując ciągłość pracy w częściowych potokach oraz minimalizację czasu realizacji.

Metoda ta, umożliwiając planowanie ciągłej pracy grup roboczych, powoduje najczęściej przestoje frontów roboczych. Wyeliminować je można jedynie w przypadku modelowania potoków rytmicznych (o jednakowym czasie prowadzenia robót). W potoku formowanym tym sposobem, wraz ze wzrostem liczby działek roboczych, zwiększa się okres rozwinięcia częściowych potoków, tj. czas jaki upływa pomiędzy wejściem na plac budowy kolejnych grup roboczych. Może to powodować, jak wykazały przeprowadzone przez autorów badania, znaczne wydłużenie czasu realizacji zadania. Jest on z reguły dłuższy od czasu realizacji kompleksu obiektów, planowanych z wykorzystaniem metody, uwzględniającej równocześnie sprzężenia między środkami realizacji i frontami roboczymi tj. TCM III.

W obliczeniach metodą organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji wykorzystamy wzór na całkowity czas trwania realizacji całego kompleksu robót budowlanych z ciągłym wykorzystaniem środków realizacji, tj. (przyjęto zapis wg. struktury macierzowej):

$$T = \sum_{j=2}^m t_j^r + \sum_{i=1}^n t_{im}, \quad (5.1)$$

gdzie t_j^r jest czasem trwania rozwinięcia kolejnego częściowego potoku j , czyli różnicą czasów rozpoczęcia j oraz $(j-1)$ -częściowego potoku.

Drugi składnik tej sumy, czyli:

$$\sum_{i=1}^n t_{im}, \quad (5.2)$$

nie zależy od kolejności wykonywania prac na poszczególnych frontach.

W związku z tym poszukiwanie najkrótszego czasu T trwania realizacji całego kompleksu robót możemy ograniczyć do zminimalizowania pierwszego składnika, czyli:

$$T_1 = \sum_{j=2}^m t_j^r. \quad (5.3)$$

Czas rozwinięcia t_j^r zależy od wzajemnej, synchronizacji dwóch sąsiednich częściowych potoków i w związku z tym zależy od kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach roboczych. Można go zapisać następująco:

$$t_j^r = \max_{1 \leq k \leq n} \left[\sum_{i=1}^k t_{i,j-1} - \sum_{i=1}^{k-1} t_{i,j} \right]. \quad (5.4)$$

Jeżeli zależy nam tylko na jednym rozwiązaniu optymalnym, to wystarczy badać drzewo wariantów tylko tak długo, aż dla jakiegoś w całości rozwiniętego wariantu (na samym dole drzewa) GMM będzie aktualnie minimalne. Dla pełnego przedstawienia procesu ustalania właściwej kolejności realizacji robót niezbędne jest określenie sposobu obliczania GMM. Należy w tym celu wykorzystać tzw. zmodyfikowany algorytm Johnsona, który umożliwia ustalenie właściwej kolejności frontów roboczych przy dwóch częściowych potokach.

5.1. Zasady obliczeń charakterystyk czasowych robót

Dane wejściowe stanowi macierz 2-kolumnowa:

$$\mathbf{A} = [a_{i,k}], i = 1, \dots, n, k = 1, 2, \quad (4.5)$$

która odpowiada dwóm sąsiednim częściowym potokom. W wyniku obliczeń otrzymujemy macierz 3-kolumnową:

$$\mathbf{B} = [b_{i,k}], i = 1, \dots, n, k = 1, 2, 3. \quad (4.6)$$

Dwie pierwsze kolumny macierzy \mathbf{B} składają się z tych samych wierszy co macierz \mathbf{A} , ale w kolejności wyznaczonej przez algorytm Johnsona.

W trzeciej kolumnie znajdują się numery wyjściowe przemieszczanych wierszy z informacją, z którego frontu robót pochodzą.

Poniżej został przedstawiony zmodyfikowany algorytm Johnsona uwzględniający zależności specyficzne dla robót budowlanych.

Przed przystąpieniem do badania drzewa wariantów należy obliczyć kolejno macierze pomocnicze $\mathbf{B}^j, j = 1, \dots, (m-1)$. Macierz \mathbf{B}^j powstaje przez zastosowanie powyżej opisanego algorytmu Johnsona dla macierzy danych \mathbf{A} złożonej z kolumn o numerach $j, (j+1)$, czyli:

$$\mathbf{A} = [t_{i,j}], i = 1, \dots, n, k = j, j+1. \quad (4.7)$$

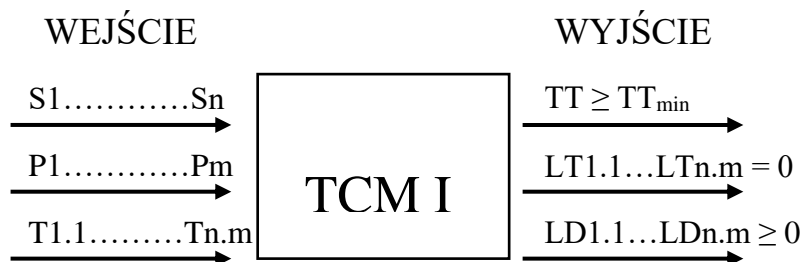
Obliczenie GMM w przypadku gdy ustalone są kolejno fronty (wiersze) o numerach $(u_1, \dots, u_s), s \leq n$. Oznaczmy przez D zbiór (u_1, \dots, u_s) złożony z numerów ustalonych już wierszy. Tworzymy macierze pomocnicze, w których wprowadzamy kolejno dwukolumnowe podmacierze przekształcone wg. zasad algorytmu Johnsona. Minimalna wartość wskaźnika GMM, pozwala na przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań, eliminując niekonkurencyjne warianty.

5.1.1. Charakterystyka Metody TCM I

(według oznaczeń z publikacji zagranicznych, przyjęte w p. 4.2).

Metodę TCM I stosuje się w przypadku kiedy założeniem priorytetowym jest zapewnienie ciągłości wykonywania procesów $P_1 \dots P_m$ w sektorach $S_1 \dots S_n$. Zwykle wiąże się to z zapewnieniem ciągłości pracy wykonawcom lub pracy sprzętu.

Ze względu na przyjętą technologię zapewnienie ciągłości procesu może stać się założeniem priorytetowym np. w przypadku konieczności betonowania bez przerw technologicznych. Ta sama sytuacja ma miejsce w odniesieniu do procesów wiodących czyli umożliwiających rozpoczęcie wszystkich zależnych od niego prac. Zdarza się, że ze względów ekonomicznych zatrudnienie określonego wykonawcy lub sprzętu po uwzględnieniu postojów staje się nieopłacalne. Nie przynosi również zysku wielokrotne podejmowanie pracy przez tego samego wykonawcę ze względu na transport i montaż sprzętu oraz urządzeń. Niektóre firmy wykonawcze szczególnie wysoko wyspecjalizowane, stawiają jako warunek podjęcia zadania zapewnienie ciągłości ich prac. Nadwyżka popytu nad podażą niektórych usług powoduje, że zapewnienie ciągłości pracy pewnym wykonawcom staje się założeniem priorytetowym. Wtedy rozwiązaniem umożliwiającym prawidłowe harmonogramowanie prac jest TCM I.

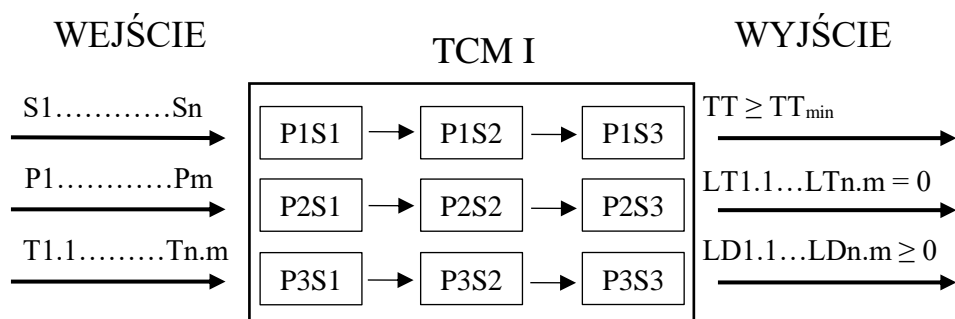


Rys. 5.1. Schemat przebiegu obliczeń i warunki wyjściowe TCM I

Do obliczeń przyjmujemy z góry założone i obliczone w sposób deterministyczny sektory $S1 \dots Sn$, procesy $P1 \dots Pm$ uszeregowane w kolejności technologicznej oraz czasy ich wykonania $T1.1 \dots Tn.m$. Zakłada się, że nie jest na tym etapie ostatecznie ustalona kolejność wykonywania prac w poszczególnych sektorach. Będzie ona ostatecznie ustalona na pierwszym etapie obliczeń. Zwykle najkorzystniejsze wyniki obliczeń uzyskuje się gdy czas trwania procesów w ostatnim sektorze jest najkrótszy w odniesieniu do pozostałych. Jako efekt obliczeń TCM I otrzymamy całkowity czas wykonania przedsięwzięcia TT , który będzie dłuższy lub równy minimalnemu czasowi trwania przedsięwzięcia TT_{min} .

Natomiast dystanse czasowe $LT1.1 \dots LTn.m$ pomiędzy procesami w toku a kolejnymi występującymi po nich zawsze są równe zero – czyli zagwarantowana została ciągłość procesów $P1 \dots Pm$. Jednocześnie prawdopodobnie nie uzyskamy ciągłości pracy w sektorach, jakkolwiek czasem może się to zdarzyć, nie jest to jednak założenie priorytetowe.

Na Rys. 5.2 przedstawiono powiązania priorytetowe czyli takie, dla których LT zawsze muszą być równe zero i stanowić będą bazę w tworzeniu harmonogramu.



Rys. 5.2. Powiązania priorytetowe w metodzie TCM I

5.2. Aplikacja Microsoft EXCEL

Poniżej przedstawiono tabelaryczny sposób przygotowania danych do przeprowadzania obliczeń, parametrów czasowych robót budowlanych w celu tworzenia harmonogramów-cyklogramów uwzględniających strukturę podziału prac i podział na sektory – działki robocze. W Tab. 5.1, i Tab. 5.2 przedstawiono oznaczenia dotyczące normatywnych wartości czasów wykonania robót oraz wartości współrzędnych na osiach cyklogramu. W Tab. 5.3 podano sposób wyznaczania pozostałych wartości dla kompleksu procesów budowlanych z uwzględnieniem warunku ciągłości robót budowlanych.

Tab. 5.1. Oznaczenia czasów trwania i czasów rozpoczęcia procesów budowlanych

Proces	Czas rozpoczęcia procesu	Czas trwania procesu 1	Czas trwania procesu 2	...	Czas trwania procesu $n-1$	Czas trwania procesu n
Proces m	t_{0m}	t_{1m}	t_{2m}	...	$t_{(n-1)m}$	t_{nm}
...
Proces $(k+1)$	$t_{0(k+1)}$	$t_{1(k+1)}$	$t_{2(k+1)}$	...	$t_{(n-1)(k+1)}$	$t_{n(k+1)}$
Proces k	t_{0k}	t_{1k}	t_{2k}	...	$t_{(n-1)k}$	t_{nk}
Proces $(k-1)$	$t_{0(k-1)}$	$t_{1(k-1)}$	$t_{2(k-1)}$	...	$t_{(n-1)(k-1)}$	$t_{n(k-1)}$
...
Proces 2	t_{02}	t_{12}	t_{22}	...	$t_{(n-1)2}$	t_{n2}
Proces 1	t_{01}	t_{11}	t_{21}	...	$t_{(n-1)1}$	t_{n1}

Tab. 5.2. Współrzędne punktów do tworzenia cyklogramu

	Wartości na osi y dla x_0	Wartości na osi y dla x_1	Wartości na osi y dla x_2	...	Wartości na osi y dla $x_{(n-1)}$	Wartości na osi y dla x_n
Wartości y dla procesu m	Y_{0m}	Y_{1m}	Y_{2m}	...	$Y_{(n-1)m}$	Y_{nm}
...
Wartości y dla procesu $(k+1)$	$Y_{0(k+1)}$	$Y_{1(k+1)}$	$Y_{2(k+1)}$	...	$Y_{(n-1)(k+1)}$	$Y_{n(k+1)}$
Wartości y dla procesu k	Y_{0k}	Y_{1k}	Y_{2k}	...	$Y_{(n-1)k}$	Y_{nk}
Wartości y dla procesu $(k-1)$	$Y_{0(k-1)}$	$Y_{1(k-1)}$	$Y_{2(k-1)}$	...	$Y_{(n-1)(k-1)}$	$Y_{n(k-1)}$
...
Wartości y dla procesu 2	Y_{02}	Y_{12}	Y_{22}	...	$Y_{(n-1)2}$	Y_{n2}

Wartości y dla procesu 1	Y_{01}	Y_{11}	Y_{21}	...	$Y_{(n-1)1}$	Y_{n1}
--------------------------------	----------	----------	----------	-----	--------------	----------

Tab. 5.3. Wzory do obliczania wartości na osi czasu dla poszczególnych procesów

	Wartości na osi y dla x_0	Wartości na osi y dla x_1	Wartości na osi y dla x_2	Wartości na osi y dla $x_{(n-1)}$	Wartości na osi y dla x_n	
Wartości y dla procesu m	$Y_{0m} =$ *****	$Y_{1m} =$ $t_{0m} + t_{1m} =$ $Y_{0m} + t_{1m}$	$Y_{2m} =$ $t_{0m} + t_{1m} + t_{2m}$ $= Y_{1m} + t_{2m}$	...	$Y_{(n-1)m} =$ $t_{0m} + t_{1m} + t_{2m}$ + ... + $t_{(n-1)m} =$ $Y_{(n-2)m} +$ $t_{(n-1)m}$	$Y_{nm} =$ $t_{0m} + t_{1m} + t_{2m}$ + ... + $t_{(n-1)m} + t_{nm} =$ $Y_{(n-1)m} + t_{nm}$
...	
Wartości y dla procesu $(k+1)$	$Y_{0(k+1)} =$ *****	$Y_{1(k+1)} =$ $t_{0(k+1)} +$ $t_{1(k+1)} =$ $Y_{0(k+1)} +$ $t_{1(k+1)}$	$Y_{2(k+1)} =$ $t_{0(k+1)} +$ $t_{1(k+1)} +$ $t_{2(k+1)} =$ $Y_{1(k+1)} +$ $t_{2(k+1)}$	...	$Y_{(n-1)(k+1)} =$ $t_{0(k+1)} +$ $t_{1(k+1)} +$... $t_{2(k+1)} +$... + $t_{(n-1)(k+1)} =$ $Y_{(n-2)(k+1)} +$ $t_{(n-1)(k+1)}$	$Y_{n(k+1)} =$ $t_{0(k+1)} +$ $t_{1(k+1)} +$ $t_{2(k+1)} +$... + $t_{(n-1)(k+1)}$ $+ t_{n(k+1)} =$ $Y_{(n-1)(k+1)}$ $+ t_{n(k+1)}$
Wartości y dla procesu k	$Y_{0k} =$ ***	$Y_{1k} =$ $t_{0k} + t_{1k} =$ $Y_{0k} + t_{1k}$	$Y_{2k} =$ $t_{0k} + t_{1k} + t_{2k} =$ $Y_{1k} + t_{2k}$	...	$Y_{(n-1)k} =$ $t_{0k} + t_{1k} + t_{2k}$ + ... + $t_{(n-1)k}$ $= Y_{(n-2)k} +$ $t_{(n-1)k}$	$Y_{nk} =$ $t_{0k} + t_{1k} + t_{2k}$ + ... + $t_{(n-1)k}$ $+ t_{nk} =$ $Y_{(n-1)k} + t_{nk}$
Wartości y dla procesu $(k-1)$	$Y_{0(k-1)} =$ ***	$Y_{1(k-1)} =$ $t_{0(k-1)} +$ $t_{1(k-1)} =$ $Y_{0(k-1)} +$ $t_{1(k-1)}$	$Y_{2(k-1)} =$ $t_{0(k-1)} +$ $t_{1(k-1)} + t_{2(k-1)}$ $= Y_{1(k-1)}$ $+ t_{2(k-1)}$	...	$Y_{(n-1)(k-1)} =$ $t_{0(k-1)} + t_{1(k-1)}$ $+ t_{2(k-1)}$ + ... + $t_{(n-1)(k-1)} =$ $Y_{(n-2)(k-1)} +$ $t_{(n-1)(k-1)}$	$I_{n(k-1)} =$ $t_{0(k-1)} + t_{1(k-1)}$ $+ t_{2(k-1)}$ + ... + $t_{(n-1)(k-1)}$ $+ t_{en(k-1)} =$ $Y_{(n-1)(k-1)}$ $+ t_{en(k-1)}$
...	
Wartości y dla procesu 2	$Y_{02} =$ *	$Y_{12} =$ $t_{02} + t_{12}$	$Y_{22} =$ $t_{02} + t_{12} + t_{22} =$ $Y_{12} + t_{22}$	...	$Y_{(n-1)2} =$ $t_{02} + t_{12} + t_{22}$ + ... + $t_{(n-1)2}$ $= Y_{(n-2)2} +$ $t_{(n-1)2}$	$Y_{n2} =$ $t_{02} + t_{12} + t_{22}$ + ... + $t_{(n-1)2} + t_{n2} =$ $Y_{(n-1)2} + t_{n2}$

Wartości y dla procesu 1	$Y_{01}=t_{01}$	Y_{11} $t_{01} + t_{11}$	$Y_{21}=$ $t_{01} + t_{11} + t_{21}$...	$Y_{(n-1)1}=$ $t_{01} + t_{11} + t_{21}$ + ... + $t_{(n-1)1}$	$Y_{n1}=$ $t_{01} + t_{11} + t_{21}$ + ... + $t_{(n-1)1} + t_{n1}$
--------------------------------	-----------------	-------------------------------	---	-----	--	---

Gdzie:

Wartości oznaczone gwiazdkami obliczane są jako maksimum ze zbiorów, których elementy wyznaczone są iteracyjnie jak poniżej:

$$*Y_{02} = t_{02} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} t_{01} \\ t_{01} + t_{11} \\ (t_{01} + t_{11} + t_{21}) - t_{12} \\ (...) \\ (t_{01} + t_{11} + t_{21} + \dots + t_{(n-1)1} + t_{n1}) - (t_{12} + t_{22} + \dots + t_{(n-1)2}) \end{array} \right\}$$

$$**Y_{0(k-1)} = t_{0(k-1)} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} t_{0(k-2)} \\ t_{0(k-2)} + t_{1(k-2)} \\ (t_{0(k-2)} + t_{1(k-2)} + t_{2(k-2)}) - t_{1(k-1)} \\ (...) \\ (t_{0(k-2)} + t_{1(k-2)} + t_{2(k-2)} + \dots + t_{(n-1)(k-2)} + t_{n(k-2)}) - (t_{1(k-1)} + t_{2(k-1)} + \dots + t_{(n-1)(k-1)}) \end{array} \right\}$$

$$***Y_{0k} = t_{0k} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} t_{0(k-1)} \\ t_{0(k-1)} + t_{1(k-1)} \\ (t_{0(k-1)} + t_{1(k-1)} + t_{2(k-1)}) - t_{1k} \\ (...) \\ (t_{0(k-1)} + t_{1(k-1)} + t_{2(k-1)} + \dots + t_{(n-1)(k-1)} + t_{n(k-1)}) - (t_{1k} + t_{2k} + \dots + t_{(n-1)k}) \end{array} \right\}$$

$$****Y_{0(k+1)} = t_{0(k+1)} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} t_{0k} \\ t_{0k} + t_{1k} \\ (t_{0k} + t_{1k} + t_{2k}) - t_{1(k+1)} \\ (...) \\ (t_{0k} + t_{1k} + t_{2k} + \dots + t_{(n-1)k} + t_{nk}) - (t_{1(k+1)} + t_{2(k+1)} + \dots + t_{(n-1)(k+1)}) \end{array} \right\}$$

$$****Y_{0m} = t_{0m} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} t_{0(m-1)} \\ t_{0(m-1)} + t_{1(m-1)} \\ (t_{0(m-1)} + t_{1(m-1)} + t_{2(m-1)}) - t_{1m} \\ (...) \\ (t_{0(m-1)} + t_{1(m-1)} + t_{2(m-1)} + \dots + t_{(n-1)(m-1)} + t_{n(m-1)}) - (t_{1m} + t_{2m} + \dots + t_{(n-1)m}) \end{array} \right\}$$

5.3. Przykład obliczeniowy

Przedstawiono przykład liczbowy, w którym w kolejnych krokach procedury obliczeniowej uzyskujemy wartości niezbędne do tworzenia cyklogramu. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano współrzędne umożliwiające wyznaczenie minimalnych przerw pomiędzy kolejnymi liniami cyklogramu. Jednocześnie zostaje zapewniona ciągłość procesów budowlanych. Wyznaczono również ciągi procesów tworzące ścieżki krytyczne.

Tab. 5.4. Czasy trwania i czasy rozpoczęcia procesów budowlanych przedsięwzięcia

<i>x</i>	<i>ynk</i>	<i>tn1</i>	<i>tn2</i>	<i>tn3</i>	<i>tn4</i>	<i>tn5</i>	<i>tn6</i>	<i>tn7</i>	<i>tn8</i>	<i>tn9</i>	<i>tn10</i>
1	<i>t0k</i>	0	1	16	22	27	33	42	53	54	63
2	<i>t1k</i>	1	4	4	5	3	4	3	1	4	3
3	<i>t2k</i>	3	6	2	4	5	3	4	3	6	5
4	<i>t3k</i>	5	7	3	3	4	5	6	5	7	5
5	<i>t4k</i>	4	4	2	4	3	6	5	4	3	7
6	<i>t5k</i>	3	5	5	3	5	3	3	2	6	5
7	<i>t6k</i>	4	2	5	5	7	4	5	6	5	3
8	<i>t7k</i>	6	3	3	2	3	6	3	7	3	5
9	<i>t8k</i>	4	3	4	6	4	7	3	2	5	3
10	<i>t9k</i>	5	4	3	3	5	2	5	5	4	4
11	<i>t10k</i>	2	3	5	4	2	4	6	3	6	5

Tab. 5.5. Współrzędne punktów do tworzenia cyklogramu

<i>x</i>	<i>yn1</i>	<i>yn2</i>	<i>yn3</i>	<i>yn4</i>	<i>yn5</i>	<i>yn6</i>	<i>yn7</i>	<i>yn8</i>	<i>yn9</i>	<i>yn10</i>
1	0	1	16	22	27	33	42	53	54	63
2	1	5	20	27	30	37	45	54	58	66
3	4	11	22	31	35	40	49	57	64	71
4	9	18	25	34	39	45	55	62	71	76
5	13	22	27	38	42	51	60	66	74	83
6	16	27	32	41	47	54	63	68	80	88
7	20	29	37	46	54	58	68	74	85	91

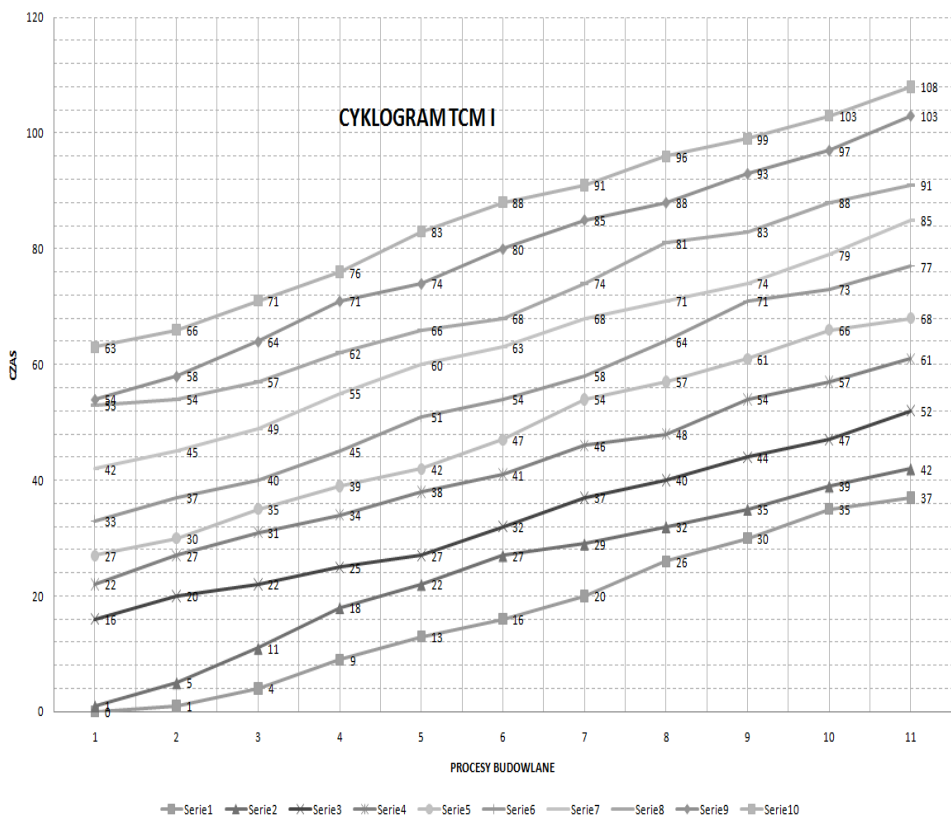
8	26	32	40	48	57	64	71	81	88	96
9	30	35	44	54	61	71	74	83	93	99
10	35	39	47	57	66	73	79	88	97	103
11	37	42	52	61	68	77	85	91	103	108

Tab. 5.6. Arkusz iteracji czasów rozpoczęcia procesów

	iteracja								
<i>x</i>	<i>n2</i>	<i>n3</i>	<i>n4</i>	<i>n5</i>	<i>n6</i>	<i>n7</i>	<i>n8</i>	<i>n9</i>	<i>n10</i>
1	1	4	4	5	3	4	3	1	4
2	0	1	6	4	4	6	0	0	7
3	-1	11	0	4	5	5	9	-1	9
4	-4	12	-1	4	3	5	9	-4	7
5	-5	15	0	4	2	3	8	-5	6
6	-6	12	2	4	6	4	11	-5	6
7	-2	10	0	-1	5	5	8	-3	6
8	-1	10	2	2	3	9	1	-4	6
9	1	10	-1	1	1	8	7	-4	7
10	-1	10	1	0	1	7	8	-5	9
MAX	1	15	6	5	6	9	11	1	9

Tab. 5.7. Współrzędne punktów do tworzenia cyklogramu z oznaczoną ścieżką krytyczną numer 1

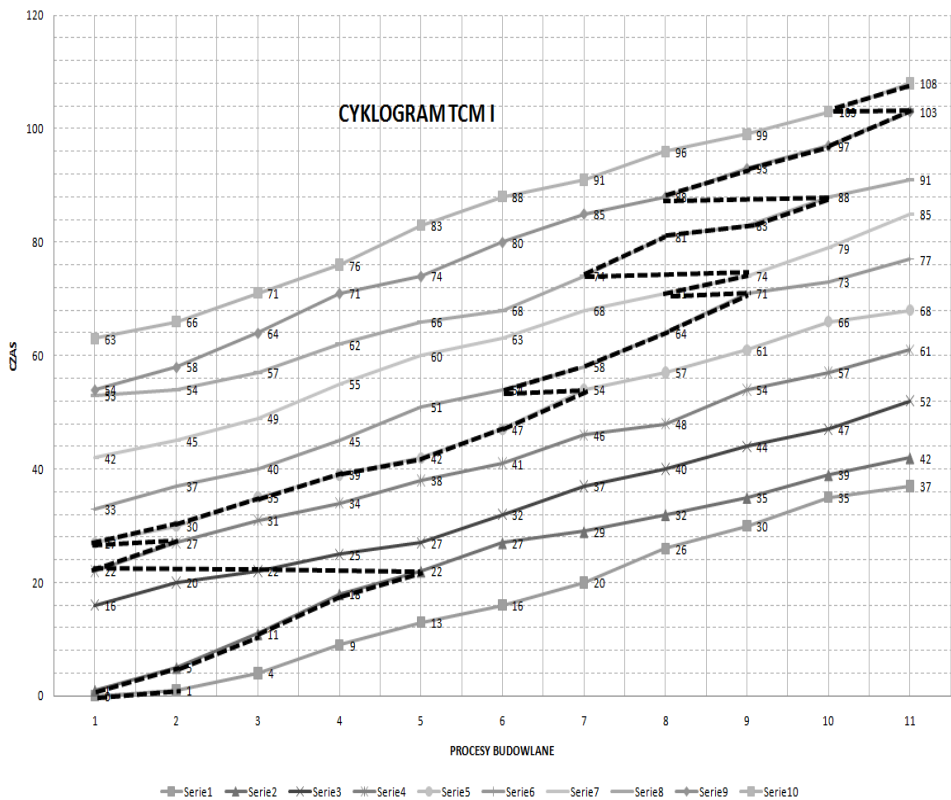
<i>x</i>	<i>yn1</i>	<i>yn2</i>	<i>yn3</i>	<i>yn4</i>	<i>yn5</i>	<i>yn6</i>	<i>yn7</i>	<i>yn8</i>	<i>yn9</i>	<i>yn10</i>
1	0	1	16	22	27	33	42	53	54	63
2	1	5	20	27	30	37	45	54	58	66
3	4	11	22	31	35	40	49	57	64	71
4	9	18	25	34	39	45	55	62	71	76
5	13	22	27	38	42	51	60	66	74	83
6	16	27	32	41	47	54	63	68	80	88
7	20	29	37	46	54	58	68	74	85	91
8	26	32	40	48	57	64	71	81	88	96
9	30	35	44	54	61	71	74	83	93	99
10	35	39	47	57	66	73	79	88	97	103
11	37	42	52	61	68	77	85	91	103	108



Rys. 5.3. Cyklogram przedsięwzięcia budowlanego ze ścieżką krytyczną nr 1

Tab. 5.8. Współrzędne punktów do tworzenia cyklogramu z oznaczoną ścieżką krytyczną numer 2

<i>x</i>	<i>yn1</i>	<i>yn2</i>	<i>yn3</i>	<i>yn4</i>	<i>yn5</i>	<i>yn6</i>	<i>yn7</i>	<i>yn8</i>	<i>yn9</i>	<i>yn10</i>
1	0	1	16	22	27	33	42	53	54	63
2	1	5	20	27	30	37	45	54	58	66
3	4	11	22	31	35	40	49	57	64	71
4	9	18	25	34	39	45	55	62	71	76
5	13	22	27	38	42	51	60	66	74	83
6	16	27	32	41	47	54	63	68	80	88
7	20	29	37	46	54	58	68	74	85	91
8	26	32	40	48	57	64	71	81	88	96
9	30	35	44	54	61	71	74	83	93	99
10	35	39	47	57	66	73	79	88	97	103
11	37	42	52	61	68	77	85	91	103	108



Rys. 5.4. Cyklogram przedsięwzięcia budowlanego ze ścieżką krytyczną numer 2

5.4. Podsumowanie

W rozdziale tym przedstawiono sposób wyznaczania parametrów czasowych kompleksu robót budowlanych stosując metodę sprzężeń czasowych TCM I. Do obliczeń i tworzenia harmonogramu-cyklogramu robót budowlanych zastosowano program EXCEL, który został przetestowany na danych liczbowych.

6. Założenia modelowe i metodyka obliczeń charakterystyk czasowych robót budowlanych z zastosowaniem metody potokowej organizacji z ciągłym prowadzeniem robot na frontach roboczych TCM II

Podstawową właściwością metody jest możliwość planowania ciągłej pracy na frontach roboczych. Minimalny czas trwania realizacji kompleksu robót można otrzymać po ustaleniu takiej kolejności prowadzenia robót, przy której suma czasów realizacji pierwszego procesu budowlanego i zakończenia pozostałych jest najmniejsza. Analizując schematy graficzne potoku (cyklogramy) możemy zauważyć, że na czas realizacji kompleksu robót wpływa środkowy blok procesów budowlanych. Spostrzeżenie to zostało wykorzystane w opracowanym algorytmie ustalania kolejności realizowanych obiektów, zapewniającej najkrótszy czas realizacji. Im większa część robót zostaje "ukryta" jako równoległa, tym będzie mniejsza wartość sumy czasów zakończenia. Przegląd możliwych kombinacji z wykorzystaniem drzewa wariantów i zastosowaniem pomocniczego wskaźnika "ograniczenie możliwego minimum" (GMM) zapewni wybór racjonalnej kolejności prowadzenia robót na frontach. Po znalezieniu właściwej kolejności, wyznacza się podstawowe charakterystyki czasowe modelowanego potoku.

Ciągłe prowadzenie robót na działkach jest możliwe, gdy dopuścimy przerwy w pracy grup roboczych. Mogą one przechodzić z działki na działkę natychmiast po zejściu z niej poprzedzającej brygady. Warunek ten jest możliwy do wypełnienia, gdy dana grupa robocza wykonała robotę na poprzedniej w ustalonej kolejności działce i oczekuje na zatrudnienie. Ograniczenie to ma wpływ na czas realizacji kompleksu obiektów, który jest z reguły dłuższy od czasu wyznaczonego z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi.

6.1. Określenie całkowitego czasu realizacji

Całkowity czas realizacji kompleksu robót w przypadku organizacji z ciągłym prowadzeniem robót na poszczególnych frontach roboczych można wyznaczyć z zależności:

$$T = \sum_{j=1}^{m-1} t_{1,j} + \sum_{i=1}^n t_{i,m} + \sum_{r=1}^{m-1} \Delta_r, \quad (6.1)$$

gdzie:

Δ_r jest dodatnią różnicą między częścią "ukrywaną" frontu $(r+1)$, a "ukrywającą" frontu r wyrażającą się wzorem:

$$\Delta_r = \max\{\bar{\Delta}_r, 0\}, \quad (6.2)$$

$$\bar{\Delta}_r = \max_{1 \leq k \leq n-1} \left\{ \sum_{n=k}^{m-1} t_{r+1,j} - \sum_{j=k+1}^m t_{r,j} \right\}. \quad (6.3)$$

Liczby Δ_r są przerwami (przestojami) spowodowanymi niemożliwością pracy każdej z poprzednich brygad jednocześnie na dwóch frontach r i $(r+1)$.

Podobnie jak w metodzie TCM I dla zbadania różnych możliwych kolejności frontów roboczych wykorzystuje się drzewo wariantów.

Należy określić wartość liczbową granicznie możliwego minimum (GMM) dla wierszy „ustalonych”, która jest mniejsza od czasu realizacji T przy dowolnej kolejności wierszy „nieustalonych”.

W tym celu zdefiniujemy dwie macierze \mathbf{P} , \mathbf{R} . Macierz $\mathbf{P} = [P_i]$, $i=1, \dots, n$ zawiera w porządku malejącym liczby:

$$\sum_{j=2}^m t_{ij}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (6.4)$$

Są to sumy wszystkich, oprócz pierwszego, elementów w danym wierszu. Podobnie macierz:

$$\mathbf{R} = [q_{i,j}], \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, 2, \quad (6.5)$$

zawiera w pierwszej kolumnie w porządku malejącym liczby:

$$\sum_{j=1}^{m-1} t_{ij}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6.6)$$

które są sumami wszystkich, oprócz ostatniego, elementów w danym wierszu. Natomiast druga kolumna zawiera numery wierszy (frontów) przed uporządkowaniem.

Ustala się kolejno wiersze o numerach (u_1, \dots, u_s) . Niech n_k oznacza numer wiersza k macierzy R zawierającego na drugim miejscu liczbę nie należącą do zbioru (u_1, \dots, u_s) , czyli wiersza nieustalonego ($q_{n_k,2} \in \langle u_1, \dots, u_s \rangle$). Zdefiniujemy:

$$d_k = p_k - q_{n_k,1}, \quad k = 1, \dots, (n-s).$$

Liczby d_k są hipotetycznymi wielkościami Δ_r dla wierszy nieustalonych. Po ustaleniu wszystkich wierszy możliwe przerwy (przestoje), czyli Δ_k będą większe.

Jeżeli przy obliczaniu GMM, we wzorze na czas T realizacji kompleksu robót, zastąpimy Δ_r przez odpowiednie d_k , to otrzymamy GMM nie większe od czasu T . Przy dowolnej kolejności nieustalonych jeszcze wierszy d_k zapewnia znalezienie optymalnego rozwiązania zagadnienia przy zastosowaniu drzewa wariantów.

$$\text{GMM} = \sum_{j=1}^{m-1} t_{u1,j} + \sum_{i=1}^n t_{i,m} + \sum_{r=1}^{s-1} \Delta_r + \sum_{k=1}^{n-s} d_d, \quad (6.7)$$

gdzie:

$$\Delta_r = \max(\bar{\Delta}_r, 0), \quad (6.8)$$

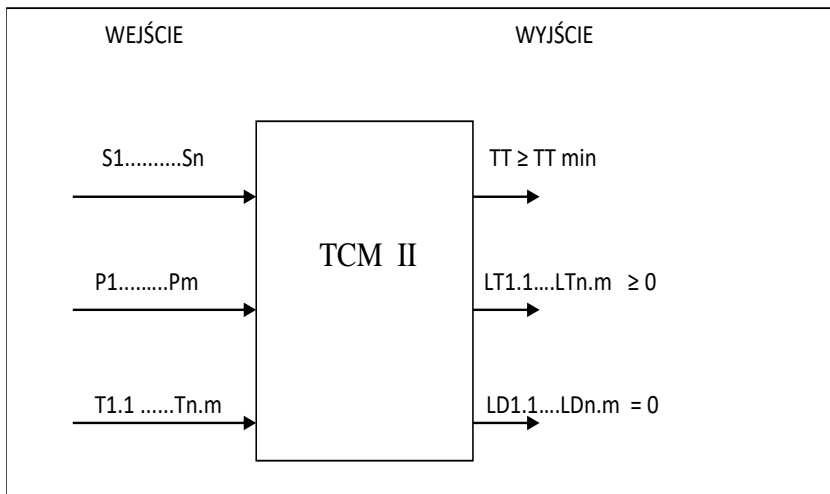
$$\bar{\Delta}_r = \max_{1 \leq k \leq n-1} \left[\sum_{j=k}^{m-1} t_{ur+1,j} - \sum_{j=k+1}^m t_{ur,j} \right]. \quad (6.9)$$

Podobnie jak w poprzedniej metodzie przeszukujemy drzewo wariantów rozwijając zawsze wariant o aktualnie najmniejszym GMM, a kończymy postępowanie wtedy, gdy minimum jest realizowane tylko przez warianty o ustalonych wszystkich wierszach.

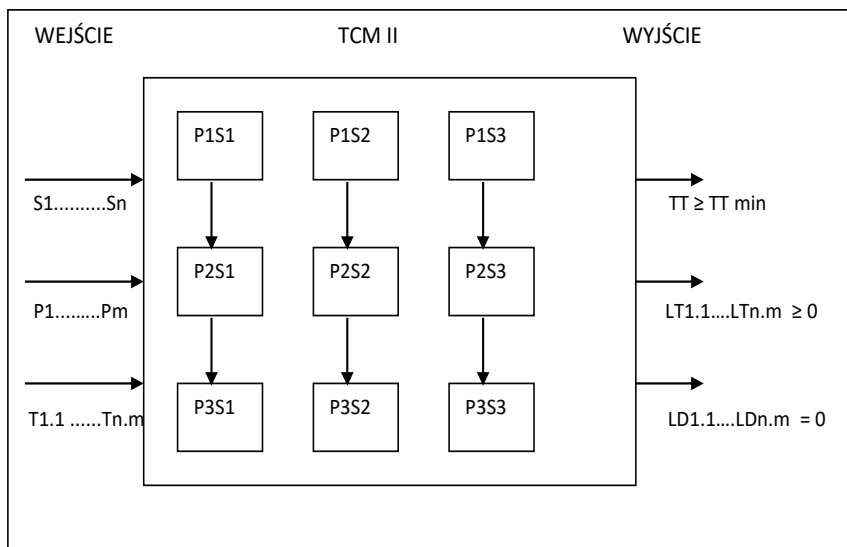
Metodę TCM II stosuje się w przypadku kiedy założeniem priorytetowym jest zapewnienie ciągłości pracy w poszczególnych sektorach $S1 \dots Sn$ wykonywanych procesów $P1 \dots Pm$. Zakłada się, że nie może być przestoju w żadnym sektorze w ciągu trwania całego przedsięwzięcia czyli LD w każdym przypadku musi wynosić zero. Natomiast dopuszcza się przerwy w pracy poszczególnych wykonawców, czyli nie zostaje zachowana ciągłość wykonywania poszczególnych procesów. Wiąże się to z czasem oczekiwania LT różnym od zera danego wykonawcy lub też z koniecznością tymczasowej likwidacji zasobów i przeniesienia ich na inną budowę. Przyjęcie jako priorytetu zapewnienia ciągłości pracy w poszczególnych sektorach może mieć miejsce, np.: gdy prowadzone są prace remontowe w obiekcie gdzie musi być zachowana produkcja w toku i wydzielenie sektora do prac remontowych wiąże się z wstrzymaniem procesu produkcyjnego. W praktyce metoda TCM II, jakkolwiek często nienazwana, stosowana jest celem pozornego przyspieszenia prac. Często wydaje się, że skoro dany sektor jest już wolny to natychmiastowe wprowadzenie następnego wykonawcy spowoduje przyspieszenie budowy bez względu na to jak długie będą okresy oczekiwania tego wykonawcy na wejście na kolejne sektory i jak duże koszty będą związane z późniejszym okresem oczekiwania bądź ponownym transportem i instalacją sprzętu i urządzeń niezbędnych do wykonania danego zadania. Metoda TCM II aby była zastosowana musi mieć silne uzasadnienie w postaci ograniczeń organizacyjnych, produkcyjnych lub ekonomicznych (określone terminy możliwości płatności faktur) ponieważ harmonogram sporządzony tą metodą generuje zwykle całkowity czas wykonania przedsięwzięcia TT dłuższy niż policzony innymi metodami.

Do obliczeń przyjmujemy, tak jak w metodzie TCM I, z góry założone i obliczone w sposób deterministyczny sektory $S1 \dots Sn$, procesy $P1 \dots Pm$ uszeregowane w kolejności technologicznej oraz czasy ich wykonania $T1.1 \dots Tn.m$. Założenie priorytetowe zachowania ciągłości pracy w poszczególnych sektorach powodować będzie, że czas oczekiwania na podjęcie pracy

w kolejnym sektorze przez danego wykonawcę będzie większy, bądź w niektórych przypadkach równy zero $LT_{n.m} \geq 0$, natomiast $LD_{1.1} \dots LD_{n.m}$ zawsze będzie równe zero.



Rys. 6.1. Schemat przebiegu obliczeń i warunki wyjściowe TCM II



Rys. 6.2. Powiązania priorytetowe w metodzie TCM II

6.2. Aplikacja Microsoft Excel

Poniżej przedstawiono tabelaryczny sposób przygotowania danych do przeprowadzania obliczeń, parametrów czasowych robót budowlanych w celu tworzenia harmonogramów – cyklogramów uwzględniających strukturę podziału prac i podział na sektory – działki robocze. W Tab. 6.1 i Tab. 6.2 przedstawiono oznaczenia dotyczące normatywnych wartości czasów wykonania robót oraz wartości współrzędnych na osiach cyklogramu.

W Tab. 6.3 podano sposób wyznaczania pozostałych wartości dla kompleksu procesów budowlanych z uwzględnieniem warunku ciągłości robót budowlanych.

Tab. 6.1. Oznaczenia czasów procesów budowlanych

Proces	Czas trwania	Czas trwania		Czas trwania	Czas trwania
	procesu 1	procesu 2		procesu (n-1)	procesu n
	Działka 1	Działka 2		Działka (n-1)	Działka n
Proces m	t_{1m}	t_{2m}	...	$t_{(n-1)m}$	t_{nm}
...
Proces (k+1)	$t_{1(k+1)}$	$t_{2(k+1)}$	...	$t_{(n-1)(k+1)}$	$t_{n(k+1)}$
Proces k	t_{1k}	t_{2k}	...	$t_{(n-1)k}$	t_{nk}
Proces (k-1)	$t_{1(k-1)}$	$t_{2(k-1)}$	...	$t_{(n-1)(k-1)}$	$t_{n(k-1)}$
...
Proces 2	t_{12}	t_{22}	...	$t_{(n-1)2}$	t_{n2}
Proces 1	t_{11}	t_{21}	...	$t_{(n-1)1}$	t_{n1}

Tab. 6.2. Współrzędne punktów do tworzenia cyklogramu

	Wartości	Wartości	Wartości	Wartości	Wartości	Wartości	Wartości	Wartości	Wartości
	na osi	na osi	na osi	na osi	na osi	na osi	na osi	na osi	na osi
	y dla	y dla	y dla	y dla	y dla	y dla	y dla	y dla	y dla
	x_1	$x_1^{\#}$	x_2	$x_2^{\\#}$	...	$x_{(n-1)}$	$x_{(n-1)}^{\#}$	x_n	$x_n^{\#}$
Wartości y dla procesu m	Y_{1m}	$Y_{1m}^{\#}$	Y_{2m}	$Y_{2m}^{\\#}$	...	$Y_{(n-1)m}$	$Y_{(n-1)m}^{\#}$	Y_{nm}	$Y_{nm}^{\#}$
...
Wartości y dla	$Y_{1(k+1)}$	$Y_{1(k+1)}^{\#}$	$Y_{2(k+1)}$	$Y_{2(k+1)}^{\\#}$	...	$Y_{(n-1)(k+1)}$	$Y_{(n-1)(k+1)}^{\#}$	$Y_{n(k+1)}$	$Y_{n(k+1)}^{\#}$

procesu (k+1)									
Wartości y dla procesu k	Y_{1k}	$Y_{1k}^{\#}$	Y_{2k}	$Y_{2k}^{\\#}$	...	$Y_{(r-1)k}$	$Y_{(r-1)k}^{\#}$	Y_{nk}	$Y_{nk}^{\#}$
Wartości y dla procesu (k-1)	$Y_{1(k-1)}$	$Y_{1(k-1)}^{\#}$	$Y_{2(k-1)}$	$Y_{2(k-1)}^{\\#}$	...	$Y_{(r-1)(k-1)}$	$Y_{(r-1)(k-1)}^{\#}$	$Y_{n(k-1)}$	$Y_{n(k-1)}^{\#}$
...
Wartości y dla procesu 2	Y_{12}	$Y_{12}^{\#}$	Y_{22}	$Y_{22}^{\\#}$	...	$Y_{(r-1)2}$	$Y_{(r-1)2}^{\#}$	Y_{n2}	$Y_{n2}^{\#}$
Wartości y dla procesu 1	Y_{11}	$Y_{11}^{\#}$	Y_{21}	$Y_{21}^{\\#}$	...	$Y_{(r-1)1}$	$Y_{(r-1)1}^{\#}$	Y_{n1}	$Y_{n1}^{\#}$

Tab. 6.3. Wzory do obliczania wartości na osi czasu dla poszczególnych procesów

	Wartości na osi y dla x_1	Wartości na osi y dla $x_1^{\#}$	Wartości na osi y dla x_2	Wartości na osi y dla $x_2^{\\#}$	...	Wartości na osi y dla $x_{(r-1)}$	Wartości na osi y dla $x_{(r-1)}^{\#}$	Wartości na osi y dla x_n	Wartości na osi y dla $x_n^{\#}$
Punkty styku	1	2	2	3	...	(p-1)	(p-1)+ 1=p	p	p+1
Wartości y dla procesu m	Y_{1m}^- $Y_{1(r-1)}^{\#}$	$Y_{1m}^{\#}$ $Y_{1(r-1)}^{\#+}$ t_{1m}	Y_{2m}^- MAX $(Y_{2(m-1)}^{\#},$ $Y_{1m}^{\#})$	$Y_{2m}^{\#}$ $Y_{2m}^{\#+}$ t_{2m}	...	$Y_{(r-1)m}^-$ MAX $(Y_{(r-1)(m-1)}^{\#},$ $Y_{(r-2)m}^{\#})$	$Y_{(r-1)m}^{\#}$ $Y_{(r-1)m}^{\#+}$ $t_{(r-1)m}$	Y_{nm}^- MAX $(Y_{n(m-1)}^{\#},$ $Y_{(r-1)m}^{\#})$	$Y_{nm}^{\#}$ $Y_{nm}^{\#+}$ t_{nm}
...
Wartości y dla procesu (k+1)	$Y_{1(k+1)}^-$ $Y_{1k}^{\#}$	$Y_{1(k+1)}^{\#}$ $Y_{1k}^{\#+}$ $t_{1(k+1)}$	$Y_{2(k+1)}^-$ MAX $(Y_{2k}^{\#},$ $Y_{1(k+1)}^{\#})$	$Y_{2(k+1)}^{\#}$ $Y_{2(k+1)}^{\#+}$ $t_{2(k+1)}$	...	$Y_{(r-1)(k+1)}^-$ MAX $(Y_{(r-1)k}^{\#},$ $Y_{(r-2)(k+1)}^{\#})$	$Y_{(r-1)(k+1)}^{\#}$ $Y_{(r-1)(k+1)}^{\#+}$ $t_{(r-1)(k+1)}$	$Y_{n(k+1)}^-$ MAX $(Y_{nk}^{\#},$ $Y_{(r-1)(k+1)}^{\#})$	$Y_{n(k+1)}^{\#}$ $Y_{n(k+1)}^{\#+}$ $t_{n(k+1)}$
Wartości y dla procesu k	Y_{1k}^- $Y_{1(k-1)}^{\#}$	$Y_{1k}^{\#}$ $Y_{1(k-1)}^{\#+}$ t_{1k}	Y_{2k}^- MAX $(Y_{2(k-1)}^{\#},$ $Y_{1k}^{\#})$	$Y_{2k}^{\#}$ $Y_{2k}^{\#+}$ t_{2k}	...	$Y_{(r-1)k}^-$ MAX $(Y_{(r-1)(k-1)}^{\#},$ $Y_{(r-2)k}^{\#})$	$Y_{(r-1)k}^{\#}$ $Y_{(r-1)k}^{\#+}$ $t_{(r-1)k}$	Y_{rk}^- MAX $(Y_{n(k-1)}^{\#},$ $Y_{(r-1)k}^{\#})$	$Y_{rk}^{\#}$ $Y_{rk}^{\#+}$ t_{rk}
Wartości y dla procesu (k-1)	$Y_{1(k-1)}^-$ $Y_{1(k-2)}^{\#}$	$Y_{1(k-1)}^{\#}$ $Y_{1(k-2)}^{\#+}$ $t_{1(k-1)}$	$Y_{2(k-1)}^-$ MAX $(Y_{2(k-2)}^{\#},$ $Y_{1(k-1)}^{\#})$	$Y_{2(k-1)}^{\#}$ $Y_{2(k-1)}^{\#+}$ $t_{2(k-1)}$	...	$Y_{(r-1)(k-1)}^-$ MAX $(Y_{(r-1)(k-2)}^{\#},$ $Y_{(r-2)(k-1)}^{\#})$	$Y_{(r-1)(k-1)}^{\#}$ $Y_{(r-1)(k-1)}^{\#+}$ $t_{(r-1)(k-1)}$	$Y_{n(k-1)}^-$ MAX $(Y_{n(k-2)}^{\#},$ $Y_{(r-1)(k-1)}^{\#})$	$Y_{n(k-1)}^{\#}$ $Y_{n(k-1)}^{\#+}$ $t_{n(k-1)}$

...
Wartości y dla procesu 2	$Y_{12}=Y_{11}^{\#}$	$Y_{12}^{\#}=$ $Y_{11}^{\#}+t_{12}$	$Y_{22}=$ MAX $(Y_{21}^{\#}, Y_{12}^{\#})$	$Y_{22}^{\#}=$ $Y_{22}+t_{22}$	...	$Y_{(q+1)2}=$ MAX $(Y_{(q+1)1}^{\#},$ $Y_{(q+2)2})$	$Y_{(q+1)2}^{\#}=$ $Y_{(q+1)2}+$ $t_{(q+1)2}$	$Y_{n2}=$ MAX $(Y_{n1}^{\#},$ $Y_{(q+1)2}^{\#})$	$Y_{n2}^{\#}=$ $Y_{n2}+t_{n2}$
Wartości y dla procesu 1	$Y_{11}=0$	$Y_{11}^{\#}=t_{11}$	$Y_{21}=*Y_{21}$	$Y_{21}^{\#}=$ $*Y_{21}+t_{21}$	...	$Y_{(q+1)1}=$ $*Y_{(q+1)1}+$ Y_{21}	$Y_{(q+1)1}^{\#}=$ $Y_{(q+1)1}+$ $t_{(q+1)1}$	$Y_{n1}=$ $*Y_{n1}+$ $Y_{(q+1)1}$	$Y_{n1}^{\#}=$ $Y_{n1}+t_{n1}$
	DZIAŁKA 1		DZIAŁKA 2		DZIAŁKA (n-1)		DZIAŁKA n		

Gdzie:

$$Y_{12}^{\#} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} t_{11} \\ t_{11} + t_{12} - t_{21} \\ (t_{11} + t_{12} + t_{13}) - (t_{21} + t_{22}) \\ (...) \\ (t_{11} + t_{12} + t_{13} + \dots + t_{1(m-1)} + t_{1m}) - (t_{21} + t_{22} + \dots + t_{2(m-2)} + t_{2(m-1)}) \end{array} \right\}$$

$$Y_{(n-1)1}^{\#} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} t_{(n-2)1} \\ t_{(n-2)1} + t_{(n-2)2} - t_{(n-1)1} \\ (...) \\ (t_{(n-2)1} + t_{(n-2)2} + \dots + t_{(n-2)(m-1)} + t_{(n-2)m}) - (t_{(n-1)1} + t_{(n-1)2} + \dots + t_{(n-1)(m-1)}) \end{array} \right\}$$

$$Y_{n1}^{\#} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} t_{(n-1)1} \\ t_{(n-1)1} + t_{(n-1)2} - t_{n1} \\ (...) \\ (t_{(n-1)1} + t_{(n-1)2} + \dots + t_{(n-1)(m-1)} + t_{(n-1)m}) - (t_{n1} + t_{n2} + \dots + t_{n(m-1)}) \end{array} \right\}$$

6.3. Przykład obliczeniowy

Przedstawiono przykład liczbowy, w którym w kolejnych krokach procedury obliczeniowej uzyskujemy wartości niezbędne do tworzenia cyklogramu. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano współrzędne umożliwiające wyznaczenie minimalnych przerw pomiędzy kolejnymi liniami cyklogramu. Jednocześnie zostaje zapewniona ciągłość procesów budowlanych.

Tab. 6.4. Dane liczbowe do obliczeń

PROCES	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
10	2	3	5	4	2	4	6	3	6	5
9	5	4	3	3	5	2	5	5	4	4
8	4	3	4	6	4	7	3	2	5	3
7	6	3	3	2	3	6	3	7	3	5
6	4	2	5	5	7	4	5	6	5	3
5	3	5	5	3	5	3	3	2	6	5
4	4	4	2	4	3	6	5	4	3	7
3	5	7	3	3	4	5	6	5	7	5
2	3	6	2	4	5	3	4	3	6	5
1	1	4	4	5	3	4	3	1	4	3

Tab. 6.5. Obliczone współrzędne cyklogramów

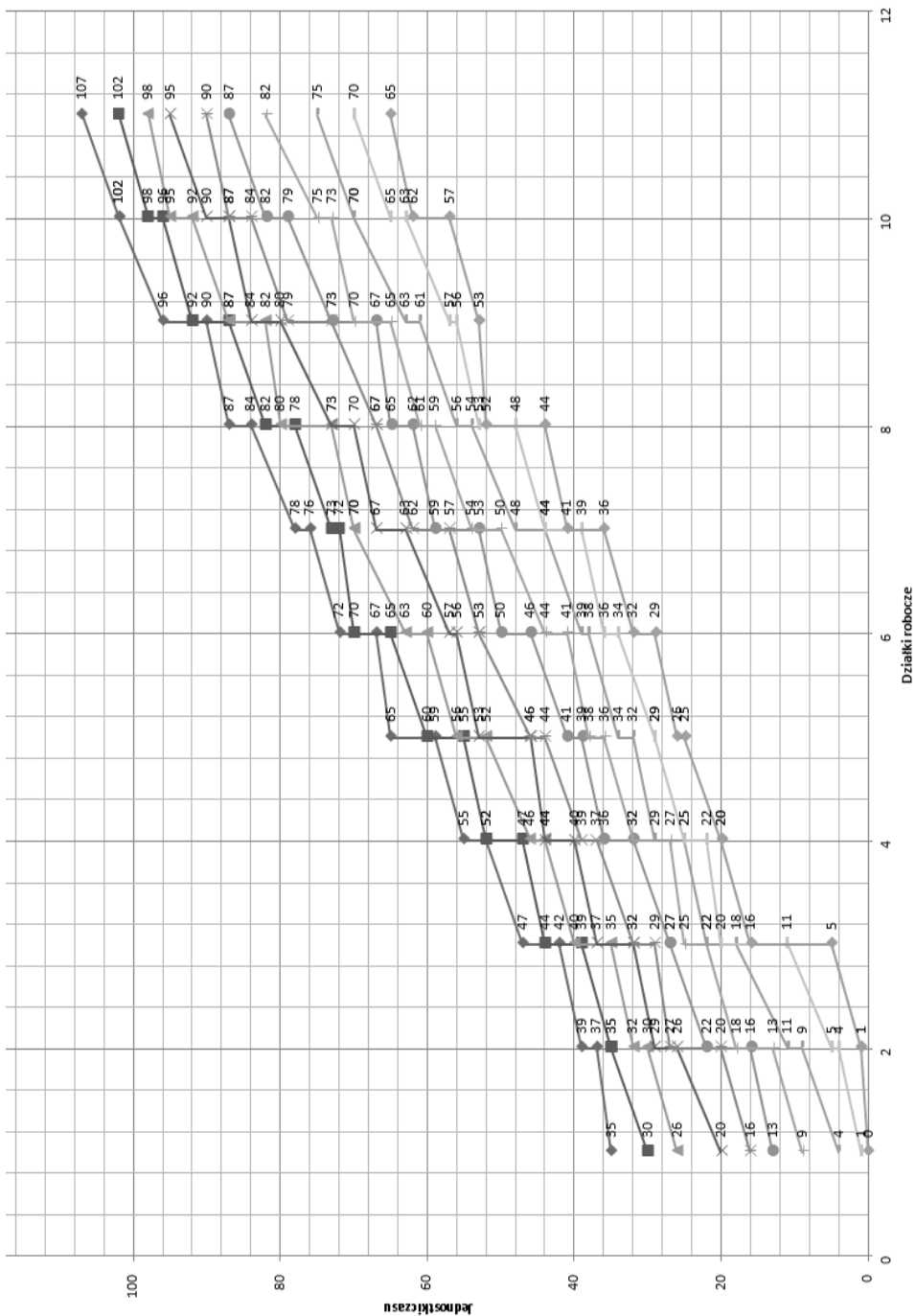
	D1	D2		D3		D4		D5		
	#	#	#	#	#	#	#	#	#	
PUNKTY STYKU	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6
10	35	37	39	42	47	52	55	59	65	67
9	30	35	35	39	44	47	52	55	60	65
8	26	30	32	35	40	44	46	52	56	60
7	20	26	29	32	37	40	44	46	53	56
6	16	20	27	29	32	37	39	44	46	53
5	13	16	22	27	27	32	36	39	41	46
4	9	13	18	22	25	27	32	36	38	41
3	4	9	11	18	22	25	29	32	34	38
2	1	4	5	11	20	22	25	29	29	34
1	0	1	1	5	16	20	20	25	26	29

Tab. 6.6. Obliczone współrzędne cyklogramów c.d.

D6		D7		D8		D9		D10	
	#		#		#		#		#
6	7	7	8	8	9	9	10	10	11
72	76	78	84	87	90	96	102	102	107
70	72	73	78	82	87	92	96	98	102
63	70	70	73	80	82	87	92	95	98
57	63	67	70	73	80	84	87	90	95
53	57	62	67	67	73	79	84	87	90
50	53	59	62	65	67	73	79	82	87
44	50	54	59	61	65	70	73	75	82
39	44	48	54	56	61	63	70	70	75
36	39	44	48	53	56	57	63	65	70
32	36	41	44	52	53	53	57	62	65

Tab. 6.7. Wyniki iteracji

	ITERACJE									
	1;2	2;3	3;4	4;5	5;6	6;7	7;8	8;9	9;10	
1	1	4	4	5	3	4	3	1	4	1
2	0	6	1	6	4	4	6	0	7	2
3	-1	11	0	4	5	5	9	-1	9	3
4	-4	12	-1	4	3	5	9	-4	7	4
5	-5	15	0	4	2	3	8	-5	6	5
6	-6	12	2	4	6	4	11	-5	6	6
7	-2	10	0	-1	5	5	8	-3	6	7
8	-1	10	2	2	3	9	4	-4	6	8
9	1	10	-1	1	1	8	7	-4	7	9
10	-1	10	1	0	1	7	8	-5	9	10
MAX	1	15	4	6	6	9	11	1	9	MAX



Rys. 6.3. Cyklogram przedsięwzięcia z uwzględnieniem metody TCM II

6.4. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono sposób wyznaczania parametrów czasowych kompleksu robót budowlanych stosując metodę sprzężeń czasowych TCM II. Do obliczeń i tworzenia harmonogramu-cyklogramu robót budowlanych zastosowano program EXCEL, który został przetestowany na danych liczbowych.

7. Założenia modelowe i metodyka obliczeń charakterystyk czasowych robót budowlanych z zastosowaniem potokowej metody organizacji z uwzględnieniem krytyczności robót TCM III

Uwzględniając występujące w praktyce budowlanej warunki konieczności dostępu do frontów roboczych brygad realizujących zadanie i kryterium minimalizacji czasu realizacji, pojawia się możliwość uwzględnienia tych ograniczeń w modelu obliczeniowym za pomocą sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi (Afanasjew 2000, Mrozowicz 1997, Hejducki 2011, Rogalska 2011). Jednoczesne uwzględnienie w modelu wymienionych powyżej sprzężeń czasowych pozwala na identyfikację i wyznaczenie ciągu robót krytycznych. Zapewniają one minimalny czas realizacji kompleksu robót. Jednakże osiągnięcie przyjętego kryterium optymalizacji tj. minimum czasu, odbywa się kosztem przerw w pracy brygad na frontach roboczych. Paradoks ten wynika z przyjęcia jako zasady: możliwości przestojów w grup roboczych i oczekiwania frontów roboczych. Warunek ten pozwala wyeliminować wpływ ciągłości prowadzenia robót na wydłużenie czasu realizacji kompleksu robót. Zbiór robót krytycznych tworzy ciąg, w którym suma czasów ich trwania zapewnia najkrótszy czas realizacji kompleksu robot. Roboty niekrytyczne, których zestaw wynika z warunków technologicznych i organizacyjnych przedsięwzięcia mogą występować w przedziałach czasu pomiędzy obliczonymi najwcześniejszymi i najpóźniejszymi terminami ich realizacji.

7.1. Sposób przeprowadzenia obliczeń

Według zasad przedstawionych w pracach (Afanasjew 2000, Mrozowicz 1997, Hejducki 2011, Rogalska 2011), obliczenia parametrów czasowych harmonogramów realizacji robót budowlanych najsprawniej przeprowadzić w formie zapisu macierzowego. Pozwala on na zbudowanie modelu przedsięwzięcia, w którym można zapisać dane do obliczeń, identyfikując jednocześnie podział obiektów budowlanych na fronty robocze, procesy budowlane (rodzaje robót) oraz przewidywane czasy ich wykonania z uwzględnieniem zasobów ludzkich i technicznych. Na tej podstawie zgodnie z procedurą obliczeniową wyznacza się: najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót, ciąg robót krytycznych, wielkości sprzężeń czasowych, rezerw czasu oraz całkowity czas realizacji. Przyjmując model macierzowy danych wejściowych w pierwszej kolumnie możemy wyznaczyć najwcześniejsze terminy realizacji robót uwzględniając zerowe sprzężenia między środkami realizacji, zapewniając ciągłość wykonania robót pierwszego rodzaju. Podobnie dla pierwszego wiersza macierzy można obliczyć najwcześniejsze terminy rozpoczęcia robót, uwzględniając jedynie zerowe sprzężenia między frontami robót. Wynika to

z naturalnych zależności między robotami rozpoczynającymi proces budowlany w systemie potokowym.

W wewnętrznym obszarze macierzy, pomiędzy robotami (elementami macierzy) pojawiają się zależności technologiczne (warunek dostępności frontów roboczych) i organizacyjne (warunek dostępności zasobów – grup roboczych), które można uwzględnić stosując jednocześnie sprzężenia między środkami realizacji i frontami roboczymi, przyjmując wartość większą z dwóch. Wynika to z konieczności uwzględnienia jednoczesnej dostępności frontu robót i grup roboczych. Obliczenia dla późnych terminów przeprowadza się w odwrotnej kolejności. Ustala się najpóźniejsze terminy zakończenia robót przyjmując odpowiednio: dla ostatniej kolumny macierzy oddziaływanie zerowych sprzężeń między środkami realizacji, natomiast dla ostatniego wiersza uwzględnia się zerowe sprzężenia między frontami roboczymi. Dla obszaru wewnętrznego macierzy wyznacza się najpóźniejsze terminy zakończenia robót z jednoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi, przyjmując wartość mniejszą z dwóch. Wynika to z konieczności przemieszczenia robót na osi czasu w kierunku najpóźniejszych wartości. Z różnicy najpóźniejszych i najwcześniejszych terminów można wyznaczyć rezerwy czasowe.

W przypadku niektórych robót rezerwy czasowe są równe zero, co identyfikuje je jako roboty krytyczne. Można znaleźć podobieństwo do klasycznych metod, tzw. sieciowych (typu CPM, PERT, itp.). Jednakże zasadnicze różnice wynikają z przyjętego modelu macierzowego robót budowlanych, w którym można uwzględnić założenia projektowe obiektów budowlanych, ograniczenia technologiczne, organizacyjne, zasobowe i inne. Ponadto aktywne oddziaływanie sprzężeń czasowych pozwala na modelowanie praktycznych uwarunkowań organizacyjnych oraz technologicznych, w szczególności w systemach potokowych dominujących w przedsiębiorstwach budowlanych.

7.2. Oznaczenia osi

W toku obliczeń wielokrotnie prezentowane będą wykresy obrazujące czas trwania kolejnych procesów na poszczególnych działkach roboczych. Ze względów redakcyjnych pominięto opisy osi.

7.3. Zagadnienie szeregowania zadań – ustalanie kolejności realizacji robót przy założeniu minimalnego czasu wykonania i ustalonych zasobach

Minimalny czas trwania kompleksu robót budowlanych można wyznaczyć jako sumę czasu wykonania robót krytycznych tworzących ciąg procesów. Zmiana kolejności wykonania robót na frontach, przy zachowaniu porządku technologicznego, wpływa na zmianę długości ciągu robót krytycznych. Można

zatem w zbiorze dopuszczalnych kolejności prowadzenia robót na frontach uzyskać najkrótszy czas realizacji. Według metodyki prezentowanej w (Afanasjew 2000, Mrozowicz 1997, Hejducki 2011, Rogalska 2011) minimalny czas realizacji kompleksu obiektów można wyznaczyć z uwzględnieniem algorytmu B&B stosując specyficzne, heurystyczne, dla metody TCM III sposoby obliczania węzłów w graf drzewie. Proces obliczeniowy bazujący na zapisie macierzowym obejmuje trzy etapy.

Etap pierwszy polega na wyznaczeniu wartości pomocniczych, sum elementów macierzy w wierszach i kolumnach. Na podstawie maksymalnej wartości sum określamy tzw. wiodący kompleks robót, ciąg robót o najdłuższym czasie realizacji. Zakłada się, że droga krytyczna obejmować będzie te roboty zapisane w macierzy w wierszach lub kolumnach o najdłuższym sumarycznym czasie ich przebiegu. Pozostałe, poprzedzające i kończące ciąg robót krytycznych mogą stanowić wartość liczbową węzła graf drzewa. Uzyskana liczba uwzględniająca porządek technologiczny przedsięwzięcia stanowi wskaźnik nazwany w (Afanasjew 2000, Mrozowicz 1997) granicznie możliwe minimum (GMM). Przyjęta nazwa charakteryzuje poszukiwane minimalne wartości liczbowe generowane na kolejnych poziomach graf drzewa z uwzględnieniem specyfiki metody.

Obliczamy sumy elementów w poszczególnych wierszach i kolumnach macierzy \mathbf{T} , czyli:

$$W_i = \sum_{j=1}^m t_{i,j}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (7.1)$$

$$K_j = \sum_{i=1}^n t_{i,j} \quad j = 1, \dots, m. \quad (7.2)$$

Następnie wyznaczamy największą z tych wielkości, czyli:

$$M = \max \{W_1, \dots, W_n, K_1, \dots, K_m\}. \quad (7.3)$$

Etap drugi polega na tworzeniu kolejnych poziomów graf drzewa wprowadzając w miejsce pierwszego wiersza macierzy kolejne i wyznaczając następnie wartości wskaźnika GMM. Najmniejszą wartość wskaże węzeł, z którego należy rozwijać gałęzie grafu drzewa. Obowiązuje tu metodyka stosowana w analizie przeglądu przestrzeni rozwiązań zgodnie z zasadami B&B. Tworzy się kolejne poziomy drzewa drogą eliminowania wartości większych z utworzonych podzbiorów, generując kolejne na podstawie minimalnej wartości GMM na wyznaczonym poziomie drzewa tzn. szukając minimum w kolejnym podzbiorze. Należy zaznaczyć, że GMM jest wskaźnikiem liczbowym reprezentującym kolejność technologiczną robót i ich sekwencje na drodze krytycznej. Tak więc, poszukuje się minimalnych sum z przedstawienia kolejności

robót na frontach – wierszach w obszarach macierzy poza ustalonymi na wyższych poziomach graf drzewa, z minimalnymi GMM.

Wartość GMM odpowiada minimalnej długości drogi krytycznej przechodzącej przez wybrany wiersz lub kolumnę przy wierszach ustalonych. Jeśli zostały ustalone będą kolejno wiersze o numerach u_1, \dots, u_s , $s < n$, to w przypadku drogi krytycznej przechodzącej przez wiersz i_0 określamy wartość GMM następująco:

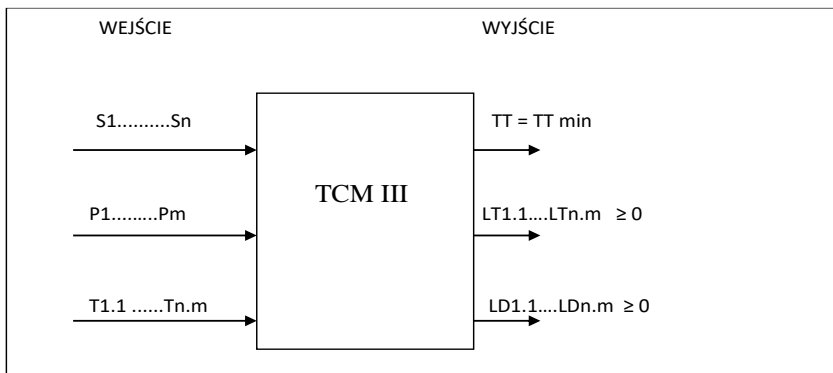
$$\text{GMM}_{i_0} = \sum_{k=1}^s t_{u_k,1} + \sum_{j=1}^m t_{i_0,j} + \sum_{i=1}^n t_{i,m}, \quad i \in (u_1, \dots, u_s). \quad (7.4)$$

Natomiast, jeśli droga krytyczna przechodzi przez kolumnę j_0 to GMM jest określone wzorem:

$$\text{GMM} = \sum_{j=1}^{j_0-1} t_{u_1,j} + \sum_{i=1}^n t_{i,j_0} + \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ \sum_{j=j_0+1}^m t_{i,j} \right\}. \quad (7.5)$$

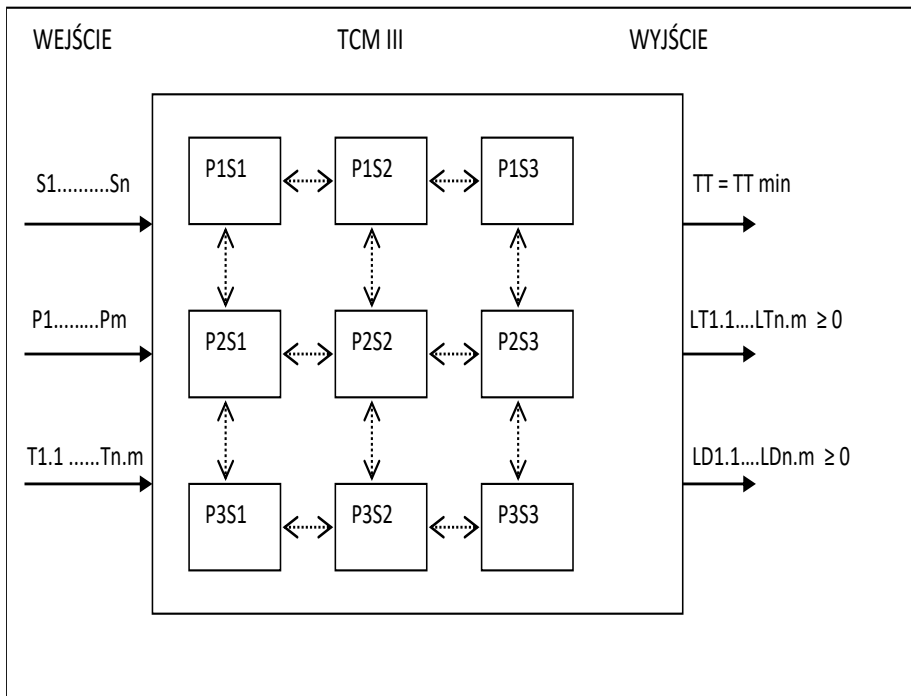
W trzecim etapie sprowadza się obliczenia do wyznaczenia rzeczywistych, najwcześniejszych i najpóźniejszych czasów wykonania robót, wyznaczenia najkrótszej drogi krytycznej uzyskanej z przeglądu przestrzeni rozwiązań oraz rezerw czasu dla robót niekrytycznych. W szczególnych przypadkach można uzyskać w końcowym etapie obliczeń dwie macierze końcowe stanowiące wyniki obliczeń i analizy wg. metodyki B&B. Parametry czasowe robót dla kolejności ustalonej z wykorzystaniem algorytmu B&B, wyznacza się ostatecznie uwzględniając w obliczeniach zależności w postaci sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi.

Metodę TCM III stosuje się w przypadku kiedy założeniem priorytetowym jest zapewnienie minimalnego czasu wykonania przedsięwzięcia. Założenie to realizowane jest poprzez przyjęcie takich priorytetowych powiązań wewnętrznych, że zarówno LD jak i LT w każdym przypadku dążą do zera (Rys. 7.1).



Rys. 7.1. Schemat przebiegu obliczeń i warunki wyjściowe TCM III

Przy wykorzystaniu TCM III może zdarzyć się, że wystąpią przerwy w pracy w poszczególnych sektorach oraz, że nie zostanie zachowana ciągłość procesów a tym samym ciągłość pracy wykonawców. Idealnym rozwiązaniem jest harmonogram, w którym zarówno LT jak i LD są równe zero. Stosując w obliczeniach komputerowych metodę np.: B&B poszukiwana jest taka kolejność realizacji robót w sektorach aby uzyskać jak najlepszy wynik czyli $TT = TT_{min}$. W metodzie TCM III wszystkie powiązania wewnętrzne uznawane są za priorytetowe (Rys. 7.2) i nie występuje, jak w poprzednich metodach, TCM I i TCM II jeden rodzaj powiązań priorytetowych.



Rys. 7.2. Schemat powiązań (sprzężeń czasowych) według TCM III

Bardzo wiele przedsięwzięć realizowanych jest przy założeniu minimalnego czasu wykonania i ustalonych zasobach. Dawniej minimalizacja czasu dotyczyła tylko niektórych, bardzo istotnych przedsięwzięć, jednak obecnie przy szerokiej możliwości dostępu do zasobów oraz bardzo wysokich kosztach prowadzenia budowy metoda TCM III znajduje coraz więcej zastosowań. Bardzo często $TT = TT_{min}$ jest decydującym czynnikiem przy doborze metody.

TCM III charakteryzuje się tym, że większość procesów wiodących realizowana jest bez zapasów czasu (czyli bez przerw) zatem procesy mogą znajdować się na drodze krytycznej. Dla pozostałych robót wyznacza się

przedziały czasowe tj. okres czasu pomiędzy tzw. najwcześniejszym terminem rozpoczęcia a najpóźniejszym terminem zakończenia robót. Z tego powodu zwykle przyjmuje się możliwie najwcześniejsze terminy rozpoczęcia robót dające w praktyce możliwość zabezpieczenia robót zapasami czasu. Problem ten rozwiązywany jest również z zastosowaniem metodyki łańcucha krytycznego CCS/BM. Należy zaznaczyć, że wiąże się to z możliwością optymalizacji zależności czas/koszt. Możliwe jest w związku z tym znalezienie takiego położenia robót niekrytycznych aby zapewnić minimalną wartość funkcji celu. Funkcja celu dotyczy zagadnienia optymalizacji (minimalizacji) poziomu kosztów przy minimalnym czasie trwania przedsięwzięcia budowlanego z uwzględnieniem buforów czasu dla robót niekrytycznych. W praktyce, racjonalne planowanie polega na wykonaniu robót i zapłaceniu za nie, jak najpóźniej (w najpóźniejszych terminach). Z uwagi możliwość zapewnienia buforów czasu robotom niekrytycznym, stosując np.; metodykę łańcucha krytycznego CCS/BM, pojawia się pytanie o wielkość sumarycznego wzrostu kosztów przedsięwzięcia budowlanego w odniesieniu do najpóźniejszych terminów wykonania robót. Zagadnienie ustalenia zależności sumarycznego wzrostu kosztów realizacji przedsięwzięcia budowlanego od wielkości buforów czasu jest zagadnieniem o dużej złożoności obliczeniowej i należy do klasy problemów *NP-trudnych*. Do rozwiązania przedstawionego problemu optymalizacyjnego zastosowano hybrydowy algorytm ewolucyjny HEA (Bożejko 2005).

7.2.1. Algorytmy obliczeń TCM III

Trzecia z metod sprzężeń czasowych nie wymaga dodatkowych obliczeń przed sporządzeniem harmonogramu. Całość obliczeń możliwa jest do przeprowadzenia w jednej tabeli. Tab. 7.1 przedstawia wzory służące policzeniu najwcześniejszych, zaś Tab. 7.2 najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia zadań. Aby wyznaczyć ścieżkę krytyczną należy wybrać sąsiadujące ze sobą procesy, dla których najwcześniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia są tożsame z najpóźniejszymi.

Przykładowe obliczenia wykonano na danych zestawionych w Tab. 6.4, analogicznie jak dla metod TCM I i TCM II.

Tab. 7.1. Najwcześniejsze terminy prac

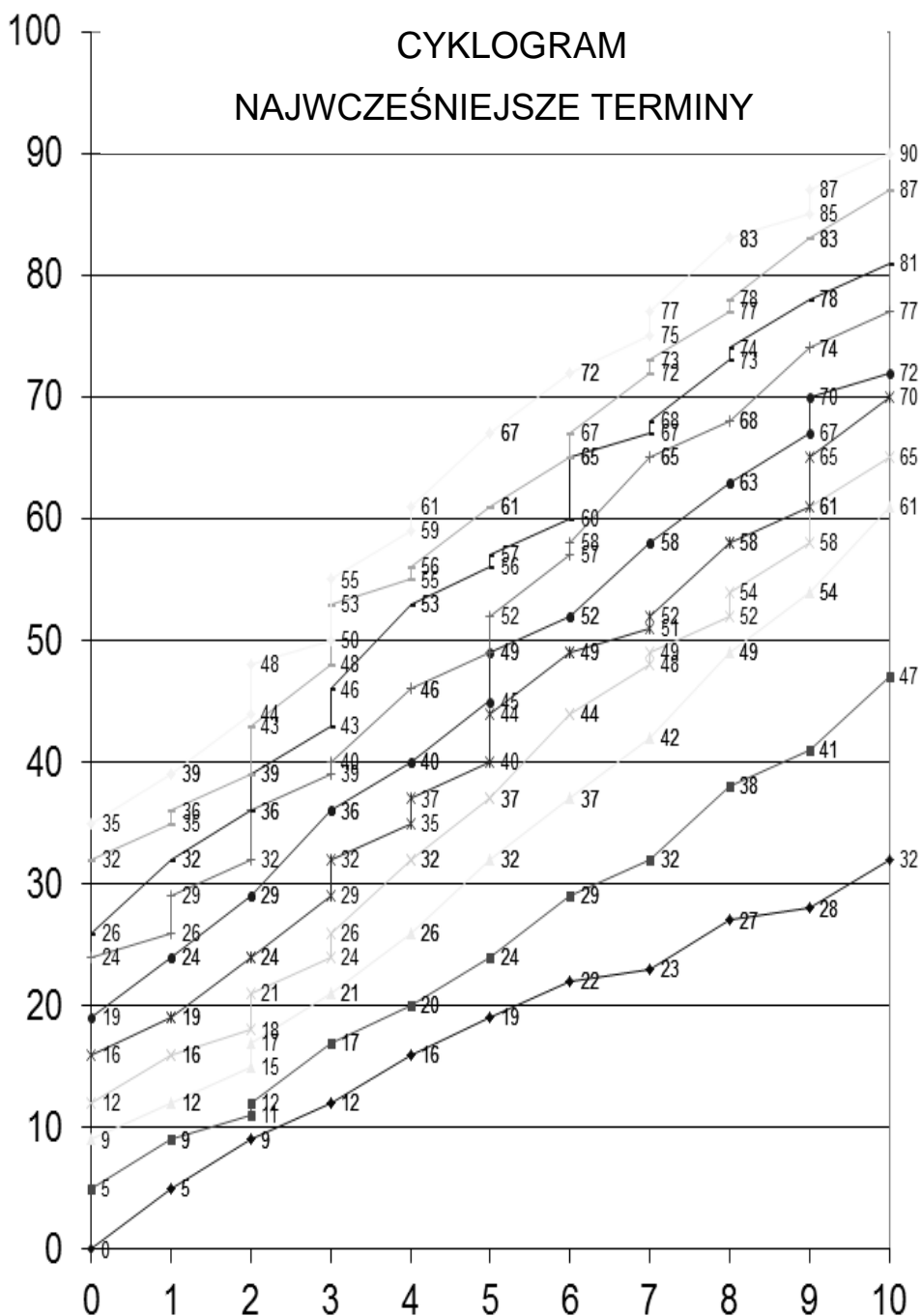
Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	0	5	9	12	16	19	22	23	27	28	32									
2	5	9	11	12	17	20	24	29	32	38	41	47								
3	9	12	15	17	21	26	32	37	42	49	54	61								
4	12	16	18	21	24	26	32	37	44	48	49	52	54	58	61	65				
5	16	19	19	24	24	29	32	35	37	40	44	49	51	52	58	58	61	65	70	
6	19	24	24	29	29	36	36	40	40	45	49	52	58	58	63	63	67	70	72	
7	24	26	29	32	36	39	40	46	46	49	52	57	58	65	68	68	74	74	77	
8	26	32	32	36	39	43	46	53	53	56	57	60	65	67	68	73	74	78	81	
9	32	35	36	39	43	48	53	55	56	61	61	65	67	72	73	77	78	83	87	
10	35	39	39	44	48	50	55	59	61	67	67	72	72	75	77	83	83	85	87	90

Brygady

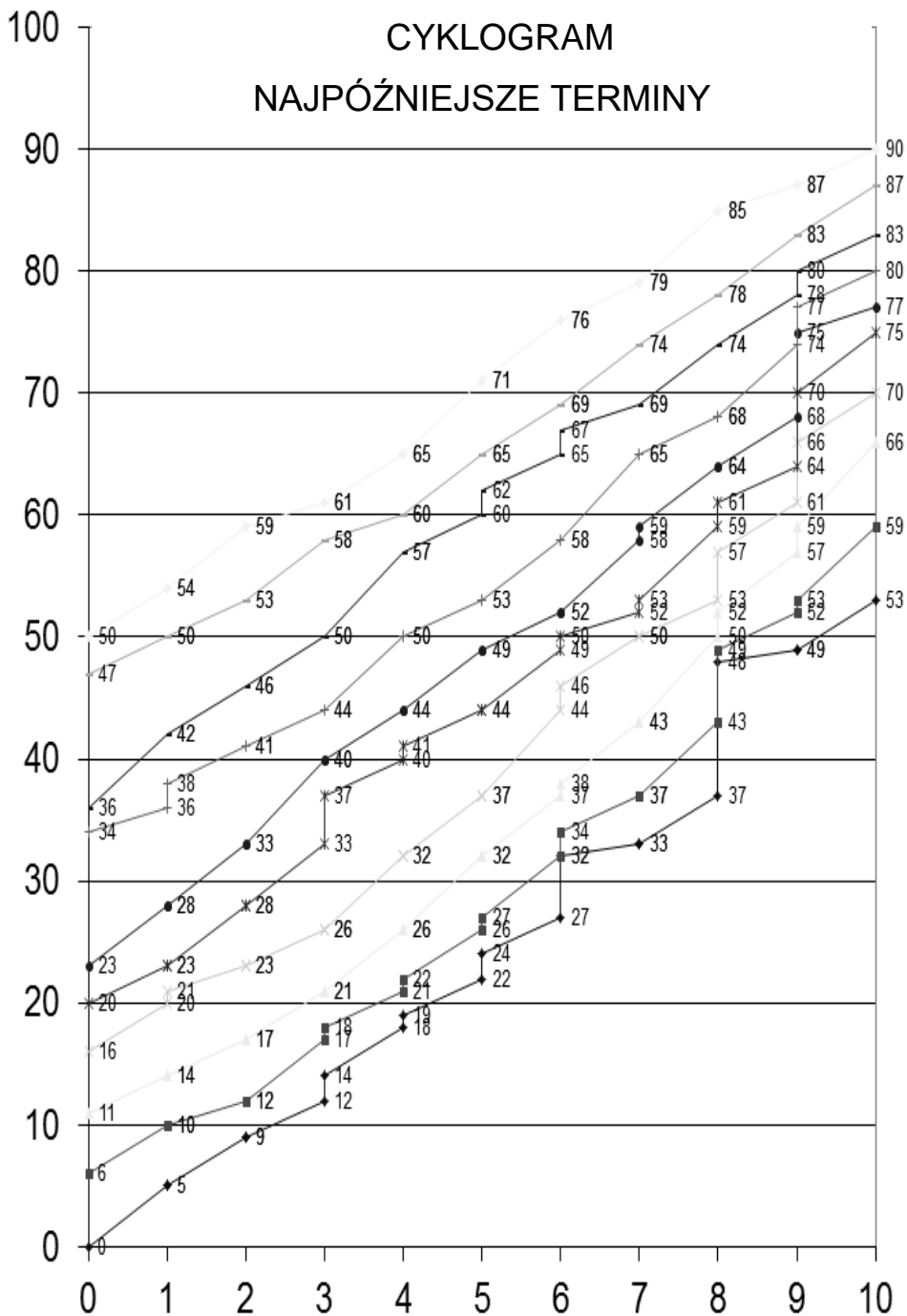
Tab. 7.2. Najpóźniejsze terminy prac

Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
1	0	5	5	9	9	12	14	18	19	22	24	27	32	33	33	37	48	49	49	53
2	6	10	10	12	12	17	18	21	22	26	27	32	34	37	37	43	49	52	53	59
3	11	14	14	17	17	21	21	26	26	32	32	37	38	43	43	50	52	57	59	66
4	16	20	21	23	23	26	26	32	32	37	37	44	46	50	50	53	57	61	66	70
5	20	23	23	28	28	33	37	40	41	44	44	49	50	52	53	59	61	64	70	75
6	23	28	28	33	33	40	40	44	44	49	49	52	52	58	59	64	64	68	75	77
7	34	36	38	41	41	44	44	50	50	53	53	58	58	65	65	68	68	74	77	80
8	36	42	42	46	46	50	50	57	57	60	62	65	67	69	69	74	74	78	80	83
9	47	50	50	53	53	58	58	60	60	65	65	69	69	74	74	78	78	83	83	87
10	50	54	54	59	59	61	61	65	65	71	71	76	76	79	79	85	85	87	87	90

Brygady



Rys. 7.3. Cyklogram TCM III dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 7.4. Cyklogram TCM III dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

7.4. Zastosowanie algorytmów metaheurystycznych w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem metody TCM III

W przedstawionym bloku obliczeniowym z zastosowaniem metody TCM III do harmonogramowania robót budowlanych zastosowano wybrane algorytmy optymalizacji dyskretnej w miejsce dotychczas stosowanego algorytmu B&B. W celu dokonania wyboru algorytmów rozważono następujące czynniki:

- jakość dostarczanych rozwiązań,
- czas obliczeń prowadzących do rozwiązania konkretnego problemu,
- elastyczność w formułowaniu nowych zagadnień (parametrów, ograniczeń, funkcji celu),
- łatwość implementacji programowej.

7.3.1. Charakterystyka algorytmów optymalizacji dyskretnej

Obecnie najlepiej powyższe warunki spełniają algorytmy metaheurystyczne należące do grupy algorytmów poprawiających. Są one obecnie stosowane w rozwiązywaniu wielu problemów optymalizacyjnych TSZ. Algorytmy metaheurystyczne wykorzystują mechanizmy poszukiwań analogiczne do zjawisk fizycznych lub występujących w naturze np.: przeszukiwania zstępującego (*descending search*), przeszukiwania z zabronieniami (*tabu search*), przeszukiwania ewolucyjnego (*evolutionary search*), symulowanego wyżarzania (*simulated annealing*), przeszukiwania rozproszonego (*scatter search*), przeszukiwania mrówkowego (*ant search*), algorytmy memetyczne (hybrydowe). Jakość dostarczanych rozwiązań za pomocą tych algorytmów z reguły jest dobra, lecz zależna od jego rodzaju. Podstawową wadą jest to, że za ich pomocą można uzyskać wynik przybliżony. Często jest on jednak bliski optymalnemu, zaś w odniesieniu do problemów o małych rozmiarach może być uzyskiwany wynik optymalny. Czas obliczeń jest zależny od warunków zakończenia pracy algorytmu (np. liczby iteracji), lecz nie rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem rozmiarów zadania, jak w przypadku metod opartych na schemacie B&B. Z reguły są to algorytmy elastyczne w odniesieniu do nowych zagadnień, np. wymagane są zmiany w procedurach obliczania funkcji celu, w przeciwieństwie do np. metod wykorzystujących schemat B&B, które każdorazowo wymagają formułowania funkcji dolnych i górnych ograniczeń, zależnie od postaci rozwiązywanego zagadnienia. Algorytmy poprawiające są na ogół łatwe do implementacji programowej, choć wersje bardziej rozbudowane mogą nastęrczać kłopotów. Z grupy algorytmów metaheurystycznych, ze względu na jakość dostarczanych rozwiązań oraz łatwość implementacji programowej, wybrano do dalszych obliczeń trzy algorytmy: przeszukiwania z zabronieniami, przeszukiwania genetycznego i symulowanego wyżarzania.

7.3.2. Algorytm przeszukiwania z zabronieniami (*tabu search*)

Metoda przeszukiwania z zabronieniami tabu search (TS) została zaproponowana przez F. Glover (1989), (1990). Powiela ona naturalny proces poszukiwania rozwiązania problemu realizowany przez człowieka. Podstawowa wersja algorytmu TS rozpoczyna działanie od określonego rozwiązania startowego. Następnie, dla tego rozwiązania znajduje się otoczenie. Otoczenie definiuje się jako zbiór rozwiązań, który można utworzyć po wykonaniu ruchów w danym rozwiązaniu tj. przekształceń transformujących dane rozwiązanie w inne według ustalonych zasad. W otoczeniu poszukiwane jest rozwiązanie z najmniejszą wartością funkcji celu. To rozwiązanie staje się rozwiązaniem bazowym dla następnej iteracji. Wynikiem działania algorytmu jest najlepsze rozwiązanie z trajektorii poszukiwań.

Istotą metody TS jest zastosowanie historii poszukiwań, co zapobiega zatrzymaniu się trajektorii w ekstremum lokalnym oraz umożliwia wprowadzanie jej w bardziej obiecujące obszary poszukiwań. Najczęściej w tym celu używa się pamięci krótkoterminowej zwanej listą zabronień (lista tabu). Lista ta przechowuje przez ograniczony czas najświeższe atrybuty rozwiązań, ruchy prowadzące do tych rozwiązań lub atrybuty ruchów ostatnio rozpatrywanych rozwiązań. Zazwyczaj jest to dokonywane przez wprowadzenie stałej długości listy, co powoduje usunięcie elementu najstarszego w trakcie dopisywania elementu nowego. Z atrybutów elementów tej listy wynika, że niektóre przyszłe ruchy mogą dobrze nie rokować i dlatego będą traktowane jako zabronione. Zabronienie to może być anulowane, jeśli tzw. funkcja aspiracji uzna dany ruch za korzystny. Jest to dodatkowa funkcja, której wartość dla danego rozwiązania może spowodować, że ruchy prowadzące do rozwiązania lub jego atrybuty nie znajdują się na liście tabu. Warunkami zakończenia pracy algorytmu mogą być: limit czasu, maksymalna liczba iteracji, osiągnięcie zadowalającej wartości funkcji celu lub wartości optymalnej.

Niech $\Pi \in \pi$ będzie dowolną permutacją, LT listą tabu, c przyjętą funkcją celu, a π^* najlepszym do tej pory znalezionym rozwiązaniem.

- Krok 1. Wyznaczyć otoczenie N_π permutacji π nie zawierające elementów zabronionych przez listę LT.
- Krok 2. Znaleźć permutację $\delta \in N_\pi$ taką, że $c(\delta) = \min\{c(\beta) : \beta \in N_\pi\}$.
- Krok 3. Jeśli $c(\delta) < c(\pi^*)$, to $\pi^* \leftarrow \delta$.
- Umieść atrybuty δ na liście LT; $\pi \leftarrow \delta$.
- Krok 4. Jeżeli „Warunek_Zakończenia”, to STOP, w przeciwnym przypadku idź do Kroku 1.

7.3.3. Algorytm przeszukiwania genetycznego (*genetic search*)

Algorytmy przeszukiwania genetycznego genetic search (GS) wykorzystują zasady ewolucji występujące w naturze, które prowadzą do najlepszego przystosowania się (optymalizacji) osobników do warunków występujących

w danym środowisku. Wykorzystują one populację osobników (rozwiązań), która następnie jest przetwarzana w trakcie selekcji, działań wywołanych przez użycie operatorów genetycznych oraz fazy przetrwania. Ze względów formalnych grupa tego rodzaju algorytmów jest ogólnie nazywana ewolucyjnymi. Ich szczególnie przypadki, w których rozwiązanie jest reprezentowane przez wektor binarny, permutację itp., a proces przetwarzania jest realizowany przez zastosowanie operatorów krzyżowania i mutacji, nazywamy algorytmami przeszukiwania genetycznego (GS).

Populacją w algorytmach GS jest zbiór osobników reprezentujących rozwiązania. Każde rozwiązanie jest kodowane przez zbiór jego atrybutów zapisanych w materiale genetycznym (chromosomy, geny). Istnieje wiele sposobów kodowania, specyficznych dla różnych problemów optymalizacji, np. dla problemów przepływowych kolejne rozwiązania koduje się w chromosomie bezpośrednio za pomocą permutacji. Populacja jest przetwarzana za pomocą cyklicznie następujących po sobie procesów: reprodukcji, krzyżowania i mutacji oraz przeżycia lub selekcji. W fazie reprodukcji osobniki są powielane proporcjonalnie do miary przystosowania do środowiska. Funkcją adaptacji, będącą miarą przystosowania, może być np. wartość funkcji celu dla danego rozwiązania. Proces ten powoduje, że osobniki o lepszym przystosowaniu będą miały więcej potomków w następnych pokoleniach. Osobniki wybrane z populacji tworzą tzw. pulę rodzicielską, z której zostają wybrane pary tzw. rodziców dostarczające osobniki nowego pokolenia. Są one tworzone za pomocą operatora krzyżowania genetycznego. Następnie realizowany jest proces mutacji powodujący zmiany w materiale genetycznym, które występują z reguły z małym prawdopodobieństwem pozwalającym na powolne wprowadzanie innowacji w pokoleniu. W fazie przeżycia (selekcji) wybierane są osobniki, które wejdą w skład nowej populacji. Selekcja często jest wykonywana zgodnie z zasadą ruletki, w której większe szanse dawane są osobnikom lepiej przystosowanym. Warunkami zakończenia pracy algorytmu mogą być, podobnie jak w algorytmach TS: limit czasu, maksymalna liczba iteracji, osiągnięcie zadowalającej wartości funkcji celu lub wartości optymalnej. Metoda GS zawiera wiele elementów, które można swobodnie definiować: sposób kodowania chromosomów, operatory krzyżowania, mutacji, funkcja adaptacji, schemat wyboru puli rodzicielskiej i kojarzenia rodziców, schemat przeżywania. Przyjęto formę algorytmu przedstawioną w pracy (Yamada 1999):

- Krok 0. Wygeneruj populację początkową $P(0)$, $t = 0$, oceń $P(0)$.
- Krok 1. $t := t + 1$; Wybierz osobniki najbardziej dopasowane (selekcja).
- Krok 2. Zmień wybrane osobniki (transformacja genetyczna: krzyżowanie, mutacja).
- Krok 3. Oceń $P(t)$. Usuń najsłabiej dopasowane osobniki (faza przetrwania).
- Krok 4. Jeżeli spełniony jest warunek zatrzymania to STOP, w przeciwnym przypadku wróć do kroku 1.

7.3.4. Algorytm symulowanego wyżarzania (*simulated annealing*)

W celu wyprowadzenia trajektorii poszukiwań z lokalnego ekstremum algorytm symulowanego wyżarzania (SA) wykorzystuje analogię do procesu termodynamicznego chłodzenia ciała stałego. Stany ciała stałego są postrzegane jako poszczególne rozwiązania problemu, natomiast energia ciała – wartości funkcji celu. W trakcie fizycznego procesu studzenia temperatura redukowana jest powoli w celu utrzymania równowagi energetycznej.

Algorytm SA startuje z rozwiązania początkowego, najczęściej wybranego losowo. Następnie, w każdej iteracji z otoczenia rozwiązania bazowego π wybiera się, według ustalonych zasad lub losowo, rozwiązanie π^* . Staje się ono rozwiązaniem bazowym w następnej iteracji, jeśli wartość funkcji celu jest lepsza od aktualnego rozwiązania bazowego lub w przypadku przeciwnym może nim stać się z prawdopodobieństwem:

$$p = \exp(-\Delta/T_i), \quad (7.6)$$

gdzie:

$$\Delta = c(\pi^*) - c(\pi),$$

T_i – temperatura w bieżącej iteracji i ,

c – funkcja celu.

W każdej iteracji wykonywanych jest m losowań z otoczenia bieżącego rozwiązania bazowego. Parametr zwany temperaturą zmniejsza się tak, jak w naturalnym procesie wyżarzania. Najczęściej przyjmuje się jeden z dwóch schematów studzenia:

- geometryczny $T_{i+1} = \lambda_i T_i$,
- logarytmiczny $T_{i+1} = T_i / (1 + \lambda_i T_i)$,

gdzie:

$$i = 0, \dots, N - 1,$$

T_0 – temperatura początkowa,

T_N – temperatura końcowa,

N – liczba iteracji,

λ_i – parametr.

W algorytmie z reguły przyjmuje się na początku określone wartości parametrów T_0 , T_N , N oraz wylicza się parametr λ_i . Powinna zachodzić zależność $T_0 > T_N$, należy przyjmować T_N odpowiednio małe, bliskie zeru. Zastosowany w pracy algorytm SA składa się z następujących kroków:

- Krok 0. Wyznacz rozwiązanie początkowe $\pi^0 \in \Pi$. Podstaw $\pi^{\text{SA}} = \pi^0$, $k = 0$, $T = T_0$.
- Krok 1. Wykonaj x -razy kroki 1.1 – 1.3.
 - Krok 1.1. Podstaw $k := k + 1$. Wybierz losowo $\pi \in N(V, \pi^{k-1})$.
 - Krok 1.2. Jeżeli $c(\pi') < c(\pi^{\text{SA}})$ to podstaw $\pi^{\text{SA}} = \pi'$.
 - Krok 1.3. Jeżeli $c(\pi') < c(\pi^{k-1})$ to podstaw $\pi^k = \pi'$. W przeciwnym przypadku zaakceptuj rozwiązanie π' z prawdopodobieństwem $p = \exp((c(\pi^{k-1}) -$

$c(\pi^k)/T$, tj. $\pi^k = \pi'$, jeżeli zaakceptowano rozwiązanie π' lub $\pi^k = \pi^{k-1}$, jeżeli nie zaakceptowano rozwiązania π' .

- Krok 2. Zmień temperaturę T według określonego schematu chłodzenia, w którym: T_0 – temperatura początkowa, T_N – temperatura końcowa, N – liczba iteracji.
- Krok 3. Jeżeli $T > T_N$ idź do kroku 1, w przeciwnym wypadku STOP.

7.3.5. Implementacja metod obliczeniowych

Wymienione powyżej algorytmy zastosowano do rozwiązywania zadań optymalizacji występujących podczas harmonogramowania trzech przedsięwzięć budowlanych z użyciem metody TCM III ze sprzężeniami między środkami realizacji i frontami roboczymi.

Przedmiotowe trzy przedsięwzięcia polegają na realizacji zbioru n obiektów o takiej samej technologii tj. wymagające realizacji tych samych rodzajów robót:

- osiedle budynków mieszkalnych (jednorodzinnych) realizowanych tylko do stanu surowego zamkniętego ($m = 7$ robót),
- sieci stacji paliw ($m = 11$ robót),
- osiedle budynków mieszkalnych (jednorodzinnych) realizowanych do stanu „pod klucz” ($m = 16$ robót).

Wartości parametrów sterujących w algorytmach TS, GS i SA przyjęto następująco:

- algorytm TS: długość listy tabu LT: 8, maksymalna liczba iteracji – 5000, otoczenie wyznaczone z zastosowaniem ruchu „wstaw”, długość listy reprezentującej pamięć długoterminową – 8, liczba iteracji bez poprawy funkcji celu (skok powrotny) – 1000,
- algorytm GS: licznosc populacji – $10n$, licznosc pokolenia jako odsetek licznosci populacji – $0,2 \times 10n = 2n$, prawdopodobienstwo krzyzowania (realizowanego za pomoca operatorow OX, PMX, CX) – 1,0, licznosc zbioru osobnikow mutowanych w pokoleniu $0,02 \times 10n = 0,2n$ (mutacja realizowana z zastosowaniem ruchu „wstaw”), prawdopodobienstwo mutacji – 0,1, licznosc zbioru osobnikow najgorzej przystosowanych z populacji, ktore sa wymieniane na nowe – $0,9 \times 10n = 9n$, liczba iteracji, po ktorej nastepuje wymiana i zmiana operatora krzyzowania na losowo wybrany z grupy zastosowanych – 100, calkowita liczba iteracji – 20000,
- algorytm SA: wartosci temperatur: poczatkowa $T_0 = 60$, koncowa $T_N = 0,5$, liczba losowan wystepujaca w kroku 1: $0,5n$, calkowita liczba iteracji – 20000, otoczenie wyznaczone z zastosowaniem ruchu „wstaw”.

Dla kazdego rodzaju przedsiwziecia wygenerowano przyklady testowe o rozmiarach $n = 10, 20, 30$ obiektow (po 10 dla kazdego rozmiaru). Wartosci czasow trwania robot w obiektach (wyrazone w dniach roboczych) zostaly wygenerowane losowo z zastosowaniem rozkladu jednostajnego 1...60. Implementacja programowa algorytmu TS zostala dokonana w jezyku C++,

a algorytmów GS i SA w systemie Mathematica. Każdy z przykładów testowych był rozwiązywany jednokrotnie za pomocą algorytmu TS, natomiast dziesięciokrotnie za pomocą algorytmów SA i GS (do dalszych porównań uwzględniany był wynik średni z prób). Przykładowe trajektorie poszukiwań lokalnych są przedstawione na Rys. 7.5. Ponadto wszystkie przykłady testowe zostały rozwiązane jednokrotnie stosując używany obecnie w TCM algorytm B&B. Dla każdego przykładu obliczono średni błąd względny PRP względem wyniku otrzymanego z zastosowaniem algorytmu B&B (Tab. 7.3):

$$PRP(A) = 100\% (C^A - C^{B\&B}) / C^{B\&B}, \quad (7.7)$$

gdzie:

C^A – funkcja celu uzyskana testowanym algorytmem TS, GS, SA,

$C^{B\&B}$ – funkcja celu uzyskana algorytmem B&B.

Na ich podstawie można stwierdzić, że:

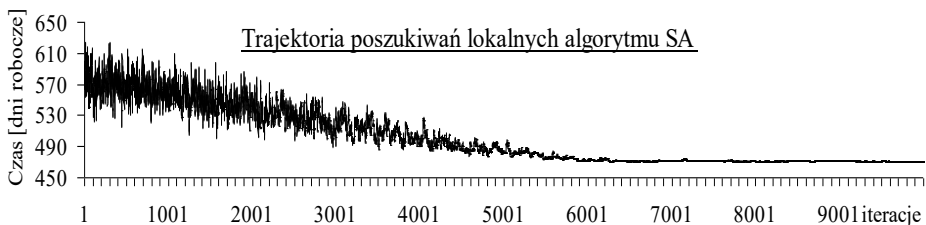
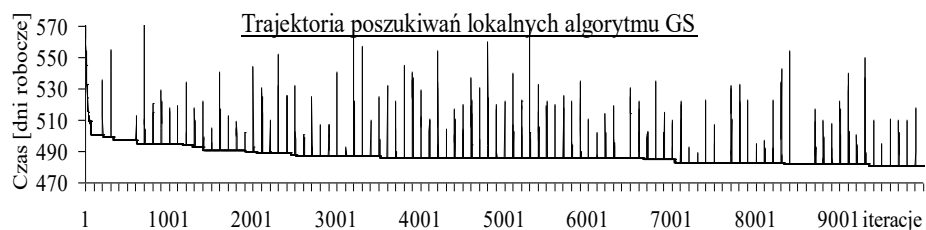
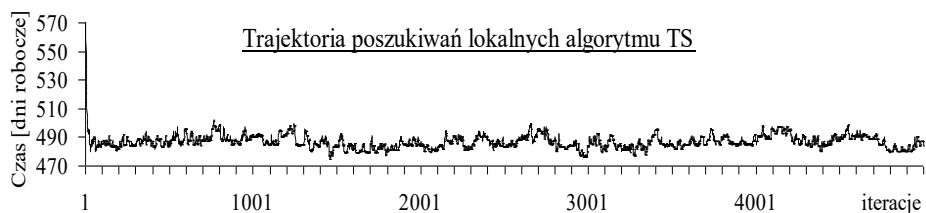
- dla instancji o rozmiarach $n = 10$ algorytmy TS, SA dostarczały rozwiązania optymalnych, a algorytm GS średnio o 0,10% gorsze od optymalnych,
- algorytmy TS, SA, GS dostarczały rozwiązań lepszych od rozwiązań suboptymalnych otrzymanych za pomocą algorytmu B&B średnio o od 2,55% do 8,20% ($n = 20, 30$),
- najlepsze wyniki uzyskiwano z zastosowaniem algorytmu TS, gorsze – algorytmów SA i GS.

Istotną cechą algorytmów metaheurystycznych jest ich uniwersalność i elastyczność zastosowania do rozwiązywania zagadnień z różnymi ograniczeniami i kryteriami (forma danego algorytmu jest zależna tylko od postaci zmiennej decyzyjnej). Jest to ważna cecha odróżniająca te algorytmy od stosowanego najczęściej do tej pory w TCM algorytmu B&B, który przy zmianie ograniczeń lub parametrów wymaga ponownego formułowania funkcji dolnych i górnych ograniczeń.

Tab. 7.3. Średnie błędy względne dla badanych trzech algorytmów metaheurystycznych

Rozmiar przykładu <i>n x m</i>	PRP(TS) %	PRP(SA) %	PRP(GS) %
10x7	0,00	0,00	0,08
10x11	0,00	0,00	0,07
10x16	0,00	0,00	0,16
PRP średnio dla n = 10	0,00	0,00	0,10
20x7	20x7	20x7	20x7
20x11	20x11	20x11	20x11
20x16	20x16	20x16	20x16

PRP średnio dla $n = 20$	PRP średnio dla $n = 20$	PRP średnio dla $n = 20$	PRP średnio dla $n = 20$
30x7	30x7	30x7	30x7
30x11	30x11	30x11	30x11
30x16	30x16	30x16	30x16
PRP średnio dla $n = 30$	PRP średnio dla $n = 30$	PRP średnio dla $n = 30$	PRP średnio dla $n = 30$
średnie PRP %	średnie PRP %	średnie PRP %	średnie PRP %



Źródło: M. Podolski 2008.

Rys. 7.5. Przykładowe trajektorie poszukiwań lokalnych badanych metaheurystyk

W wyniku przeprowadzonych obliczeń, oraz analizy porównawczej wyników można stwierdzić, że w przedstawionym eksperymencie obliczeniowym najlepsze rezultaty uzyskano w przypadku zastosowania algorytmu TS.

8. Zastosowanie Metod Sprzężeń Czasowych w harmonogramowaniu procesów budowlanych

Macierz czasów realizacji robót na frontach przez brygady robocze $T = [t_{ij}]$, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$, ma wymiar $n \times m$.

Elementami macierzy mogą być czasy wykonania robót na frontach wyznaczone na podstawie danych normatywnych lub po opracowaniu wyników badań statystycznych:

$$t_{ij} = f(P_{ij}, B_{ij}), \quad (8.1)$$

gdzie:

t_{ij} – element macierzy,

P_{ij} – pracochłonność robót j na obiekcie i ,

B_{ij} – ilościowy skład brygady roboczej wykonującej j -ty proces na i -tym obiekcie.

8.1. Techniki wyznaczenia czasów realizacji procesów budowlanych

Na przebieg procesów budowlanych mają wpływ pojawiające się w czasie realizacji czynniki destabilizujące. Czasy wykonania robót na poszczególnych frontach mogą ulegać odchyleniom od wartości określonych na podstawie danych normowych. Ważnym więc zadaniem jest możliwie rzetelne wyznaczenie czasów realizacji robót na frontach (t_{ij}) z uwzględnieniem losowego charakteru procesu realizacji.

Badania czasów wykonania robót na frontach wymagają zastosowania odpowiedniej skali dokładności oraz spełnienia warunku reprezentatywności. W budownictwie, z uwagi na małą powtarzalność realizowanych obiektów, warunek reprezentatywności próby jest trudny do spełnienia. Istnieje również niebezpieczeństwo, że gromadząc statystyczne informacje o danym procesie będziemy uwzględniać błędy organizacyjne czy technologiczne.

Na przykład w metodzie PERT (Program Evaluation and Review Technique) założono, że czas trwania czynności jest zmienną losową o rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa według funkcji beta. Przyjęto, że czas oczekiwany (t_e) wykonania zadania wyraża się zależnością:

$$t_e = \frac{t_a + 4t_m + t_b}{6}, \quad (8.2)$$

gdzie:

t_a – optymistyczna wartość szacunkowa czasu wykonania zadania,

t_m – najbardziej prawdopodobny czas trwania roboty,

t_b – pesymistyczna wartość szacunkowa czasu wykonania roboty.

Niedokładność tej metody polega na intuicyjnym określaniu optymistycznej, pesymistycznej i najbardziej prawdopodobnej wartości czasów trwania robót. Ma to bezpośredni wpływ na rzetelność wyników prowadzonych obliczeń. Ponadto, przyjęcie założenia, że zmienne losowe są od siebie niezależne jest zbytnim uproszczeniem wpływającym ujemnie na niezawodność opracowywanego harmonogramu.

Wykorzystując teorię zbiorów rozmytych, opracowano sposób wyznaczania terminu końcowego w sieci zależności, w której czasy wykonania robót są zbiorami rozmytymi.

Zbiór rozmyty D w przestrzeni X określa funkcja udziału:

$$U_D : X \rightarrow [0,1]. \quad (8.3)$$

Charakterystyczną cechą prezentowanego sposobu jest wyznaczenie zbioru możliwych terminów wykonania robót. Określenie terminu realizacji kompleksu robót polega na wyznaczeniu przedziału czasowego, którego rozpiętość uzależniona jest od pewności oszacowania czasów ich wykonania.

W modelach systemów potokowych przyjęto: dany jest zbiór n zadań $J = \{1,2,\dots,n\}$, które należy wykonać kolejno, bez przerywania, na każdej z m maszyn ze zbioru $M = \{1,2,\dots,m\}$. Wykonywanie zadania na maszynie k (dla $k = 2,\dots,m$) może się rozpocząć dopiero po zakończeniu wykonywania tego zadania na maszynie $k-1$ oraz kolejność wykonywania zadań na wszystkich maszynach musi być taka sama. Każda maszyna w dowolnej chwili może, co najwyżej, wykonywać jedno zadanie. Niech $p_{i,k}$ będzie czasem wykonywania zadania i na maszynie k .

Należy wyznaczyć kolejność wykonywania zadań (taką samą dla każdej maszyny), która minimalizuje:

$$C_{\max} = \max\{C_{i,m}; i = 1,2,\dots,n\}, \quad (8.4)$$

gdzie $C_{i,m}$ jest czasem zakończenia wykonywania zadania i na ostatniej, m -tej maszynie.

Jeżeli liczba maszyn wynosi trzy lub więcej, wówczas problem ten jest silnie *NP-trudny* (Brown, Łomnicki 1966). W ostatnich latach opublikowano wiele algorytmów metaheurystycznych rozwiązywania problemu przepływowego – systemu potokowego w budownictwie. Najlepsze z nich są oparte na metodzie poszukiwania z zabronieniami (Bożejko, Wodecki 2006). Wyznaczane przez te algorytmy rozwiązania, w odniesieniu do reprezentatywnej grupy przykładów, tylko nieznacznie różnią się od najlepszych znanych obecnie w literaturze.

Łatwo zauważyć, że rozpatrywany problem przepływowy sprowadza się do wyznaczenia permutacji optymalnej (o minimalnym terminie zakończenia wykonywania zadań) w zbiorze wszystkich permutacji zadań $J = \{1,2,\dots,n\}$.

8.2. Metoda przeszukiwania z tabu

Zamieszczone w literaturze (Błażewicz 1988, Bożejko, Wodecki 2005) wyniki porównawcze wskazują, że do wyznaczania bardzo dobrych rozwiązań przybliżonych, dla większości klasycznych *NP-trudnych* problemów szeregowania zadań (np. *flow shop*, *job shop*), najlepsze są algorytmy oparte na metodzie poszukiwań z zabronieniami. Generalnie, metoda ta polega na iteracyjnym polepszaniu bieżącego rozwiązania poprzez lokalne przeszukiwanie. Rozpoczyna się od pewnego rozwiązania początkowego (startowego) x^0 . W każdej iteracji, dla bieżącego rozwiązania x^i , wyznacza się jego otoczenie $N(x^i)$ – podzbiór zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Otoczenie jest generowane przez ruchy, tj. ustalone przekształcenia rozwiązania x^i . Następnie, z otoczenia jest wyznaczany najlepszy element x^{i+1} , który przyjmuje się za bieżące rozwiązanie w następnej iteracji. Dopuszcza się przy tym możliwość zwiększania wartości funkcji celu (przy wyznaczaniu nowego bieżącego rozwiązania), aby w ten sposób zwiększyć szansę na osiągnięcie minimum globalnego. Takie ruchy „w górę” należy jednak w pewien sposób kontrolować, ponieważ w przeciwnym razie po osiągnięciu minimum lokalnego nastąpiłby szybki do niego powrót. Aby zapobiec generowaniu, w nowych iteracjach rozwiązań niedawno rozpatrywanych (powstawaniu cykli), zapamiętuje się je (ich atrybuty) na liście rozwiązań zakazanych, tzw. liście tabu.

Niech π będzie dowolną permutacją startową, TL listą tabu, a x^* najlepszym do tej pory znalezionym rozwiązaniem (za rozwiązanie startowe oraz x^* można przyjąć dowolną permutację, np. wyznaczoną przez algorytm konstrukcyjny NEH.

8.2.1. Schemat algorytmu przeszukiwania z tabu (TSF)

repeat

Wyznaczyć otoczenie $N(\pi)$ permutacji π ;

Usunąć z $N(\pi)$ permutacje zakazane przez listę **TL**;

Znaleźć permutację $\delta \in N(\pi)$ taką, że:

$$F(\delta) = \min \{F(\beta) : \beta \in N(\pi)\};$$

if $F(\delta) < F(\pi^*)$ **then** $\pi^* \leftarrow \delta$;

Umieść atrybuty δ na liście **TL**;

$\pi \leftarrow \delta$;

until *Warunek_Zakończenia*.

Warunkiem zakończenia jest zazwyczaj ustalona liczba iteracji lub czas obliczeń.

Zasadnicze znaczenie w implementacji metody TS ma sposób generowania i przeglądania otoczenia oraz organizacja listy ruchów zakazanych.

8.2.2. Ruch i otoczenie

W każdej iteracji algorytmu TS jest wyznaczane otoczenie – podzbiór zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Jest on generowany przez ruchy – przekształcenia określone na zbiorze wszystkich permutacji. W wielu dobrych algorytmach rozwiązywania problemów szeregowania zdań otoczenie jest generowane przez ruchy typu wstaw (ang. *insert*).

Niech k i l ($k \neq l$) będzie parą pozycji w permutacji:

$$\pi = (\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(k-1), \pi(k), \pi(k+1), \dots, \pi(l-1), \pi(l), \pi(l+1), \dots, \pi(n)). \quad (8.5)$$

Ruch typu wstaw (i -ruch) i_l^k , polega na przestawieniu zadania $\pi(k)$ z pozycji k na pozycję l . Generuje on nową permutację $i_l^k(\pi) = \pi^k$. Jeżeli $k < l$ to nowa permutacja:

$$\pi_l^k = (\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(k-1), \pi(k+1), \dots, \pi(l-1), \pi(l), \pi(k), \pi(l+1), \dots, \pi(n)). \quad (8.6)$$

Podobnie jest, gdy $k > l$. Przez $R(\pi)$ oznaczamy zbiór wszystkich takich ruchów.

Otoczeniem permutacji π , generowanym przez ruchy $R(\pi)$, jest zbiór:

$$N(\pi) = \{i_l^k(\pi) : i_l^k \in R(\pi)\}. \quad (8.7)$$

Liczba elementów tego otoczenie jest równa $n(n-1)$.

8.2.3. Lista ruchów zakazanych

Aby zapobiec powstawaniu cykli (powrotowi do tej samej permutacji, po niewielkiej liczbie iteracji algorytmu), pewne atrybuty każdego ruchu zapamiętuje się na liście ruchów zakazanych. Obsługiwana jest ona na zasadzie kolejki *FIFO*. Wykonując ruch $i_j^r \in R(\pi)$, (tj. generując z π permutację π_j^r) na listę zapisujemy atrybuty tego ruchu, trójkę: $\pi(r), j, F(\pi_j^r)$ Załóżmy, że rozpatrujemy ruch $i_l^k \in R(\beta)$ generujący permutację β_l^k Jeżeli na liście jest trójka (r, j, Ψ) taka, że $\beta(k) = r$, $l = j$ oraz $F(\beta_l^k) \geq \Psi$ to ruch taki eliminujemy (usuwamy) ze zbioru $R(\beta)$

Złożoność obliczeniowa algorytmu opartego na metodzie przeszukiwania z tabu zależy od sposobu realizacji jego elementów, tj. metody wyznaczania otoczenia, organizacji oraz długości listy, sposobu wyliczania wartości funkcji celu oraz warunku zakończenia.

8.3. Algorytm przeszukiwania z tabu (*TSF*) z rozmytymi czasami wykonania robót

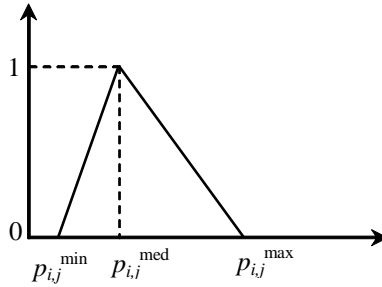
Niepewne czasy wykonywania robót będą reprezentowane przez trzypunktowe liczby rozmyte:

$$\tilde{p}_{i,j} = (p_{i,j}^{\min}, p_{i,j}^{\text{med}}, p_{i,j}^{\max}), \quad (8.8)$$

gdzie:

$$p_{i,j}^{\min} \leq p_{i,j}^{\text{med}} \leq p_{i,j}^{\max} \text{ dla } i \in J, j \in M.$$

Funkcja przynależności takiej liczby jest przedstawiona na Rys. 8.11.



Rys. 8.11. Funkcja przynależności trypunktowej liczby rozmytej $\tilde{p}_{i,j} = (p_{i,j}^{\min}, p_{i,j}^{\text{med}}, p_{i,j}^{\max})$

Wynikiem działań arytmetycznych na liczbach rozmytych jest liczba rozmyta. Jeżeli więc czas wykonywania zadania $\pi(i)$ na maszynie j jest określony przez liczbę rozmytą:

$$\tilde{p}_{\pi(i),j} = (p_{\pi(i),j}^{\min}, p_{\pi(i),j}^{\text{med}}, p_{\pi(i),j}^{\max}), \quad (8.9)$$

to wówczas termin jego zakończenia jest liczbą rozmytą postaci:

$$\tilde{C}_{\pi(i),j} = (C_{\pi(i),j}^{\min}, C_{\pi(i),j}^{\text{med}}, C_{\pi(i),j}^{\max}), \quad (8.10)$$

gdzie $C_{\pi(i),j}^{\min}, C_{\pi(i),j}^{\text{med}}, C_{\pi(i),j}^{\max}$ można wyznaczyć z następujących zależności rekurencyjnych:

$$\begin{aligned} C_{\pi(i),j}^{\min} &= \max\{C_{\pi(i-1),j}^{\min}, C_{\pi(i),j-1}^{\min}\} + p_{\pi(i),j}^{\min} \\ C_{\pi(i),j}^{\text{med}} &= \max\{C_{\pi(i-1),j}^{\text{med}}, C_{\pi(i),j-1}^{\text{med}}\} + p_{\pi(i),j}^{\text{med}}, \\ C_{\pi(i),j}^{\max} &= \max\{C_{\pi(i-1),j}^{\max}, C_{\pi(i),j-1}^{\max}\} + p_{\pi(i),j}^{\max} \end{aligned} \quad (8.11)$$

z warunkami początkowymi:

$$C_{\pi(0),j}^{\min} = C_{\pi(0),j}^{\text{med}} = C_{\pi(0),j}^{\max}, j = 1, 2, \dots, m \text{ oraz } C_{\pi(i),0}^{\min} = C_{\pi(i),0}^{\text{med}} = C_{\pi(i),0}^{\max}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (8.12)$$

Czas wykonywania wszystkich zadań (w kolejności π) jest także liczbą rozmytą:

$$\tilde{C}_{\max}(\pi) = (C_{\pi(n),m}^{\min}, C_{\pi(n),m}^{\text{med}}, C_{\pi(n),m}^{\max}). \quad (8.13)$$

Dla porównywania rozmytych wartości funkcji celu została zastosowana słaba reguła porównania. W przypadku trzypunktowej liczby rozmytej $\tilde{C}_{\max}(\pi)$ funkcja defuzyfikacyjna jest wówczas postaci:

$$I(\tilde{C}_{\max}(\pi)) = \frac{1}{4}(C_{\pi(n),m}^{\min} + C_{\pi(n),m}^{\text{med}} + C_{\pi(n),m}^{\text{med}} + C_{\pi(n),m}^{\max}). \quad (8.14)$$

Uwzględniając założenia dotyczące czasów wykonywania zadań (liczby rozmyte w trzypunktowej reprezentacji), dokonano odpowiednich modyfikacji, przedstawionego w poprzednim rozdziale, algorytmie *TSF*. Tę wersję algorytmu będziemy oznaczali przez *TSF^{Roz}*. Przeprowadzono eksperymenty obliczeniowe dotyczące porównania działania algorytmu deterministycznego *TSF* i z danymi rozmytymi *TSF^{Roz}*.

Oba algorytmy były testowane na losowo generowanych przykładach. Dane zwane dalej *deterministycznymi* generowano w następujący sposób. Dla ustalonej liczby zadań n oraz maszyn m losowano z przedziału (zgodnie z rozkładem jednostajnym) czasy wykonywania zadań na maszynach $p_{i,j}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$. Dla każdego n i m losowano w ten sposób 10 przykładów.

Niepewne czasy wykonywania zadań $\tilde{p}_{i,j}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$ są reprezentowane przez trzypunktową liczbę rozmytą $p_{i,j}^{\min}, p_{i,j}^{\text{med}}, p_{i,j}^{\max}$ gdzie:

$$p_{i,j}^{\text{med}} = p_{i,j} \cdot p_{i,j}^{\min} = [p_{i,j} - p_{i,j}/6] \text{ oraz } p_{i,j}^{\max} = [p_{i,j} + p_{i,j}/3]. \quad (8.15)$$

Jeżeli $\tilde{p}_{i,j} = (p_{i,j}^{\min}, p_{i,j}^{\text{med}}, p_{i,j}^{\max})$ ($i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$) jest rozmytym czasem wykonywania zadania, to czas zaburzony generowano losowo zgodnie z rozkładem jednostajnym na przedziale $[p_{i,j}^{\min}, p_{i,j}^{\max}]$.

Dla każdego przykładu rozwiązanego przez algorytm $A \in \{TSF, TSF^{\text{Roz}}\}$ wyznaczono procentowy błąd względny (względne odchylenie)

$$\delta = \frac{F^A - F^*}{F^*} \cdot 100\%, \text{ gdzie } F^A \text{ jest wartością rozwiązania wyznaczonego przez}$$

algorytm A , a F^* wartością wyznaczoną przez najlepszy obecnie algorytm zamieszczony w pracy (Rogalska, Bożejko, Hejducki 2009). Średnie wartości tych błędów δ_{aprd} oraz $\delta_{\text{aprd}}^{\text{Roz}}$ (z 10 przykładów danych zaburzonych, dla każdego rozmiaru) zamieszczono w Tab. 8.1.

Tab. 8.1. Średnie błędy względne algorytmów (w %).

Liczba zadań <i>n</i>	Algorytm deterministyczny <i>TSF</i> (średni błąd względny δ_{aprd})	Algorytm rozmyty <i>TSF^{Roz}</i> (średni błąd względny δ_{aprd}^{Roz})
25	6,6	3,1
50	9,1	2,9
100	13,9	5,4
150	23,2	8,7
200	21,8	9,3
250	25,6	10,5
500	28,3	12,7
średnio	18,4	7,5

Na podstawie zamieszczonych wyników możemy stwierdzić, że rozwiązania (tj. permutacje, czyli kolejności wykonywania zadań) wyznaczone przez algorytm rozmyty *TSF^{Roz}* są znacznie bardziej stabilne. Niepewność szacunków czasów wykonywania zadań, dla rozwiązania uzyskanego przez algorytm rozmyty, ma znacznie mniejszy wpływ na ostateczny czas wykonania wszystkich zadań niż w przypadku rozwiązania wyznaczonego przez algorytm deterministyczny. Średnie błędy względne wynoszą odpowiednio 18,4% oraz 7,5%. Zatem, można przypuszczać, że gdy kolejność zadań jest wyznaczona przez algorytm z rozmytymi parametrami, znacznie mniej zmienia się wartość funkcji celu przy zaburzeniu czasów wykonywania zadań.

8.3.1. Eksperyment obliczeniowy

Na podstawie wstępnego eksperymentu obliczeniowego z użyciem algorytmu tabu z rozmytymi czasami wykonania zadań, przeprowadzono obliczenia optymalizacyjne dla danych z praktyki budowlanej.

Zadanie inwestycyjne dotyczy realizacji kompleksu dwunastu budynków mieszkalnych, tworzących fragment nowego osiedla mieszkaniowego. Są one zbliżone pod względem technologicznym. Podstawą szacowania czasów wykonania robót są przedmiary robót oraz np. KNR (Katalog Nakładów Rzeczowych) na bazie których można określić pracochłonność robót. Po ustaleniu i uzgodnieniu niezbędnych zasobów ludzkich (grup roboczych), oblicza się możliwy czas trwania robót, przekształcając nakłady rzeczowe z liczby tzw. roboczogodzin [r-h], w dni robocze [dni-rob]. Tak ustalone dane tworzą tzw. Strukturę Podziału Prac (SPP), określając porządek technologiczny robót. Dane liczbowe do obliczeń optymalizacyjnych dotyczą kompleksu 12 obiektów

budowlanych, na których planuje się realizację 9 procesów budowlanych. Przedsięwzięcie reprezentuje macierz czasów trwania procesów budowlanych $T_{9 \times 12}$ gdzie T_{ij} jest czasem wykonania roboty i na obiekcie j . Poniżej przedstawiono przykładową macierz czasów trwania robót na obiektach budowlanych.

Tab. 8.2. Macierz czasów trwania robót na obiektach budowlanych

	7	8	7	7	7	8	7	7	6	7	5	4
	8	11	8	9	9	11	8	9	8	9	8	8
	8	11	10	9	9	11	10	9	11	9	9	9
	7	8	7	7	8	8	7	7	8	8	8	7
$T=$	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	15
	11	14	11	13	13	14	11	13	14	13	14	8
	9	14	9	11	10	13	9	11	8	10	11	9
	4	8	6	7	5	7	7	8	9	9	9	5
	6	9	5	9	7	5	8	9	8	7	7	7

Elementy macierzy czasów trwania robót opracowano na podstawie przedmiarów, z uwzględnieniem dostępnych zasobów, dla kompleksu budynków mieszkalnych. Właściwe oszacowanie cyklu realizacji inwestycji jest niezbędne do sformułowania warunków kontraktu na roboty budowlane dla Inwestora, Wykonawców oraz Podwykonawców.

Do wyznaczenia cyklu realizacji przedsięwzięcia budowlanego (TT), zastosowano metodę sprzężeń czasowych TCM I. W wyniku przeprowadzonych obliczeń wyznaczono cykl realizacji wynoszący $TT=250$ jednostek, z uwzględnieniem warunku ciągłości procesów. Po przeprowadzeniu obliczeń z zastosowaniem algorytmu TSF uzyskano $TT=233$ jednostek. Do obliczeń optymalizacyjnych przyjęto „rozmyte” czasy wykonania robót. Dla danych zaburzonych, średni błąd względny wynosi zaledwie 4,2%. Może on służyć na przykład jako parametr umożliwiający oszacowanie wielkości ryzyka i kontyngencji czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego, wielkości buforów czasu (np. wg metodyki CCS/BM), jako wspomaganie procesów decyzyjnych.

W praktyce bardzo trudno określić, przed przystąpieniem do robót, rzeczywiste czasy wykonywania poszczególnych robót. Modelujemy więc je za pomocą liczb rozmytych. Do rozwiązywania zadania optymalizacyjnego

zastosowano algorytm oparty na metodzie przeszukiwania z zabronieniami z rozmytymi danymi. Wyznaczone przez ten algorytm rozwiązania są stabilniejsze (mniej wrażliwe na zmiany parametrów rozpatrywanego zagadnienia) od rozwiązań algorytmu z parametrami określonymi przez liczby całkowite. Na podstawie przeprowadzonej analizy w p.8.3, stwierdzono, że zmiana czasów wykonywania zadań, dla rozwiązania wyznaczonego przez algorytm rozmyty, ma znacznie mniejszy wpływ na ostateczny czas wykonania wszystkich zadań niż w przypadku rozwiązania wyznaczonego przez algorytm deterministyczny. Średnie błędy względne wynoszą odpowiednio 18.4% oraz 7.5%. Po zaburzeniu czasów wykonywania robót budowlanych, znacznie mniej zmienia się wartość funkcji celu, gdy kolejność ich wykonywania jest wyznaczona przez algorytm z rozmytymi parametrami zadań. Uzyskane dane liczbowe mogą zatem wspomagać oszacowanie wielkości buforów czasu (np. wg metodyki CCS/BM). Niniejszy rozdział stanowi kontynuację studiów autorów nad zastosowaniem algorytmów metaheurystycznych w harmonogramowaniu robót budowlanych (ze szczególnym uwzględnieniem liczb rozmytych w problemach optymalizacji dyskretnej).

8.4. Obliczanie czasu realizacji procesów budowlanych Metodą Progностyczno-Regresyjną

Prace M. Rogalskiej (2016) zawierają metodyki obliczeń umożliwiające wyznaczanie rzeczywistych czasów procesów budowlanych, uwzględniających warunki wykonania robót budowlanych. Przedstawiona metodyka prognozowania czasu realizacji procesów budowlanych umożliwia sporządzenie harmonogramów uwzględniających warunki rzeczywiste a nieuśrednione. Jest to nowe podejście do wyznaczania czasów procesów budowlanych. Opracowana metodyka bazuje na analizie obliczeniowej metod progностycznych: regresji wielorakiej, wieloimiennej regresji adaptacyjnej z użyciem funkcji sklepanych, uogólnionych modeli addytywnych, sztucznych sieci neuronowych, wektorów nośnych i autoregresji zintegrowanej. W wyniku obliczeń różnymi metodami otrzymuje się wiele modeli progностycznych, z których wybiera się do stosowania model charakteryzujący się najmniejszym błędem progностycznym. Istnieje możliwość wprowadzania do obliczeń bardzo dużej liczby czynników mających wpływ na czas realizacji procesu w określonych warunkach. Mogą to być wartości liczbowe lub lingwistyczne. Zaproponowana metodyka jest uniwersalna, istnieje możliwość zastosowania jej w odniesieniu do wszystkich procesów budowlanych: robót liniowych, kubaturowych, procesów prostych i złożonych.

Na podstawie badań stwierdzono, że czasy wykonania procesu budowlanego w szczegółowych uwarunkowaniach rzeczywistych różnią się w sposób znaczny od czasów uśrednionych zawartych w bazie normatywnej. Proponowana metoda umożliwia obliczenie czasu trwania procesów z uwzględnieniem czynników wpływających na czas realizacji. Istotą metody jest opracowanie wzorów

regresyjnych wyznaczających czasy procesów budowlanych z uwzględnieniem czynników wpływu i alternatywne zastąpienie nimi bazy normatywnej w odniesieniu do pojedynczych przedsiębiorstw.

Modelowanie statystyczne procesu realizacji kompleksu obiektów umożliwia określenie sumy czynników losowych destabilizujących proces wznoszenia i ich prawdopodobieństwa występowania, co ma istotne znaczenie na etapie harmonogramowania, przy określeniu niezawodności procesu realizacji lub przy projektowaniu realizacji z zadaniem poziomem niezawodności. Podstawowym więc problemem, który należy rozwiązać aby prawidłowo planować realizację kompleksu obiektów jest wyznaczenie elementów macierzy wejściowej. Brak aktualnej bazy normatywnej “norm pracy technicznie uzasadnionych”, uniemożliwia opracowywanie realnych harmonogramów realizacyjnych.

Niedostatek ten można wyeliminować stosując metody i modele obliczeniowe zawarte w pracy (Rogalska 2016).

8.5. Obliczenia charakterystyk czasowych robót budowlanych z zastosowaniem MS EXCEL

Poniżej przedstawiono przykład obliczenia cykli realizacji kompleksu robót budowlanych z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych. Uwzględniono zagadnienie szeregowania zadań z użyciem algorytmu B&B. Uważa się, że zastosowany algorytm jest dokładny dla takiego rozmiaru przestrzeni rozwiązań.

Do obliczeń optymalizacyjnych przyjęto dane liczbowe wyznaczone na podstawie przedmiarów dla pięciu budynków mieszkalnych stanowiących kompleks (oznaczono I, II, III, IV, V) – zadanie inwestycyjne. Po scaleniu robót w zadania, stanowiące oddzielne zlecenia przydzielane grupom roboczym obliczono niezbędne nakłady wyznaczone na podstawie Katalogów Nakładów Rzeczowych. Nakłady czasu z podziałem na rodzaje robót przedstawiono w tabeli poniżej.

Opis robót scalonych z przydziałem brygad roboczych:

Do wykonania robót na podstawie praktyki budowlanej przyjęto typowe grupy pracowników:

- RI – Roboty przygotowawcze;
- RII – Roboty ziemne – wykonanie wykopów;
- RIII – Wykonanie fundamentów;
- RIV – Wykonanie ścian nośnych i działowych, stropów oraz schodów żelbetowych wewnętrznych;
- RV – Roboty dachowe – wykonanie drewnianej więźby dachowej oraz pokrycia dachowego;
- RVI – Roboty wykończeniowe – wykonanie tynków oraz montaż stolarki okiennej i drzwiowej;

- RVII – Roboty wykończeniowe – roboty malarskie, wykonanie podłóg i posadzek oraz elementów zewnętrznych.

W wyniku obliczeń i pogrupowania robót według struktury podziału prac utworzono tabelę z danymi wejściowymi, przedstawioną poniżej.

8.5.1. Obliczenia cyklu wykonania robót budowlanych z zastosowaniem metody organizacji z ciągłym prowadzeniem robót TCM I

Tab. 8.3. Dane wyjściowe – czasy wykonania robót na działkach (obiektach) [jedn]

	RI	RII	RIII	RIV	RV	RVI	RVII
I	3	3	14	20	6	6	17
II	2	4	10	23	4	7	13
III	4	5	11	19	8	6	20
IV	2	2	17	15	7	5	15
V	4	3	12	22	5	8	16
							Σ=81

Obliczenie okresów rozwinięcia

$$\text{tr}(\text{RII}) = \max\{3, 2, 2, -1, 1\} = 3$$

$$\text{tr}(\text{RIII}) = \max\{3, -7, -12, -21, -35\} = 3$$

$$\text{tr}(\text{RIV}) = \max\{14, 4, -8, -10, -13\} = 14$$

$$\text{tr}(\text{RV}) = \max\{20, 37, 52, 59, 74\} = 74$$

$$\text{tr}(\text{RVI}) = \max\{6, 4, 5, 6, 6\} = 6$$

$$\text{tr}(\text{RVII}) = \max\{6, -4, -11, -26, -33\} = 6$$

$$\text{Całkowity cykl} \quad T(I) = 187$$

Wyznaczanie kolejności robót

Macierze podwójne wg algorytmu Johnson'a:

RI	RII	>	RI'	RII'	>	RII	RIII	>	RII'	RIII'
3	3		2	4		3	14		2	17
2	4		3	3		4	10		3	14
4	5		4	5		5	11		3	12
2	2		4	3		2	17		4	10
4	3		2	2		3	12		5	11

RIII	RIV
14	20
10	23
11	19
17	15
12	22

RIII'	RIV'
10	23
11	19
12	22
14	20
17	15

RIV	RV
20	6
23	4
19	8
15	7
22	5

RIV'	RV'
19	8
15	7
20	6
22	5
23	4

RV	RVI
6	6
4	7
8	6
7	5
5	8

RV'	RVI'
4	7
5	8
6	6
8	6
7	5

RVI	RVII
6	17
7	13
6	20
5	15
8	16

RVI'	RVII'
5	15
6	20
6	17
7	13
8	16

- ETAP 1 – WIERSZ PIERWSZY.
 - Wyznaczenie wskaźnika GMM 1.

I	3	3	14	20	6	6	17					
	2	4	2	17	10	23	19	8	4	7	5	15
	4	5	3	12	11	19	15	7	5	8	6	20
	4	3	4	10	12	22	22	5	8	6	7	13
	2	2	5	11	17	15	23	4	7	5	8	16

$\Sigma=81$

- Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\begin{aligned} \text{tr}(\text{RII}) &= \max\{ 3, 2, 2, 1, 0 \} = 3 \\ \text{tr}(\text{RIII}) &= \max\{ 3, -9, -23, -31, -36 \} = 3 \\ \text{tr}(\text{RIV}) &= \max\{ 14, 4, -8, -15, -20 \} = 14 \\ \text{tr}(\text{RV}) &= \max\{ 20, 33, 40, 55, 73 \} = 73 \\ \text{tr}(\text{RVI}) &= \max\{ 6, 4, 2, 2, 3 \} = 6 \\ \text{tr}(\text{RVII}) &= \max\{ 6, -6, -15, -28, -33 \} = 6 \\ \text{T(I)} &= 186 \end{aligned}$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.

II	2	4		10		23		4		7		13
	3	3	2	17	11	19	19	8	5	8	5	15
	4	5	3	14	12	22	15	7	6	6	6	20
	2	3	3	12	14	20	20	6	8	6	6	17
	4	2	5	11	17	15	22	5	7	5	8	16

$\Sigma=81$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 1, 2, -1, 0 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -4, -18, -29, -36 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, -2, -9, -17, -20 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 38, 45, 58, 74 \} = 74$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 2, 0, 2, 3 \} = 4$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, -1, -10, -24, -33 \} = 7$$

$$T(\text{II}) = 182$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 3.

III	4	5		11		19		8		6		20
	2	4	2	17	10	23	15	7	4	7	5	15
	3	3	3	14	12	22	20	6	5	8	6	17
	4	3	3	12	14	20	22	5	6	6	7	13
	2	2	4	10	17	15	23	4	7	5	8	16

$\Sigma=81$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 4, 1, 0, 1, 0 \} = 4$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 5, -4, -18, -29, -37 \} = 5$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 11, 2, -9, -17, -20 \} = 11$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 19, 26, 39, 55, 73 \} = 73$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 8, 6, 4, 2, 3 \} = 8$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 6, -9, -18, -28, -33 \} = 6$$

$$T(\text{III}) = 188$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 4.

IV	2	2		17		15		7		5		15
	2	4	3	14	10	23	19	8	4	7	6	20
	3	3	3	12	11	19	20	6	5	8	6	17
	4	5	4	10	12	22	22	5	6	6	7	13
	4	3	5	11	14	20	23	4	8	6	8	16

$$\Sigma=81$$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 2, 1, 2, 1 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 2, -12, -23, -31, -36 \} = 2$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 17, 12, 0, -7, -15 \} = 17$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 15, 27, 39, 55, 73 \} = 73$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 7, 6, 4, 2, 4 \} = 7$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 5, -4, -18, -28, -33 \} = 5$$

$$T(\text{IV}) = 187$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 5.

V	4	3		12		22		5		8		16
	2	4	2	17	10	23	19	8	4	7	5	15
	3	3	3	14	11	19	15	7	6	6	6	20
	4	5	4	10	14	20	20	6	8	6	6	17
	2	2	5	11	17	15	23	4	7	5	7	13

$$\Sigma=81$$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 4, 3, 2, 3, 0 \} = 4$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 3, -7, -21, -31, -36 \} = 3$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 12, 0, -12, -17, -20 \} = 12$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 22, 36, 43, 56, 73 \} = 73$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 5, 1, 0, 2, 3 \} = 5$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 8, -3, -12, -26, -36 \} = 8$$

$$T(V) = 186$$

• ETAP 2 – WIERSZ DRUGI.

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.1.

II	2	4	10	23	4	7	13					
I	3	3	14	20	6	6	17					
	4	5	2	17	11	19	19	8	5	8	5	15
	4	3	3	12	12	22	15	7	8	6	6	20
	2	2	5	11	17	15	22	5	7	5	8	16

$$\Sigma=81$$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 1, 2, 1, 0 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -3, -15, -29, -36 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, 1, -8, -15, -20 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 39, 52, 59, 74 \} = 74$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 3, 2, 2, 3 \} = 4$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, 0, -12, -21, -33 \} = 7$$

$$T(I) = 182$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.3.

II	2	4	10	23	4	7	13
III	4	5	11	19	8	6	20

3	3	2	17	12	22	15	7	5	8	5	15
4	3	3	14	14	20	20	6	6	6	6	17
2	2	3	12	17	15	22	5	7	5	8	16

$\Sigma=81$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 2, 0, 1, 0 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -1, -10, -24, -35 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, -2, -9, -17, -20 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 38, 45, 58, 74 \} = 74$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 5, 4, 2, 3 \} = 5$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, 0, -15, -24, -33 \} = 7$$

$$T(\text{III}) = 183$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.4.

II	2	4	10	23	4	7	13					
IV	2	2	17	15	7	5	15					
	3	3	3	14	11	19	19	8	5	8	6	20
	4	5	3	12	12	22	20	6	6	6	6	17
	4	3	5	11	14	20	22	5	8	6	8	16

$\Sigma=81$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 0, 1, 2, 1 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -4, -18, -29, -36 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, 4, 0, -7, -15 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 34, 46, 58, 74 \} = 74$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 4, 4, 2, 4 \} = 5$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, -1, -10, -24, -33 \} = 7$$

$$T(\text{IV}) = 183$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.5.

II	2	4	10	23	4	7	13					
V	4	3	12	22	5	8	16					
	3	3	2	17	11	19	19	8	6	6	5	15
	4	5	3	14	14	20	15	7	8	6	6	20
	2	2	5	11	17	15	20	6	7	5	6	17

$\Sigma=81$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 2, 2, 3, 0 \} = 3$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -3, -13, -27, -36 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, -1, -12, -17, -20 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 41, 55, 62, 75 \} = 75$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 2, 0, 2, 3 \} = 4$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, 2, -9, -18, -32 \} = 7$$

$$T(V) = 184$$

• ETAP 3 – WIERSZ TRZECI.

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.1.3.

II	2	4	10	23	4	7	13					
I	3	3	14	20	6	6	17					
III	4	5	11	19	8	6	20					
	4	3	2	17	12	22	15	7	5	8	5	15
	2	2	3	12	17	15	22	5	7	5	8	16

$\Sigma=81$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 1, 2, 1, 0 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -3, -12, -21, -35 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, 1, -8, -15, -20 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 39, 52, 59, 74 \} = 74$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4 \ 3 \ 5 \ 4 \ 3 \} = 5$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7 \ 0 \ -11 \ -26 \ -33 \} = 7$$

$$T(\text{III}) = 183$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.1.4.

II	2	4	10	23	4	7	13					
I	3	3	14	20	6	6	17					
IV	2	2	17	15	7	5	15					
	4	5	3	12	11	19	19	8	5	8	6	20
	4	3	5	11	12	22	22	5	8	6	8	16

$$\Sigma=81$$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 1, 0, 2, 1 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -3, -15, -29, -36 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, 1, -2, -6, -13 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 39, 48, 60, 74 \} = 74$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 3, 4, 4, 4 \} = 4$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, 0, -12, -21, -33 \} = 7$$

$$T(\text{IV}) = 182$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.1.5.

II	2	4	10	23	4	7	13					
I	3	3	14	20	6	6	17					
V	4	3	12	22	5	8	16					
	4	5	2	17	11	19	19	8	8	6	5	15
	2	2	5	11	17	15	15	7	7	5	6	20

$$\Sigma=81$$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 1, 2, 3, 0 \} = 3$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -3, -14, -24, -36 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, 1, -7, -18, -20 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 39, 55, 69, 76 \} = 76$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 3, 2, 2, 3 \} = 4$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, 0, -9, -20, -29 \} = 7$$

$$T(V) = 185$$

• ETAP 4 – WIERSZ CZWARTY.

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.1.4.3.

II	2	4	10	23	4	7	13
I	3	3	14	20	6	6	17
IV	2	2	17	15	7	5	15
III	4	5	11	19	8	6	20
	4	3	12	22	5	8	16

$$\Sigma=81$$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 1, 0, 2, 1 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -3, -15, -27, -35 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, 1, -2, -6, -13 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 39, 48, 60, 74 \} = 74$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 3, 4, 7, 6 \} = 7$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, 0, -12, -21, -33 \} = 7$$

$$T(\text{III}) = 185$$

– Wyznaczenie wskaźnika GMM 2.1.4.5.

II	2	4	10	23	4	7	13
I	3	3	14	20	6	6	17

IV	2	2		17		15		7		5		15
V	4	3	12	22	5	8	16	4	3	12	22	5
	4	5	11	19	8	6	20	4	5	11	19	8

$\Sigma=81$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 1, 0, 2, 3 \} = 3$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -3, -15, -29, -36 \} = 4$$

$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, 1, -2, -5, -16 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 39, 48, 63, 77 \} = 77$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 3, 4, 4, 4 \} = 4$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, 0, -12, -19, -29 \} = 7$$

$$T(V) = 186$$

• ETAP 5 – WIERSZ PIĄTY.

– Obliczenie czasu całkowitego T.

II	2	4	10	23	4	7	13
I	3	3	14	20	6	6	17
IV	2	2	17	15	7	5	15
III	4	5	11	19	8	6	20
V	4	3	12	22	5	8	16

$\Sigma=81$

– Wyznaczenie okresów rozwinięcia.

$$\text{tr(RII)} = \max\{ 2, 1, 0, 2, 1 \} = 2$$

$$\text{tr(RIII)} = \max\{ 4, -3, -15, -27, -35 \} = 4$$

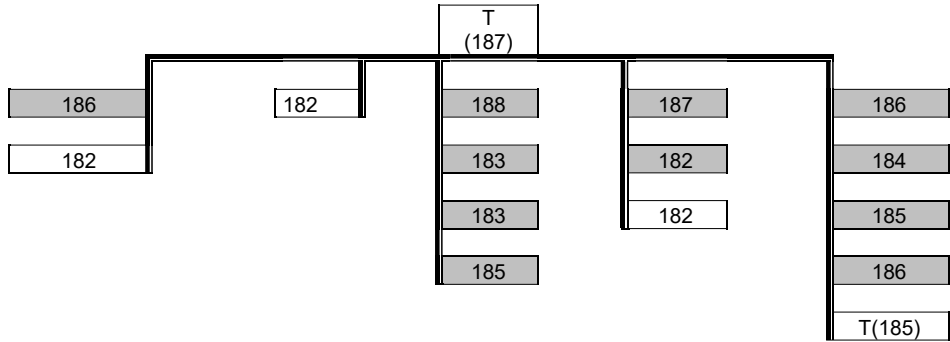
$$\text{tr(RIV)} = \max\{ 10, 1, -2, -6, -13 \} = 10$$

$$\text{tr(RV)} = \max\{ 23, 39, 48, 60, 74 \} = 74$$

$$\text{tr(RVI)} = \max\{ 4, 3, 4, 7, 6 \} = 7$$

$$\text{tr(RVII)} = \max\{ 7, 0, -12, -21, -33 \} = 7$$

$$T(V) = 185$$



Rys. 8.2. Drzewo wariantów dla metody TCM I

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wynik wynoszący 185 jednostek.

8.5.2. Obliczenia cyklu wykonania robót budowlanych z zastosowaniem metody organizacji z ciągłym prowadzeniem robót na działkach roboczych TCM II

Tab. 8.4. Dane wyjściowe – czasy wykonania robót na działkach (objektach) [jedn]

	RI	RII	RIII	RIV	RV	RVI	RVII	Σ	Σ -RVII	Σ -RI
I	3	3	14	20	6	6	17	68	51	66
II	2	4	10	23	4	7	13	63	50	61
III	4	5	11	19	8	6	20	73	53	69
IV	2	2	17	15	7	5	15	63	48	61
V	4	3	12	22	5	8	16	70	54	66

$$\Sigma=81$$

$$\text{tr}(\text{RII}) = \max\{ 2, 1, 1, -2, 0 \} = 2$$

$$\text{tr}(\text{RIII}) = \max\{ 3, -7, -12, -21, -35 \} = 3$$

$$\text{tr}(\text{RIV}) = \max\{ 14, 4, -8, -10, -13 \} = 14$$

$$\text{tr}(\text{RV}) = \max\{ 20, 37, 52, 59, 74 \} = 74$$

$$\text{tr}(\text{RVI}) = \max\{ 6, 4, 5, 6, 6 \} = 6$$

$$\text{tr}(\text{RVII}) = \max\{ 6, -4, -11, -26, -33 \} = 6$$

$$T(\text{I}) = 186$$

Transponowana macierz:

	I	II	III	IV	V
RI	3	2	4	2	4
RII	3	4	5	2	3
RIII	14	10	11	17	12
RIV	20	23	19	15	22
RV	6	4	8	7	5
RVI	6	7	6	5	8
RVII	17	13	20	15	16
				Σ	70

Obliczenie okresów rozwinięcia:

$$\text{tr}(\text{RII}) = \max\{3, 4, 14, 24, 7\} = 24$$

$$\text{tr}(\text{RIII}) = \max\{2, 2, 7, 19, 4\} = 19$$

$$\text{tr}(\text{RIV}) = \max\{4, 7, 16, 18, 11\} = 25$$

$$\text{tr}(\text{RV}) = \max\{2, 0, 14, 17, 2\} = 17$$

$$\text{Całkowity czas} \quad T = 155$$

Obliczenie wskaźników GMM.

- ETAP 1.

I	3	3	14	20	6	6	17
GMM 1 (132)							
	54		69		0		
	53		66		0		
	50		66		0		
	48		61		0		
	Σ-G		Σ-A		(Σ-G)-(Σ-A)		

II	2	4	10	23	4	7	13
GMM2(131)							
	54		69		0		
	53		66		0		
	52		66		0		
	48		61		0		
	Σ -G		Σ -A		$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)		

III	4	5	11	19	8	6	20
GMM 3 (134)							
	54		69		0		
	52		66		0		
	50		66		0		
	48		61		0		
	Σ -G		Σ -A		$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)		

IV	2	2	17	15	7	5	15
GMM 4 (129)							
	54		69		0		
	53		66		0		
	52		66		0		
	50		61		0		
	Σ -G		Σ -A		$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)		

V	4	3	12	22	5	8	16
GMM 5 (135)							
	53		69		0		

52	66	0
50	66	0
48	61	0
Σ -G	Σ -A	$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)

• ETAP 2.

IV	2	2	17	15	7	5	15	IV	I
I	3	3	14	20	6	6	17	2	3
GMM 1 (132)								17	14
		54	69			0		15	20
		53	66			0		7	6
		50	66			0		5	6
		Σ -G	Σ -A			$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)		15	17

$tr = \max\{ 2, 1, 15, 16, 3 \} = 16$

IV	2	2	17	15	7	5	15	IV	II
II	2	4	10	23	4	7	13	2	4
GMM 4.2 (136)								17	10
		54	69			0		15	23
		53	66			0		7	4
		52	66			0		5	7
		Σ -G	Σ -A			$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)		15	13

$tr = \max\{ 2, 2, 15, 20, 4 \} = 20$

IV	2	2	17	15	7	5	15	IV	III
III	4	5	11	19	8	6	20	2	5

GMM 4.3 (135)		
54	69	0
52	66	0
50	66	0
Σ -G	Σ -A	$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)

17	11
15	19
7	8
5	6
15	20

$$\text{tr} = \max\{2, 0, 12, 16, 4\} = 16$$

IV	2	2	17	15	7	5	15
V	4	3	12	22	5	8	16
GMM 1 (132)							
53		69		0			
52		66		0			
50		66		0			
Σ -G		Σ -A		$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)			

IV	V
2	4
2	3
17	12
15	22
7	5
5	8
15	16

$$\text{tr} = \max\{2, 0, 14, 17, 2\} = 17$$

- ETAP 3.

IV	2	2	17	15	7	5	15
I	3	3	14	20	6	6	17
II	2	4	10	23	4	7	13
GMM 4.1.2 (123)							
54		69		0			
53		66		0			
Σ -G		Σ -A		$(\Sigma$ -G)- $(\Sigma$ -A)			

IV	I	II
2	3	2
2	3	4
17	14	10
15	20	23
7	6	4
5	6	7
15	17	13

$$\text{trI} = \max\{ 2, 1, 15, 16, 3 \} = 16$$

$$\text{trII} = \max\{ 3, 4, 14, 24, 7 \} = 24$$

								IV	I	III
IV	2	2	17	15	7	5	15	2	3	4
I	3	3	14	20	6	6	17	2	3	5
III	4	5	11	19	8	6	20	17	14	11
GMM 4.1.3 (122)								15	20	19
		54	69		0			7	6	8
		50	66		0			5	6	6
		$\Sigma\text{-G}$	$\Sigma\text{-A}$		$(\Sigma\text{-G})-(\Sigma\text{-A})$			15	17	20

$$\text{trIII} = \max\{ 2, 1, 15, 16, 3 \} = 16$$

$$\text{trI} = \max\{ 3, 2, 11, 20, 7 \} = 20$$

								IV	I	V
IV	2	2	17	15	7	5	15	2	3	4
I	3	3	14	20	6	6	17	2	3	3
V	4	3	12	22	5	8	16	17	14	12
GMM 4.1.5 (124)								15	20	22
		53	69		0			7	6	5
		50	66		0			5	6	8
		$\Sigma\text{-G}$	$\Sigma\text{-A}$		$(\Sigma\text{-G})-(\Sigma\text{-A})$			15	17	16

$$\text{trIII} = \max\{ 2, 1, 15, 16, 3 \} = 16$$

$$\text{trI} = \max\{ 3, 2, 13, 21, 5 \} = 21$$

• ETAP 4.

	IV	I	III	II	V
RI	2	3	4	2	4
RII	2	3	5	4	3
RIII	17	14	11	10	12
RIV	15	20	19	23	22
RV	7	6	8	4	5
RVI	5	6	6	7	8
RVII	15	17	20	13	16
				Σ	70

$$\text{trI} = \max\{ 2, 1, 15, 16, 3 \} = 16$$

$$\text{trIII} = \max\{ 3, 2, 11, 20, 7 \} = 20$$

$$\text{trII} = \max\{ 4, 7, 14, 23, 8 \} = 23$$

$$\text{trIV} = \max\{ 2, 2, 9, 20, 2 \} = 20$$

$$T(I) = 149$$

	IV	I	III	V	II
RI	2	3	4	4	2
RII	2	3	5	3	4
RIII	17	14	11	12	10
RIV	15	20	19	22	23
RV	7	6	8	5	4
RVI	5	6	6	8	7
RVII	15	17	20	16	13
				Σ	63

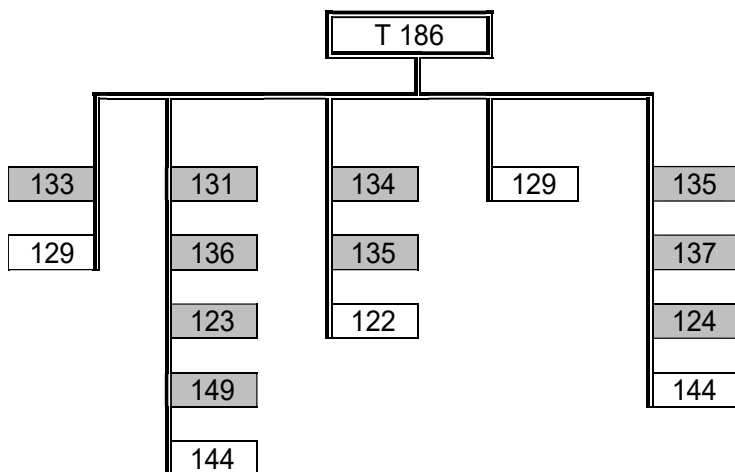
$$\text{trI} = \max\{ 2, 1, 15, 16, 3 \} = 16$$

$$\text{trIII} = \max\{ 3, 2, 11, 20, 7 \} = 20$$

$$\text{trV} = \max\{ 4, 5, 13, 20, 6 \} = 20$$

$$\text{trII} = \max\{ 4, 5, 13, 25, 7 \} = 25$$

$$T(I) = 144$$



Rys. 8.3. Drzewo wariantów dla metody TCM II

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano 144 jednostki, dla kolejności: IV, I, III, V, II. Dla kolejności wejściowej tj. I, II, III, IV, V, wynik 187, tj skrócenie o 22,9%.

8.5.3. Obliczenia cyklu wykonania robót budowlanych z zastosowaniem metody organizacji z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi TCM III

Obliczenie charakterystyk czasowych robót:

Tab. 8.5. Wyznaczenie maksymalnej sumy elementów w wierszach i kolumnach macierzy

										Σ				
0	3	3	6	6	20	20	40	40	46	46	52	52	69	
3		3		14		20		6		6		17		69
0	3	3	6	6	20	20	40	55	61	61	67	67	84	
3	5	6	10	20	30	40	63	63	67	67	74	74	87	
2		4		10		23		4		7		13		63
24	26	26	30	30	40	40	63	73	77	77	84	84	97	
5	9	10	15	30	41	63	82	82	90	90	96	96	116	
4		5		11		19		8		6		20		73
43	47	47	52	52	63	63	82	83	91	91	97	97	117	
9	11	15	17	41	58	82	97	97	104	104	109	116	131	
2		2		17		15		7		5		15		63
61	63	63	65	65	82	82	97	105	112	112	117	117	132	

11	15	17	20	58	70	97	119	119	124	124	132	132	148	70
4		3		12		22		5		8		16		
78	82	82	85	85	97	97	119	119	124	124	132	132	148	
Σ	15	17	64	max 99	30	32	81							

Cykl całkowity **T= 148**

Poszukiwanie kolejności wykonania robót na frontach roboczych:

	RI	RII	RIII	RIV	RV	RVI	RVII
I	3	3	14	20	6	6	17
II	2	4	10	23	4	7	13
III	4	5	11	19	8	6	20
IV	2	2	17	15	7	5	15
V	4	3	12	22	5	8	16

GMM 1 = 148

	A	B	C	D	E	F	G
II	2	4	10	23	4	7	13
I	3	3	14	20	6	6	17
III	4	5	11	19	8	6	20
IV	2	2	17	15	7	5	15
V	4	3	12	22	5	8	16

GMM 2 = 144

	A	B	C	D	E	F	G
III	4	5	11	19	8	6	20
I	3	3	14	20	6	6	17
II	2	4	10	23	4	7	13
IV	2	2	17	15	7	5	15
V	4	3	12	22	5	8	16

GMM 3 = 148

	A	B	C	D	E	F	G
IV	2	2	17	15	7	5	15
I	3	3	14	20	6	6	17
II	2	4	10	23	4	7	13
III	4	5	11	19	8	6	20
V	4	3	12	22	5	8	16

$$\text{GMM 4} = 149$$

	A	B	C	D	E	F	G
V	4	3	12	22	5	8	16
I	3	3	14	20	6	6	17
II	2	4	10	23	4	7	13
III	4	5	11	19	8	6	20
IV	2	2	17	15	7	5	15

$$\text{GMM 5} = 145$$

Ustalmy wiersz ostatni:

	A	B	C	D	E	F	G
II	2	4	10	23	4	7	13
V	4	3	12	22	5	8	16
IV	2	2	17	15	7	5	15
III	4	5	11	19	8	6	20
I	3	3	14	20	6	6	17

$$\text{GMM 2.1} = 144$$

	A	B	C	D	E	F	G
II	2	4	10	23	4	7	13
I	3	3	14	20	6	6	17
V	4	3	12	22	5	8	16
IV	2	2	17	15	7	5	15
III	4	5	11	19	8	6	20

$$\text{GMM 2.3} = 149$$

	A	B	C	D	E	F	G
II	2	4	10	23	4	7	13
III	4	5	11	19	8	6	20
I	3	3	14	20	6	6	17
V	4	3	12	22	5	8	16
IV	2	2	17	15	7	5	15

GMM 2.4 = 142

	A	B	C	D	E	F	G
II	2	4	10	23	4	7	13
IV	2	2	17	15	7	5	15
III	4	5	11	19	8	6	20
I	3	3	14	20	6	6	17
V	4	3	12	22	5	8	16

GMM 2.5 = 144

Ostateczna kolejność wierszy macierzy, II, III, I, V, IV:

	A	B	C	D	E	F	G
II	2	4	10	23	4	7	13
III	4	5	11	19	8	6	20
I	3	3	14	20	6	6	17
V	4	3	12	22	5	8	16
IV	2	2	17	15	7	5	15

GMM min = T = 144

W wyniku obliczeń uzyskano następujące wyniki: cykl realizacji dla zadanej kolejności wynosi 148 jednostek, po zastosowaniu algorytmu; 142 jednostki, tj. skrócono cykl o ~ 4%.

9. Zastosowanie metodyki TCM do analizy parametrów typu czas/koszt w systemach potokowych

Celem tej części opracowania jest wskazanie wybranych kierunków zastosowania metodyki TCM do rozwiązywania zagadnień harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych w systemach potokowych z zastosowaniem algorytmów metaheurystycznych (ewolucyjnych).

Opracowane metodyki TCM mogą być wykorzystane do przeprowadzania analiz optymalizacyjnych z zastosowaniem ograniczeń technologicznych, organizacyjnych w systemach potokowych, np. LSM – Linear Scheduling Model. Ponadto umożliwiają one uwzględnienie wpływu czynników losowych na przebieg robót budowlanych, np. metody CCS/BM. Jako kryterium optymalizacyjne przyjęto czas i koszt, w szczególności zbadano wpływ wielkości buforów czasu na zmianę kosztów.

9.1. Analiza buforów czasu w harmonogramowaniu procesów budowlanych z użyciem algorytmów ewolucyjnych

W rozdziale tym przedstawiono kierunki zastosowania metodyki TCM do rozwiązywania zagadnień harmonogramowaniu procesów budowlanych o charakterze ciągłym typu LSM – Linear Scheduling Model (odpowiednik graficzny TCM I). Przeprowadzono analizę możliwości zastosowania metody CCS/BM w harmonogramowaniu procesów budowlanych w systemie potokowym z uwzględnieniem czynnika kosztów. Zbadano znaczenie wpływu buforów czasu FB – buforów zasilających i projektowego – PB, na całkowity czas realizacji przedsięwzięcia TT oraz wpływ wielkości buforów czasu na zmianę kosztów. Punktem odniesienia jest konieczność finansowania nadwyżki (dodatkowy koszt) ponad dostępną w każdym dniu sumę otrzymanych transz. Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono z zastosowaniem hybrydowego algorytmu ewolucyjnego opracowanego przez: Bożejko, Wodecki 2005.

W szczególności, prezentowany jest problem planowania robót z uwzględnieniem buforów czasu oraz z zachowaniem ciągłości procesów. Przyjęto, w pierwszej części rozdziału, minimum czasu jako podstawowe kryterium wyboru wariantu organizacyjnego, (Zavadskas, Kaklauskas, Turkis 1997). Ponadto przedstawiono sposoby ustalania kolejności robót na działkach z wykorzystaniem sprzężeń czasowych (Afanasjev 1994, 2000, Hejducki 1999, 2000, 2001, Mrozowicz 1997, 1999, 2001).

Wśród wielu czynników mających wpływ na wielkość buforów czasu przedsięwzięcia, można wymienić następujące czynniki: zakłócenia dostaw materiałów i urządzeń, nierównomierne finansowe, błędy projektowe, zmienne

czynniki atmosferyczne, awarie sprzętu, niesprawność wykonawców, zakłócenia administracyjno-prawne i wiele innych.

W literaturze dotyczącej metodyki CCS/BM tj. łańcuchów krytycznych proponuje się wprowadzenie dodatkowych rezerw (buforów) znajdujących się zarówno na końcu drogi krytycznej przedsięwzięcia PB (*project buffer*) jak i poza nią, FB (*feeding buffer*).

Wykonawcy negocjując terminy wykonania zadań uwzględniają swoje bezpieczeństwo dotrzymania umownego terminu realizacji, poprzez intuicyjne wprowadzenie rezerw czasu (buforów) zarówno z uwzględnieniem swoich podwykonawców jak i dostawców. Proponowane arbitralne skracanie terminów dla poszczególnych uczestników procesu realizacji (np. o 50%, Goldratt), wydaje się podejściem bardzo subiektywnym i wymaga weryfikacji praktycznej. Wielu autorów próbuje sprowadzić zagadnienia losowe do deterministycznych, które następnie łatwo można wykorzystać w praktyce. Rozwiązania koncepcyjne i modelowe dla pojedynczych procesów są bogato przedstawione i analizowane (Połowski 2015).

9.1.1. Podstawowe założenia do obliczeń

Uwzględnienie przyjętych ograniczeń wymaga wykonania obliczeń w celu ustalenia wartości kluczowych harmonogramu takich jak: terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, wielkości sektorów (działek roboczych), liczby wykonawców, kolejności prac w sektorach, przebiegu ścieżki krytycznej, czasu wykonania zadania. Dopuszczalne są przestoje wykonawców oraz sytuacje kiedy w danym sektorze nie są prowadzone prace w sposób ciągły. Oczywiście ma to wpływ na całkowity czas wykonania zadania TT. Wprowadza się następujące oznaczenia stosowane w publikacjach zagranicznych jak w p. 4.2.

Oznaczenia przytoczono ponownie w celu łatwiejszego zrozumienia toku rozumowania.

- LT – (least time) najkrótszy czas pomiędzy procesem w toku a kolejnym procesem – najmniejszy dystans czasowy,
- LD – (least distance) najmniejsza odległość miejsca pomiędzy procesem w toku a kolejnym procesem,
- CPH – (controlling path) – droga krytyczna procesów budowlanych [dni],
- CL – (controlling link) ścieżka krytyczna – połączenie graficzne pomiędzy kolejnymi procesami,
- CP – (controlling point) punkt krytyczny odpowiadający rozpoczęciu kolejnego procesu,
- T – czas trwania procesu,
- TT – (time total) całkowity czas wykonania zadania,
- m – liczba procesów,
- n – liczba sektorów.

Poniżej przedstawiono założenia do obliczeń parametrów harmonogramów:

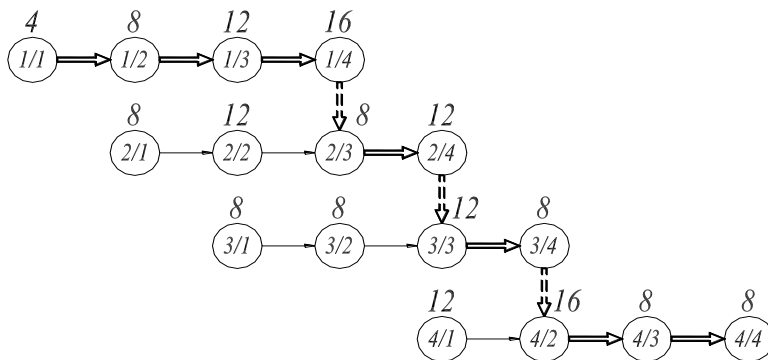
- Warunek I ciągłości procesów budowlanych dla każdego rodzaju (metoda sprzężeń czasowych TCM I).
 $LT1.1 \dots LTn.m = 0$
- Warunek II ciągłości procesów budowlanych w kolejności technologicznej, w sektorach (metoda sprzężeń czasowych TCM II).
 $LD1.1 \dots LDn.m = 0$
- Warunek III utworzenia minimalnej drogi krytycznej (metoda sprzężeń czasowych TCM III).
 $CPH = TT_{min}$

9.1.2. Analiza buforów czasu w systemie TCM

Poniżej przedstawiono schematy wybranych cyklogramów utworzonych na podstawie przykładowych danych liczbowych. Celem analizy było określenie wpływu buforów zasilających FB na czas trwania przedsięwzięcia TT. Analizę przeprowadzono dla dwóch przypadków usytuowania drogi krytycznej na cyklogramie: z uwzględnieniem skrajnych procesów początkowych oraz skrajnych procesów końcowych. Wiąże się to ze zmianą położenia buforów zasilających FB oraz przebiegu drogi krytycznej w nowym łańcuchu CC. W tabelach podano czasy trwania procesów w sektorach, w Tab. 9.1 dane wejściowe, w Tab. 9.2 oraz Tab. 9.3 zmodyfikowane wartości, z uwzględnieniem założeń obliczania buforów czasu wg metody E. Goldratta. Dla jasności wyводу, przedstawiono sieci zależności procesów z zaznaczeniem klasycznej drogi krytycznej, Rys. 9.1, 9.2 oraz łańcuchów krytycznych z buforami czasu FB i PB.

Tab. 9.1. Dane wejściowe

Sektor	Proces 1	Proces 2	Proces 3	Proces 4
1	4	8	8	12
2	8	12	8	16
3	12	8	12	8
4	16	12	8	8

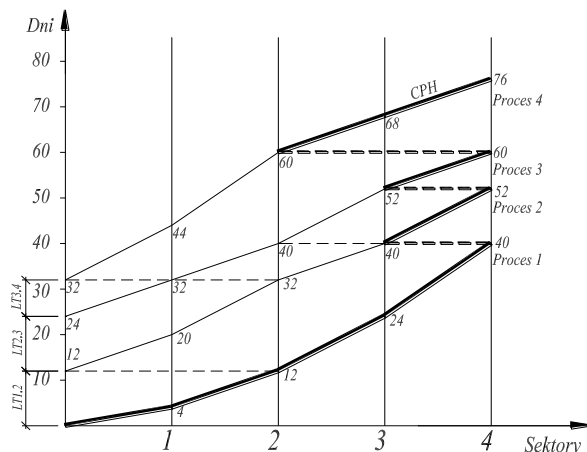


Rys. 9.1. Sieć zależności nr 1 dla danych wejściowych z Tab. 9.1

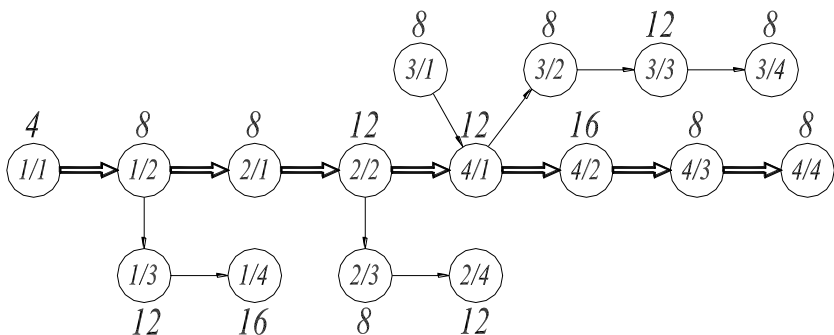
W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano czasy trwania poszczególnych prac w sektorach, które pozwoliły na zbudowanie cyklogramu wg. metody TCM.

Na Rys. 9.2 oraz 9.4 pojawiły się dwie drogi krytyczne łączące procesy początkowe oraz końcowe. Uwzględnienie warunku ciągłości procesów (TCM I) spowodowało że wielkości LT 1, LT 2, LT 3 zapewniają maksymalne zbliżenie procesów 1, 2, 3, 4. Analizując przebieg procesów i tworząc drogę krytyczną CPH można zauważyć, że minimalny czas realizacji przedsięwzięcia TT uzyskuje się w wyniku sumowania odpowiednich czasów trwania procesów w sektorach, które mogą utworzyć dwie niezależne drogi krytyczne CPH I i CPH II.

Schematy i przebieg dróg krytycznych pokazano na Rys. 9.2 i 9.4.

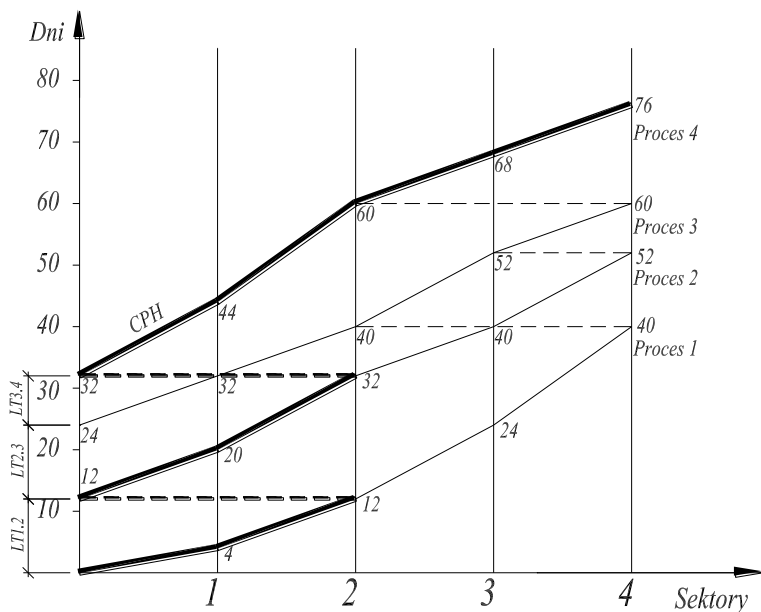


Rys. 9.2. Cyklogram z wariantem drogi krytycznej CPH I



Rys. 9.3. Sieć zależności nr 2 dla danych wejściowych z Tab. 9.1

Na Rys. 9.1 i 9.3 przedstawiono w układzie sieci zależności, drogi krytyczne dla dwóch wariantów ich przebiegu. Analizując układ procesów zauważyć można, że właściwie z uwagi na przyjęte ograniczenia (warunek I, TCM I) wszystkie procesy wykonywane w sektorach mają charakter procesów krytycznych, mimo że nie znajdują się na drodze krytycznej. Uwzględniony warunek ciągłości wykonania procesów (TCM I) powoduje, że wydłużenie czasu trwania jakiegokolwiek z nich wpływa na całkowity czas realizacji TT.

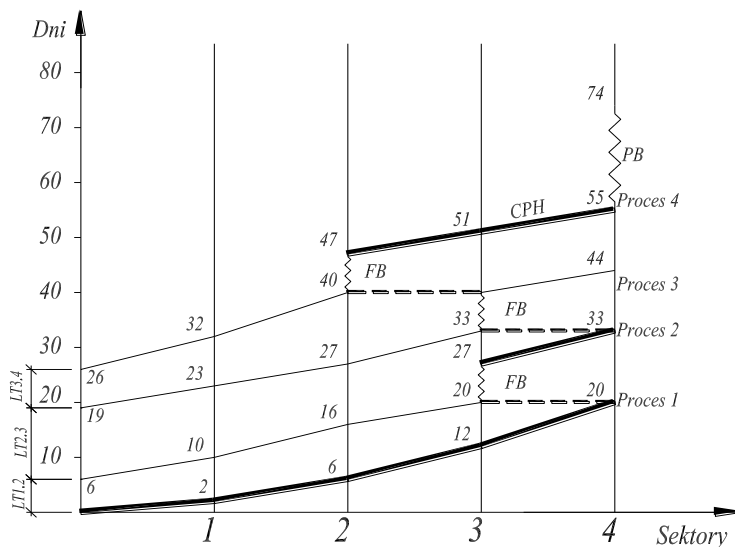


Rys. 9.4. Cyklogram z wariantem drogi krytycznej CPH II

Tab. 9.2. Dane liczbowe zmodyfikowane wg. Metody Goldratta

Sektor	P1	FB1	P2	FB2	P3	FB3	P4	FB4	PB
1	2	0	4	0	4	0	6	0	0
2	4	0	6	0	4	0	8	7	0
3	6	0	4	7	6	7	4	0	0
4	8	0	6	0	4	0	4	0	19

W Tab. 9.2 przedstawiono zmodyfikowane dane czasów trwania procesów z uwzględnieniem metody Goldratta. Wprowadzono wartości buforów zasilających FB i projekty PB dla ciągu procesów i drogi krytycznej. Obliczenia przeprowadzono z zastosowaniem programu komputerowego a uzyskane wyniki przedstawiono na Rys. 9.5. Analizując cyklogram zauważyć można, że bufony zasilające weszły w skład łańcucha krytycznego. Wpływając bezpośrednio na czas trwania przedsięwzięcia i TT. Uzyskano całkowity czas realizacji TT = 74 jednostki, pomimo skrócenia poszczególnych czasów trwania procesów o połowę i zamiany zredukowanych czasów buforem o wymiarze 25%. Nie spowodowało to proporcjonalnego skrócenia całego przedsięwzięcia o tę wartość. Czas całkowity TT uległ nieznacznemu skróceniu z 76 jednostek do 74.

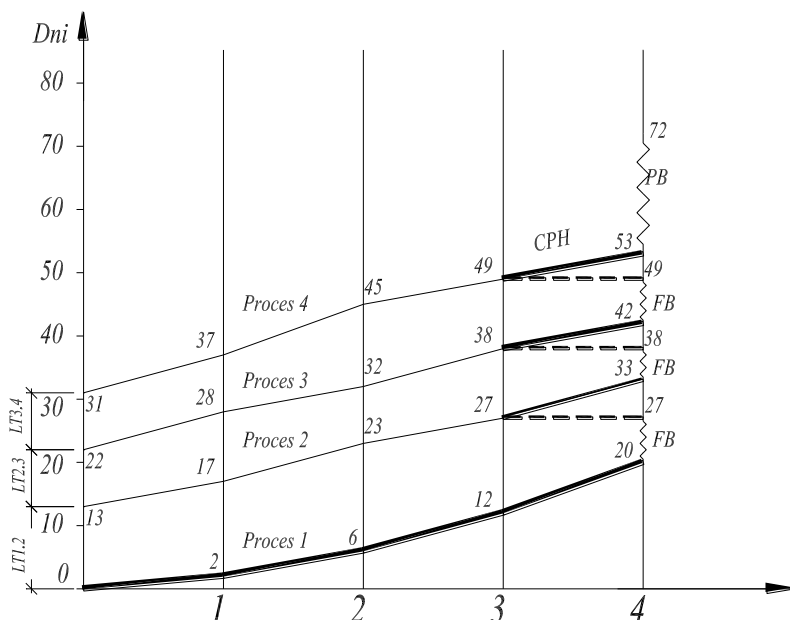


Rys. 9.5. Cyklogram z łańcuchem krytycznym i buforami czasu CPH I

Na podstawie wariantu z drogą krytyczną, Rys. 9.5, utworzoną z procesów końcowych sporządzono Tab. 9.3, w której wprowadzono dane liczbowe (czasy trwania procesów w sektorach)zmodyfikowane wg. metody Goldratta. Wartości liczbowe buforów zasilających FB umieszczono na końcach ciągów poszczególnych procesów. Na podstawie analizy zbudowanego cyklogramu Rys. 9.5 zawierającego wyniki obliczeń komputerowych z zachowaniem ciągłości procesów (TCM I) zauważyć można, że bufony zasilające znalazły się w łańcuchu krytycznym procesów i drodze krytycznej, mając bezpośredni wpływ na czas trwania przedsięwzięcia $TT = 72$ jednostki. Bufory zasilające FB mają charakter procesów i tak są traktowane w obliczeniach. Zmniejszenie ich wymiarów ma wpływ na skrócenie czasu trwania przedsięwzięcia.

Tab. 9.3. Dane liczbowe zmodyfikowane wg metody Goldratta – wartości FB dla drogi krytycznej

Sektor	P1	FB1	P2	FB2	P3	FB3	P4	FB4	PB
1	2	0	4	0	4	2	6	0	
2	4	0	6	0	4	0	8	0	
3	6	0	4	0	6	0	4	0	
4	8	7	6	5	4	7	4	0	19



Rys. 9.6. Cyklogram z łańcuchem krytycznym i buforami czasu CPH II

9.1.3. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza oraz wykonane obliczenia potwierdzają twierdzenie, że skrócenie czasu trwania poszczególnych procesów nie powoduje skrócenia całkowitego czasu trwania przedsięwzięcia z uwzględnieniem buforów o wartości 25% T, jako uzyskanego zapasu czasu. Jest to zbyt uproszczenie i być może słuszne dla procesów sekwencyjnych. Czas trwania przedsięwzięcia zależy od wyboru składowych łańcucha krytycznego. Analizując modele graficzne – cyklogramy budowane wg metodyki LSM – Linear Scheduling Model, można zauważyć, że przyjęcie łańcucha krytycznego jak najbardziej zbliżonego do prawej krawędzi wykresu powoduje skrócenie czasu trwania przedsięwzięcia. W cyklogramach istnieje ponadto konieczność traktowania buforów zasilających FB i projektowego PB jako osobnych procesów, ze względu na warunek zachowania ciągłości pracy grup roboczych i uniknięcia strat finansowych związanych z niepotrzebnymi przestojami. Stosując algorytmy szeregowania zadań istnieje możliwość skrócenia czasu trwania przedsięwzięcia poprzez zmianę kolejności wykonywania prac w poszczególnych sektorach, pod warunkiem niezależności i dostępności sektorów robót. W zależności od jednostkowego kwantyfikowanego ryzyka danego procesu istnieje możliwość przyjmowania zróżnicowanych wielkości buforów zasilających FB i projektowego PB. Zapewnią one wówczas uwzględnienie szczególnych uwarunkowań technicznych zróżnicowanych procesów budowlanych, lokalnych ograniczeń wykonawczych i czynników ryzyka. Sformułowano wnioski potwierdzające, brak bezpośredniego, pełnego wpływu buforów zasilających FB, na czas trwania przedsięwzięcia.

9.2. Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w badaniu zależności czasu i kosztu wykorzystywania sumarycznego buforu czasu łańcucha krytycznego

Jednym ze sposobów redukcji ryzyka przekroczenia terminu i kosztu umownego realizacji kontraktu budowlanego może być zarządzanie projektami (przedsięwzięciami) metodą łańcucha krytycznego (CCS/BM). Istota tej metody oparta jest na własnościach rozkładu prawdopodobieństwa zgodnie z którymi wariancja sumy jest pierwiastkiem sumy wariancji każdego składnika tej sumy, zatem pierwiastek sumy kwadratów jest mniejszy niż suma tych liczb. Wykorzystując centralne twierdzenie graniczne, oraz wariancję statystyczną, można oszacować wielkość rezerw czasu, a menadżer projektu (przedsięwzięcia budowlanego) może zarządzać nie pojedynczymi procesami budowlanymi a sekwencjami robót, bazując na własnościach statystycznych dotyczących ciągów procesów zależnych. Wprowadzono więc pojęcie buforu, który może pełnić różne funkcje, np.: jako bufor projektu, zasobów, sekwencji, bufory kosztowe, ograniczeń i inne.

Ważnym narzędziem zarządzania może być bufor projektu (przedsięwzięcia). Umieszcza się go na końcu łańcucha krytycznego, jako zabezpieczenie terminu realizacji całego przedsięwzięcia (PB – project buffer). Menadżer projektu zarządza buforami podejmując działania korygujące na podstawie wielkości pojawiających się opóźnień, wg zasad metodyki CCS/BM. W praktyce budowlanej bywają sytuacje, kiedy na nieprzekraczalnym terminie zakończenia budowy zależy nam szczególnie, a przekroczenie terminu związane jest z wysokimi karami finansowymi. Zwyczajowo jest to 0,1% wartości kontraktu za każdy dzień zwłoki, choć bywają również wyższe wartości (np.: 0,2%), lecz sumarycznie nie więcej niż 15%. Koszty realizacji harmonogramu związane są często ze stopniem niedotrzymania ustalonego terminu. Wprowadza się więc miary jakości, takie jak (Pawlak 1999), np.: średnie opóźnienie L , maksymalne opóźnienie L_{\max} . Podobnie, niekorzystne zjawisko dotyczy wyprzedzania terminów prac i jest związane z dodatkowymi kosztami. Całkowity koszt harmonogramu może być określany następująco (Pawlak 1999):

$$\sum_{i=1}^n [KE \cdot E(i) + KT \cdot T(i)], \quad (9.1)$$

gdzie:

KE, KT – współczynniki kosztów za wyprzedzanie i opóźnianie,

$E(i) = \max \{0, b(i) - s(i)\}$, jest to „wyprzedzenie” pracy „ i ”,

$T(i) = \max \{0, s(i) - b(i)\}$, jest to „opóźnienie” pracy „ i ”,

$b(i)$ – najlepszy termin rozpoczęcia pracy „ i ”,

$s(i)$ – zaplanowany w harmonogramie moment rozpoczęcia pracy „ i ”.

Pojawia się zatem problem dodatkowych kosztów zarówno wyprzedzenia jak i opóźnienia realizacji przedsięwzięcia budowlanego. W pracy podjęto próbę analizy kosztów realizacji projektu (przedsięwzięcia budowlanego), z uwzględnieniem buforów czasu wg. Metodyki CCS/BM (łańcucha krytycznego).

Teoria Ograniczeń (Theory of Constraints TOC) Goldratta 1997, 2000 i jej praktyczne zastosowanie w zarządzaniu przedsięwzięciami znane jako harmonogramowanie metodą łańcucha krytycznego (Critical Chain Scheduling CCS) i zarządzanie buforami (Buffer Management BM), w skrócie określane jako metoda CCS/BM, znajduje się obecnie w centrum zainteresowania wielu zespołów naukowych. Sporządzanie i sterowanie harmonogramami jest jednym z podstawowych celów zarządzania przedsięwzięciem budowlanym. Wysoki stopień uproszczenia systemów CPM i PERT doprowadził do ich upowszechnienia i szerokiego stosowania na całym świecie. Zmieniające się standardy, coraz większe wymagania dotyczące czasu wykonania, minimalizacji kosztów, kar umownych, wielkości przedsięwzięć inwestycyjnych, jednoznaczności i jasności sformułowań doprowadziły do podjęcia szeregu prac mających na celu

zwiększenie efektywności harmonogramowania w odniesieniu do tradycyjnych metod CPM/PERT.

9.2.1. Sformułowanie problemu

W warunkach zagrożenia terminu realizacji przedsięwzięcia budowlanego i wykorzystywania buforu projektu (przedsięwzięcia budowlanego), pojawia się zagadnienie zależności czasu i dodatkowych kosztów. Problem optymalizacyjny dotyczy minimalizacji dodatkowych kosztów w odniesieniu do przyjętej funkcji celu. Zagadnienie dotyczy możliwości zbadania zależności czasu i kosztu, w celu określenia momentu czasu od którego zaczynają wzrastać dodatkowe koszty wykorzystania sumarycznego buforu czasu. Do obliczeń przyjęto funkcję celu z pracy (Bożejko, Hejducki 2007).

Funkcja celu:

Założmy, że wykonujemy roboty zadane permutacją. Roboty finansujemy kredytem wysokości D , dostępnym w transzach. Wartość funkcji celu odpowiadającej finansowaniu nadwyżki (dodatkowy koszt) ponad dostępną w każdym dniu kwotę sumy otrzymanych transz:

$$f(\pi) = \sum \max\{0, c_\pi(i) - t(i)\}, \quad (9.2)$$

gdzie:

$f(\pi)$ – funkcja celu,

$c_\pi(i)$ – sumaryczny koszt robót w dniu $i=1,2,\dots,T$ przy założeniu kolejności robót zadanych permutacją,

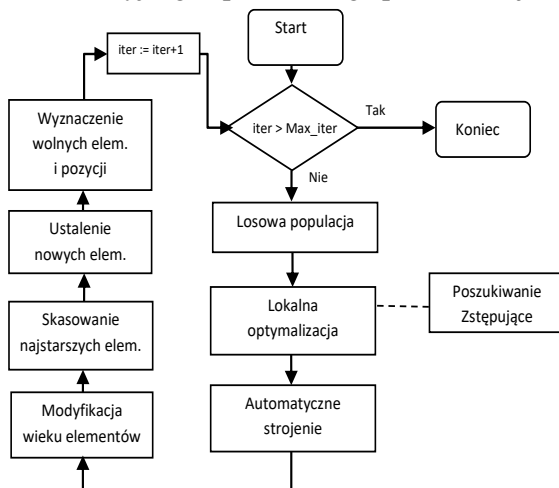
$t(i)$ – wartość transzy w dniu $i=1,2,\dots,T$, np. przy podziale kredytu na kwotę D na cztery równe transze:

$$t(i) = \begin{cases} 0 & \text{dla } i < \frac{T}{4} \\ \frac{D}{4} & \text{dla } \frac{T}{4} \leq i < \frac{2T}{4} \\ \frac{2D}{4} & \text{dla } \frac{2T}{4} \leq i < \frac{3T}{4} \\ \frac{3D}{4} & \text{dla } i \geq \frac{3T}{4} \end{cases}, \quad (9.3)$$

9.2.2. Eksperyment obliczeniowy

Celem przeprowadzonych obliczeń jest zbadanie wpływu wielkości buforów czasu na wzrost dodatkowych kosztów. Punktem odniesienia jest konieczność finansowania nadwyżki (dodatkowy koszt) ponad dostępną w każdym dniu kwotę

sumy otrzymanych transz. Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono z zastosowaniem algorytmu ewolucyjnego opracowanego przez: Bożejko, Wodecki 2005.



Rys. 9.7. Schemat hybrydowego algorytmu ewolucyjnego (Bożejko, Wodecki 2005).

9.2.3. Podstawowe założenia

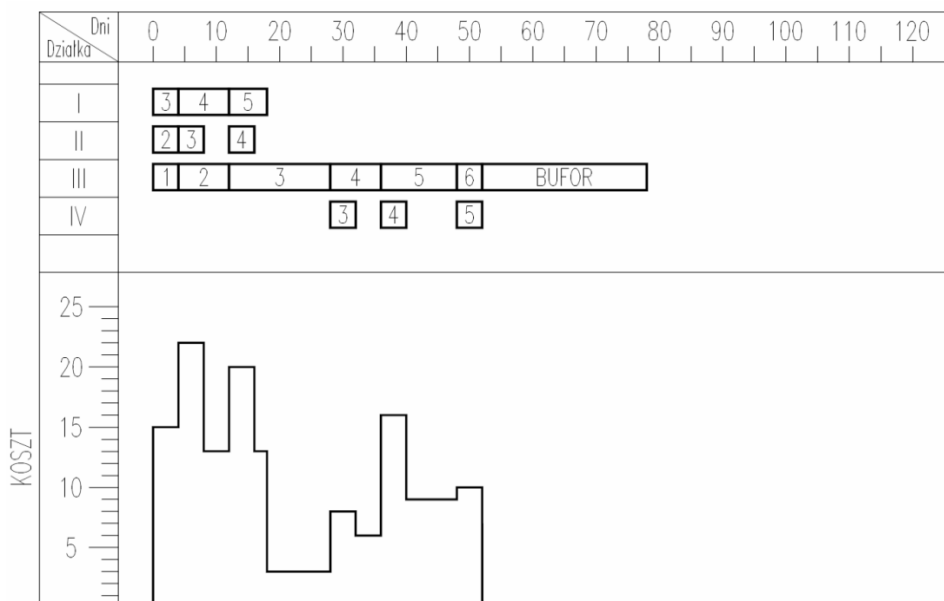
Dane liczbowe niezbędne do przeprowadzenia obliczeń optymalizacyjnych zamieszczono w Tab. 9.4, (przyjęto za pracę Rogalska, Bożejko, Hejducki 2006).

Tab. 9.4. Przykładowe dane liczbowe

Nr procesu	Czas trwania	Najwcześniejszy termin rozpoczęcia	Najwcześniejszy termin zakończenia	Najpóźniejszy termin rozpoczęcia	Najpóźniejszy termin zakończenia	Jednostki kosztów
1	4	0	4	0	4	2
2	8	4	12	4	12	5
3	16	12	28	12	28	8
4	8	28	36	28	36	6
5	12	36	48	36	48	5
6	4	48	52	48	52	4
PB	26	52	78	52	78	0
7	4	12	16	16	20	6

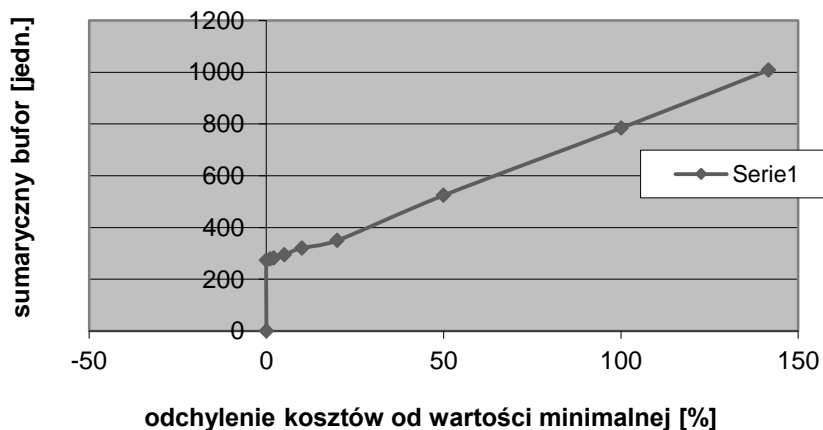
8	4	16	20	20	24	7
FB	4	20	24	24	28	0
9	4	4	8	18	22	8
10	8	8	16	22	30	10
FB	6	16	22	30	36	0
11	4	28	32	40	44	6
12	4	32	36	44	48	6
FB	4	36	40	48	52	0

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń optymalizacyjnych z zastosowaniem programu komputerowego opracowanego przez W. Bożejkę i M. Wodeckiego. Program bazuje na zmodyfikowanym algorytmie ewolucyjnym. Na wykresach zamieszczonych poniżej przedstawiono wyniki obliczeń. Sformułowana funkcja celu wyraża ograniczenia i pozwala określić najlepsze rozwiązanie w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych. Przedstawione zagadnienie należy do klasy problemów o dużej złożoności obliczeniowej.



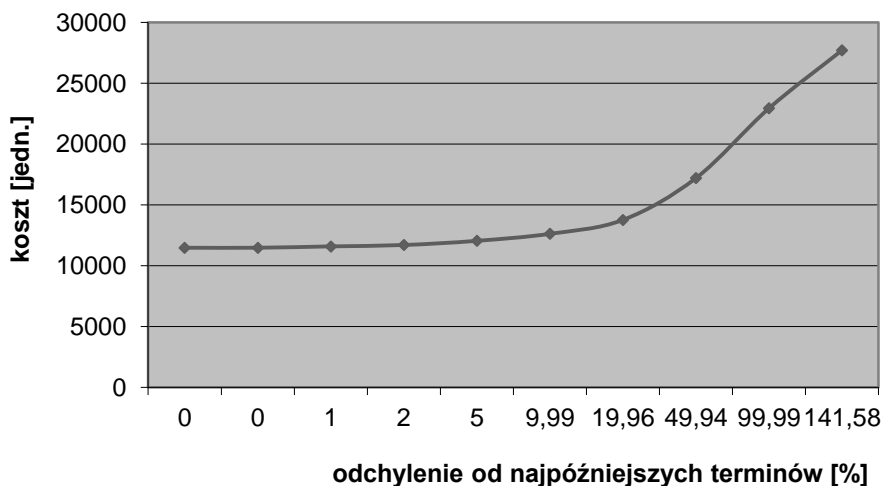
Rys. 9.8. Wykres Gantta dla najwcześniejszych terminów robót (rysunek Podolski 2006)

Zależność buforu czasu od odchylenia od najpóźniejszych terminów



Rys. 9.9. Zależność kosztów od wielkości sumarycznego buforu czasu

Zależność kosztów od odchylenia od najpóźniejszych terminów



Rys. 9.10 Zależność kosztów od odchylenia od najpóźniejszych terminów

9.2.4. Podsumowanie

Przedstawione zagadnienie jest kontynuacją tematyki zaprezentowanej w pracy (Hejducki, Rogalska 2011). Dotyczy możliwości badania zależności czasu i kosztu, w celu określenia momentu czasu od którego zaczynają wzrastać dodatkowe koszty wykorzystania sumarycznego buforu czasu. Okazuje się na podstawie przeprowadzonego eksperymentu obliczeniowego, że istnieje moment czasowy kiedy wykorzystanie rezerwy czasu zaczyna bezpośrednio wpływać na wzrost kosztów. Na wykresach zamieszczonych powyżej przedstawiono wyniki obliczeń. Narzędziem umożliwiającym przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych jest opracowany przez W. Bożejkę i M. Wodeckiego program komputerowy bazujący na zmodyfikowanym algorytmie ewolucyjnym (hybrydowym algorytmie ewolucyjnym HEA).

10. Harmonogramowanie procesów budowlanych z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych i aplikacji MS EXCEL

Jedną z ważniejszych możliwości programu Microsoft Excel jest obsługa skryptów pisanych w języku *Visual Basic for Applications*. Stwarza to wiele możliwości użytkownikom tego narzędzia. Makra (tak nazywają się skrypty VBA w Microsoft Excel) pozwalają na stosowanie w obliczeniach bardziej skomplikowanych algorytmów, oraz automatyzację pewnych procesów.

Dodatek Solver należy do zestawu poleceń – narzędzi analizy typu „co – jeśli”, czyli procesu zmiany wartości poszczególnych komórek arkusza dla sprawdzenia wpływu tych zmian na końcowe wyniki. Pozwala on na znalezienie optymalnej wartości zmiennej lub odnalezienie niewiadomej przy znacznym stopniu skomplikowania obliczeń.

Microsoft Excel Solver korzysta z aplikacji nieliniowej optymalizacji *Generalized Reduced Gradient (GRG2)*, opracowanej przez Leona Lasdon z uniwersytetu University of Texas w Austin oraz Allana Warrena z uniwersytetu Cleveland State University. Przy problemach całkowitych oraz liniowych wykorzystywana jest tu metoda simpleks z ograniczeniami dla zmiennych, a także metodę „branch-and-bound” zaimplementowaną przez Johna Watsona i Dana Fylstra z firmy Frontline Systems Inc. W roku 1989 oraz w latach 1990–1995 kod dodatku został w pewnej części zastrzeżony przez firmy Optimal Methods, Inc oraz Frontline Systems Inc.

10.1. Aplikacja MS EXCEL

Głównym celem stworzenia aplikacji było opracowanie narzędzia pozwalającego, w szybki sposób, na wykonanie harmonogramów z wykorzystaniem metod TCM I, TCM II oraz TCM III. Jako środowisko tworzenia aplikacji wybrano powszechnie znany i dostępny program MS Excel, który ma charakter arkusza kalkulacyjnego. Powodem takiego wyboru jest duża popularność programu, prostota obsługi oraz duże możliwości, które daje obsługa skryptów VBA oraz dodatek Solver. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność posiadania kompatybilnej wersji programu Microsoft Excel w celu utworzenia przygotowanego arkusza kalkulacyjnego.

W ramach niniejszej pracy, stworzona została aplikacja, która na podstawie czasów trwania poszczególnych procesów oraz ustalonej kolejności działań roboczych wyznacza harmonogramy z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych. Dla każdego rodzaju harmonogramu wyznaczane są najwcześniejsze oraz najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót i odpowiadające im cyklogramy. Dodatkową funkcjonalnością jest wykonywanie ww. harmonogramów wzbogaconych o metodę łańcucha krytycznego Goldratta. Poza tym

aplikacja umożliwia szybkie wyznaczenie kolejności działek roboczych dla najkrótszego oraz najdłuższego możliwego czasu trwania przedsięwzięcia.

Głównymi ograniczeniami aplikacji są liczby działek roboczych oraz procesów jakie można wprowadzić do obliczeń. Program pozwala na wyznaczenie harmonogramów dla projektów o maksymalnie dziesięciu działkach roboczych i takiej samej liczby zadań.

Aby program mógł pracować poprawnie konieczne jest włączenie obsługi makr w programie MS Excel. W tym celu w opcjach programu należy wybrać zakładkę „Centrum zaufania”, kliknąć „Ustawienia Centrum zaufania...” i zaznaczyć w Ustawieniach makr „Włącz wszystkie makra”. Wybór należy potwierdzić przyciskiem „OK”

Wykonana aplikacja wymaga jako danych wejściowych wyznaczonych wcześniej czasów procesów oraz kolejności poszczególnych procesów na każdej z działek roboczych. W Tab. 10.1 przedstawiono schemat tabeli danych wejściowych.

Tab. 10.1. Oznaczenia czasów trwania procesów budowlanych

Działka robocza	Czas trwania procesu 1	Czas trwania procesu 2	...	Czas trwania procesu (j-1)	Czas trwania procesu j	Czas trwania procesu (j+1)	...	Czas trwania procesu m
Działka 1	T_{11}	T_{21}	...	$T_{(j-1)1}$	T_{j1}	$T_{(j+1)1}$	...	T_{m1}
Działka 2	T_{12}	T_{22}	...	$T_{(j-1)2}$	T_{j2}	$T_{(j+1)2}$	...	T_{m2}
...
Działka (k-1)	$T_{1(k-1)}$	$T_{2(k-1)}$	...	$T_{(j-1)(k-1)}$	$T_{j(k-1)}$	$T_{(j+1)(k-1)}$	...	$T_{m(k-1)}$
Działka k	T_{1k}	T_{2k}	...	$T_{(j-1)k}$	T_{jk}	$T_{(j+1)k}$	...	T_{mk}
Działka (k+1)	$T_{1(k+1)}$	$T_{2(k+1)}$	...	$T_{(j-1)(k+1)}$	$T_{j(k+1)}$	$T_{(j+1)(k+1)}$	...	$T_{m(k+1)}$
...
Działka n	T_{1n}	T_{2n}	...	$T_{(j-1)n}$	T_{jn}	$T_{(j+1)n}$	...	T_{mn}

Celem zwiększenia czytelności obliczonego harmonogramu, poszczególne zadania zostały przedstawione w postaci sekcji zawierających czas trwania procesu, najwcześniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia, najpóźniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia oraz oznaczenie, że dany proces znajduje się na możliwej ścieżce krytycznej. Schemat rozmieszczenia danych w sekcji przedstawia Tab. 10.2.

Tab. 10.2. Schemat rozmieszczenia danych w sekcjach zadań harmonogramu

Najwcześniejszy termin rozpoczęcia		Najwcześniejszy termin zakończenia
	Czas trwania procesu	
Najpóźniejszy termin rozpoczęcia	Oznaczenie ścieżki krytycznej – „KRT”	Najpóźniejszy termin zakończenia

Podobnie zostały przedstawione bufony czasowe w harmonogramach z łańcuchem krytycznym Goldratta. Tab. 10.3 przedstawia rozmieszczenie danych w tym przypadku.

Tab. 10.3. Schemat rozmieszczenia danych w sekcjach buforów harmonogramu

Najwcześniejszy termin rozpoczęcia		Najwcześniejszy termin zakończenia
	Czas trwania buforu	
Najpóźniejszy termin rozpoczęcia		Najpóźniejszy termin zakończenia

10.2. Algorytmy obliczeń z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych TCM

Poniżej przedstawione zostały algorytmy obliczeń wykorzystanych w celu wyznaczenia harmonogramu TCM. Komórki tabel zawierają ogólne wzory do obliczeń.

10.2.1. Algorytmy obliczeń TCM I

Specyfika TCM I wymaga osobnego wyznaczenia terminów najwcześniejszego rozpoczęcia robót przez danego wykonawcę. Zostało to zrobione poprzez obliczenie iteracji dla poszczególnych procesów. Sumy maksymalnych iteracji wskazują na najszybszy możliwy termin rozpoczęcia prac przez następnego wykonawcę. Tab. 10.4 przedstawia metodykę obliczania iteracji oraz terminów rozpoczęcia dla TCM I.

Wynikowy harmonogram stanowią tabele przedstawiające najwcześniejsze oraz najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia prac. Na ich podstawie sporządzone zostały cyklogramy ilustrujące przebiegi prac w poszczególnych sektorach. Algorytmy pozwalające obliczyć parametry TCM I zostały pokazane w Tab. 10.4 oraz 10.5.

Tab. 10.4. Wzory do obliczania iteracji dla TCM I

Działki robocze	Iteracje 1;2	Iteracje 2;3	Iteracje $j;(j+1)$	Iteracje $(n-1);n$
Działka 1	$I_{11}=T_{11}$	$I_{21}=T_{21}$	$I_{j1}=T_{j1}$	$I_{(n-1)1}=T_{(n-1)1}$
Działka 2	$I_{12}=\frac{I_{11}}{T_{11}+T_{12}-T_{21}}$	$I_{22}=\frac{I_{21}}{T_{11}+T_{12}-T_{21}}$	$I_{j2}=\frac{I_{j1}}{T_{j1}+T_{j2}-T_{(j+1)1}}$	$I_{(n-1)2}=\frac{I_{(n-1)1}}{T_{(n-1)1}+T_{(n-1)2}-T_{n1}}$

Działka k	$I_{1k}=\frac{I_{11}}{\sum_{i=1}^k T_{1i}} - \frac{I_{11}}{\sum_{i=1}^{k-1} T_{2i}}$	$I_{2k}=\frac{I_{21}}{\sum_{i=1}^k T_{2i}} - \frac{I_{21}}{\sum_{i=1}^{k-1} T_{3i}}$	$I_{jk}=\frac{I_{j1}}{\sum_{i=1}^k T_{ji}} - \frac{I_{j1}}{\sum_{i=1}^{k-1} T_{(j+1)i}}$	$I_{(n-1)k}=\frac{I_{(n-1)1}}{\sum_{i=1}^k T_{(n-1)i}} - \frac{I_{(n-1)1}}{\sum_{i=1}^{k-1} T_{(j+2)i}}$

Działka n	$I_{1n}=\frac{I_{11}}{\sum_{i=1}^n T_{1i}} - \frac{I_{11}}{\sum_{i=1}^{n-1} T_{2i}}$	$I_{2n}=\frac{I_{21}}{\sum_{i=1}^n T_{2i}} - \frac{I_{21}}{\sum_{i=1}^{n-1} T_{3i}}$	$I_{jn}=\frac{I_{j1}}{\sum_{i=1}^n T_{ji}} - \frac{I_{j1}}{\sum_{i=1}^{n-1} T_{2i}}$	$I_{(n-1)n}=\frac{I_{(n-1)1}}{\sum_{i=1}^n T_{(n-1)i}} - \frac{I_{(n-1)1}}{\sum_{i=1}^{n-1} T_{(j+2)i}}$
Wartości maksymalne iteracji	$I_{\max 1}=\max I_{1i}$	$I_{\max 2}=\max I_{2i}$	$I_{\max j}=\max I_{ji}$	$I_{\max (n-1)}=\max I_{mi}$
Czasy rozpoczęcia prac przez brygady	$Twr_{21}=I_{\max 1}$	$Twr_{31}=\frac{I_{\max 2}}{I_{\max 2}+I_{\max 2}}$	$Twr_{(j+1)1}=\frac{I_{\max j}}{\sum_{i=1}^j I_{\max i}}$	$Twr_{n1}=\frac{I_{\max (n-1)}}{\sum_{i=1}^{n-1} I_{\max i}}$

Tab. 10.5. Wzory do obliczania najwcześniejszych terminów rozpoczęcia oraz zakończenia prac dla TCM I

Brygady	Termin rozpoczęcia procesu na działce 1	Termin zakończenia procesu na działce 1	Termin rozpoczęcia procesu na działce 2	Termin zakończenia procesu na działce 2	Termin rozpoczęcia procesu na działce k	Termin zakończenia procesu na działce k	Termin rozpoczęcia procesu na działce n	Termin zakończenia procesu na działce n
Brygada 1	$T_{wr11} = 0$	$T_{wz11} = T_{wr11} + T_{11}$	$T_{wr12} = T_{wz11}$	$T_{wz12} = T_{wr12} + T_{12}$	$T_{wr1k} = T_{wz1(k-1)}$	$T_{wz1k} = T_{wr1k} + T_{1k}$	$T_{wr1n} = T_{wz1(n-1)}$	$T_{wz1n} = T_{wr1n} + T_{1n}$
Brygada 2	T_{wr21}	$T_{wz21} = T_{wr21} + T_{21}$	$T_{wr22} = \text{MAX}(T_{wz21}; T_{wz12})$	$T_{wz22} = T_{wr22} + T_{22}$	$T_{wr2k} = \text{MAX}(T_{wz1k}; T_{wz2(k-1)})$	$T_{wz2k} = T_{wr2k} + T_{2k}$	$T_{wr2n} = \text{MAX}(T_{wz1n}; T_{wz2(n-1)})$	$T_{wz2n} = T_{wr2n} + T_{2n}$
...
Brygada j	T_{wrj1}	$T_{wzj1} = T_{wrj1} + T_{j1}$	$T_{wrj2} = \text{MAX}(T_{wz(j-1)2}; T_{wzj1})$	$T_{wzj2} = T_{wrj2} + T_{j2}$	$T_{wrjk} = \text{MAX}(T_{wz(j-1)k}; T_{wzj(k-1)})$	$T_{wzjk} = T_{wrjk} + T_{jk}$	$T_{wrjn} = \text{MAX}(T_{wz(j-1)n}; T_{wzj(n-1)})$	$T_{wzjn} = T_{wrjn} + T_{jn}$
...
Brygada m	T_{wrm1}	$T_{wzm1} = T_{wrm1} + T_{m1}$	$T_{wrm2} = \text{MAX}(T_{wz(m-1)2}; T_{wzm1})$	$T_{wzm2} = T_{wrm2} + T_{m2}$	$T_{wrmk} = \text{MAX}(T_{wz(m-1)k}; T_{wzm(k-1)})$	$T_{wzmk} = T_{wrmk} + T_{mk}$	$T_{wrmn} = \text{MAX}(T_{wz(m-1)n}; T_{wzm(n-1)})$	$T_{wzmn} = T_{wrmn} + T_{mn}$

Tab. 10.6. Wzory do obliczania najpóźniejszych terminów rozpoczęcia oraz zakończenia prac dla TCM I

Brygady	Termin rozpoczęcia procesu na działce 1	Termin zakończenia procesu na działce 1	Termin rozpoczęcia procesu na działce 2	Termin zakończenia procesu na działce 2	Termin rozpoczęcia procesu na działce k	Termin zakończenia procesu na działce k	Termin rozpoczęcia procesu na działce n	Termin zakończenia procesu na działce k
Brygada 1	$Tpr_{11} =$ $Tpz_{11} - T_{11}$	$Tpz_{11} =$ MIN ($Tpr_{21};$ Tpr_{12})	$Tpr_{12} =$ $Tpz_{12} - T_{12}$	$Tpz_{12} =$ MIN ($Tpr_{22};$ Tpr_{13})	$Tpr_{1k} =$ $Tpz_{1k} - T_{1k}$	$Tpz_{k1} =$ MIN ($Tpr_{2k};$ $Tpr_{1(k+1)}$)	$Tpr_{1n} =$ $Tpz_{1n} - T_{1n}$	$Tpz_{1n} =$ TWz_{1n}
Brygada 2	$Tpr_{21} =$ $Tpz_{21} - T_{21}$	$Tpz_{21} =$ MIN ($Tpr_{32};$ Tpr_{21})	$Tpr_{22} =$ $Tpz_{22} - T_{22}$	$Tpz_{22} =$ MIN ($Tpr_{32};$ Tpr_{23})	$Tpr_{2k} =$ $Tpz_{2k} - T_{2k}$	$Tpz_{2k} =$ MIN ($Tpr_{3k};$ $Tpr_{2(k+1)}$)	$Tpr_{2n} =$ $Tpz_{2n} - T_{2n}$	$Tpz_{2n} =$ TWz_{2n}
...
Brygada j	$Tpr_{j1} =$ $Tpz_{j1} - T_{j1}$	$Tpz_{j1} =$ MIN ($Tpr_{(j+1)1};$ Tpr_{j2})	$Tpr_{j2} =$ $Tpz_{j2} - T_{j2}$	$Tpz_{j2} =$ MIN ($Tpr_{(j+1)2};$ Tpr_{j3})	$Tpr_{jk} =$ $Tpz_{jk} - T_{jk}$	$Tpz_{jk} =$ MIN ($Tpr_{j(k+1)};$ $Tpr_{(j+1)k}$)	$Tpr_{jn} =$ $Tpz_{jn} - T_{jn}$	$Tpz_{jn} =$ TWz_{jn}
...
Brygada m	$Tpr_{m1} =$ $Tpz_{m1} - T_{m1}$	$Tpz_{m1} =$ MIN (Tpr_{m1})	$Tpr_{m2} =$ $Tpz_{m2} - T_{m2}$	$Tpz_{m2} =$ MIN (Tpr_{m3})	$Tpr_{jn} =$ $Tpz_{jn} - T_{jn}$	$Tpz_{jn} =$ MIN ($Tpr_{(j+1)n}$)	$Tpr_{mn} =$ $Tpz_{mn} - T_{mn}$	$Tpz_{mn} =$ TWz_{mn}

10.2.2. Algorytmy obliczeń TCM II

Obliczenia parametrów harmonogramu z zastosowaniem TCM II wykonuje się podobnie jak w przypadku użycia TCM I. Tu również konieczne jest wyznaczenie iteracji, dzięki którym możliwe jest wyznaczenie terminów rozpoczęcia prac. W tym przypadku jednak obliczane są najwcześniejsze terminy rozpoczęcia robót na poszczególnych działkach roboczych. W Tab. 10.7 przedstawiono wzory obliczania iteracji dla TCM II.

Tab. 10.7. Wzory do obliczania iteracji dla TCM II

Procesy robocze	Iteracje 1;2	Iteracje 2;3	...	Iteracje $j;(j+1)$	...	Iteracje $(n-1);n$
Proces 1	$I_{11}=T_{11}$	$I_{12}=T_{12}$	...	$I_{1j}=T_{1k}$	...	$I_{1(n-1)}=T_{1(n-1)}$
Proces 2	$I_{21}=T_{11}+T_{21}-T_{12}$	$I_{22}=T_{12}+T_{22}-T_{13}$	...	$I_{2k}=T_{1k}+T_{2k}-T_{1(k+1)}$	...	$I_{2(n-1)}=T_{1(n-1)}+T_{2(n-1)}-T_{1n}$

Proces j	$I_{j1}=\sum_{i=1}^j T_{i1}$ $-\sum_{i=1}^{j-1} T_{(i-1)2}$	$I_{j2}=\sum_{i=1}^j T_{i2}$ $-\sum_{i=1}^{j-1} T_{(i-1)3}$	...	$I_{jk}=\sum_{i=1}^j T_{ik}$ $-\sum_{i=1}^{j-1} T_{(i-1)(k+1)}$	...	$I_{j(n-1)}=\sum_{i=1}^j T_{i(n-1)}$ $-\sum_{i=1}^{j-1} T_{(i-1)n}$

Proces m	$I_{m1}=\sum_{i=1}^m T_{i1}$ $-\sum_{i=1}^{m-1} T_{(i-1)2}$	$I_{m2}=\sum_{i=1}^m T_{i2}$ $-\sum_{i=1}^{m-1} T_{(i-1)3}$	...	$I_{mk}=\sum_{i=1}^m T_{ik}$ $-\sum_{i=1}^{m-1} T_{(i-1)(k+1)}$	...	$I_{m(n-1)}=\sum_{i=1}^m T_{i(n-1)}$ $-\sum_{i=1}^{m-1} T_{(i-1)n}$
Wartości maksymalne iteracji	$I_{\max 1}=\max I_{i1}$	$I_{\max 2}=\max I_{i2}$	...	$I_{\max k}=\max I_{ik}$	...	$I_{\max n}=\max I_{in}$
Czasy rozpoczęcia prac na działce	$Twr_{12}=I_{\max 1}$	$Twr_{13}=\frac{I_{\max 2}}{I_{\max 2}}$	...	$Twr_{1(k+1)}=\frac{I_{\max k}}{I_{\max k}}$	...	$Twr_{1n}=\frac{I_{\max n}}{I_{\max n}}$

Tab. 10.8. Wzory do obliczania najwcześniejszych terminów rozpoczęcia oraz zakończenia prac dla TCM II

Brygady	Termin rozpoczęcia procesu na działce 1	Termin zakończenia procesu na działce 1	Termin rozpoczęcia procesu na działce 2	Termin zakończenia procesu na działce 2	Termin rozpoczęcia procesu na działce k	Termin zakończenia procesu na działce k	Termin rozpoczęcia procesu na działce n	Termin zakończenia procesu na działce n
Brygada 1	$Twr_{11}=0$	$TWz_{11}=Twr_{11}+T_{11}$	Twr_{12}	$TWz_{12}=Twr_{12}+T_{12}$	..	Twr_{1k} $TWz_{1k}=Twr_{1k}+T_{1k}$	..	Twr_{1n} $TWz_{1n}=Twr_{1n}+T_{1n}$
Brygada 2	$Twr_{21}=TWz_{11}$	$TWz_{21}=Twr_{21}+T_{21}$	$Twr_{22}=\text{MAX}(Twr_{21}; TWz_{12})$	$TWz_{22}=Twr_{22}+T_{22}$	..	$Twr_{2k}=\text{MAX}(TWz_{1k}; TWz_{2(k-1)})$	$Twr_{2n}=\text{MAX}(TWz_{1n}; TWz_{2(n-1)})$	$TWz_{2n}=Twr_{2n}+T_{2n}$
...
Brygada j	$Twr_{j1}=TWz_{(j-1)1}$	$TWz_{j1}=Twr_{j1}+T_{j1}$	$Twr_{j2}=\text{MAX}(Twr_{j1}; TWz_{(j-1)2}; TWz_{j1})$	$TWz_{j2}=Twr_{j2}+T_{j2}$	..	$Twr_{jk}=\text{MAX}(TWz_{(j-1)k}; TWz_{j(k-1)})$	$Twr_{jn}=\text{MAX}(TWz_{(j-1)n}; TWz_{j(n-1)})$	$TWz_{jn}=Twr_{jn}+T_{jn}$
...
Brygada m	$Twr_{m1}=TWz_{(m-1)1}$	$TWz_{m1}=Twr_{m1}+T_{m1}$	$Twr_{m2}=\text{MAX}(Twr_{m1}; TWz_{(m-1)2}; TWz_{m1})$	$TWz_{m2}=Twr_{m2}+T_{m2}$	..	$Twr_{mk}=\text{MAX}(TWz_{(m-1)k}; TWz_{m(k-1)})$	$Twr_{mn}=\text{MAX}(TWz_{(m-1)n}; TWz_{m(n-1)})$	$TWz_{mn}=Twr_{mn}+T_{mn}$

Tab. 10.9. Wzory do obliczania najpóźniejszych terminów rozpoczęcia oraz zakończenia prac dla TCM II

Brygady	Termin rozpoczęcia procesu na działce 1	Termin zakończenia procesu na działce 1	Termin rozpoczęcia procesu na działce 2	Termin zakończenia procesu na działce 2	Termin rozpoczęcia procesu na działce k	Termin zakończenia procesu na działce k	Termin rozpoczęcia procesu na działce n	Termin zakończenia procesu na działce n
Brygada 1	$Tpr_{11} =$ Tpz_{11} $-T_{11}$	$Tpz_{11} =$ MIN $(Tpr_{21};$ $Tpr_{12})$	$Tpr_{12} =$ Tpz_{12} $-T_{12}$	$Tpz_{12} =$ MIN $(Tpr_{22};$ $Tpr_{13})$	$Tpr_{1k} =$ Tpz_{1k} $-T_{1k}$	$Tpz_{k1} =$ MIN $(Tpr_{2k};$ $Tpr_{1(k+1)})$	$Tpr_{1n} =$ Tpz_{1n} $-T_{1n}$	$Tpz_{1n} =$ Tpr_{2n}
Brygada 2	$Tpr_{21} =$ Tpz_{21} $-T_{21}$	$Tpz_{21} =$ MIN $(Tpr_{32};$ $Tpr_{21})$	$Tpr_{22} =$ Tpz_{22} $-T_{22}$	$Tpz_{22} =$ MIN $(Tpr_{32};$ $Tpr_{23})$	$Tpr_{2k} =$ Tpz_{2k} $-T_{2k}$	$Tpz_{2k} =$ MIN $(Tpr_{3k};$ $Tpr_{2(k+1)})$	$Tpr_{2n} =$ Tpz_{2n} $-T_{2n}$	$Tpz_{2n} =$ Tpr_{3n}
...
Brygada j	$Tpr_{j1} =$ Tpz_{j1} $-T_{j1}$	$Tpz_{j1} =$ MIN $(Tpr_{(j+1)1};$ $Tpr_{j2})$	$Tpr_{j2} =$ Tpz_{j2} $-T_{j2}$	$Tpz_{j2} =$ MIN $(Tpr_{(j+1)2};$ $Tpr_{j3})$	$Tpr_{jk} =$ Tpz_{jk} $-T_{jk}$	$Tpz_{jk} =$ MIN $(Tpr_{j(k+1)};$ $Tpr_{j(k+1)k})$	$Tpr_{jn} =$ Tpz_{jn} $-T_{jn}$	$Tpz_{jn} =$ $Tpr_{(j+1)n}$
...
Brygada m	$Tpr_{m1} =$ Tpz_{m1} $-T_{m1}$	$Tpz_{m1} =$ TWz_{m1}	$Tpr_{m2} =$ Tpz_{m2} $-T_{m2}$	$Tpz_{m2} =$ TWz_{m2}	$Tpr_{jn} =$ Tpz_{jn} $-T_{jn}$	$Tpz_{jn} =$ TWz_{mk}	$Tpr_{mn} =$ Tpz_{mn} $-T_{mn}$	$Tpz_{mn} =$ TWz_{mn}

Następnym krokiem po obliczeniu iteracji oraz najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac na działkach jest wyznaczenie najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia prac dla pozostałych procesów. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie czasu trwania całego przedsięwzięcia. Na jego podstawie, określa się najpóźniejsze terminy rozpoczęcia oraz zakończenia prac. Wzory konieczne do tych obliczeń przedstawiono w Tab. 10,8 oraz 10.9.

10.2.3. Algorytmy obliczeń TCM III

Trzecia z metod sprzężeń czasowych nie wymaga dodatkowych obliczeń przed sporządzeniem harmonogramu. Całość obliczeń możliwa jest do przeprowadzenia

w jednej tabeli. Tab. 10.10 przedstawia wzory służące policzeniu najwcześniejszych, zaś Tab. 10.11 najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia zadań. Aby wyznaczyć ścieżkę krytyczną należy wybrać sąsiadujące ze sobą procesy, dla których najwcześniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia są tożsame z najpóźniejszymi.

Na potrzeby uwzględnienia metody Goldratta do TCM III aplikacja wymagała napisania dodatkowego makra w języku VBA. Jego algorytm w pierwszym kroku wybiera jedną z możliwych ścieżek krytycznych harmonogramu. Następnie do zerowych buforów zasilających znajdujących się przed wejściem do ścieżki krytycznej wpisywana jest formuła wyznaczająca sumaryczny bufor czasu dla danej ścieżki podkrytycznej. Wartość buforu jest wstępnie określana przez użytkownika w procentach czasu o jaki zostały skrócone czasy zadań. Tak określone bufory stają się poprzednikami zadań na ścieżce krytycznej.

Tab. 10.10. Wzory do obliczania najwcześniejszych terminów rozpoczęcia oraz zakończenia prac dla TCM III

Brygady	Termin rozpoczęcia procesu na działce 1	Termin zakończenia procesu na działce 1	Termin rozpoczęcia procesu na działce 2	Termin zakończenia procesu na działce 2	Termin rozpoczęcia procesu na działce k	Termin zakończenia procesu na działce k	Termin rozpoczęcia procesu na działce n	Termin zakończenia procesu na działce n
Brygada 1	$T_{Wr11}=0$	$T_{Wz11}=T_{Wr11}+T_{11}$	$T_{Wr12}=T_{Wz11}$	$T_{Wz12}=T_{Wr12}+T_{12}$	$T_{Wr1k}=T_{Wz1(k-1)}$	$T_{Wz1k}=T_{Wr1k}+T_{1k}$	$T_{Wr1n}=T_{Wz1(n-1)}$	$T_{Wz1n}=T_{Wr1n}+T_{1n}$
Brygada 2	$T_{Wr21}=T_{Wz11}$	$T_{Wz21}=T_{Wr21}+T_{21}$	$T_{Wr22}=\text{MAX}(T_{Wz21}; T_{Wz12})$	$T_{Wz22}=T_{Wr22}+T_{22}$	$T_{Wr2k}=\text{MAX}(T_{Wz1k}; T_{Wz2(k-1)})$	$T_{Wz2k}=T_{Wr2k}+T_{2k}$	$T_{Wr2n}=\text{MAX}(T_{Wz1n}; T_{Wz2(n-1)})$	$T_{Wz2n}=T_{Wr2n}+T_{2n}$
...
Brygada j	$T_{Wrj1}=T_{Wz(j-1)1}$	$T_{Wzj1}=T_{Wrj1}+T_{j1}$	$T_{Wrj2}=\text{MAX}(T_{Wz(j-1)2}; T_{Wzj1})$	$T_{Wzj2}=T_{Wrj2}+T_{j2}$	$T_{Wrjk}=\text{MAX}(T_{Wz(j-1)k}; T_{Wzj(k-1)})$	$T_{Wzjk}=T_{Wrjk}+T_{jk}$	$T_{Wrjn}=\text{MAX}(T_{Wz(j-1)n}; T_{Wzj(n-1)})$	$T_{Wzjn}=T_{Wrjn}+T_{jn}$
...
Brygada m	$T_{Wr(m-1)1}$	$T_{Wzm1}=T_{Wr(m-1)1}+T_{m1}$	$T_{Wr(m-1)2}=\text{MAX}(T_{Wzm1}; T_{Wz(m-1)2})$	$T_{Wzm2}=T_{Wr(m-1)2}+T_{m2}$	$T_{Wr(m-1)k}=\text{MAX}(T_{Wzm(k-1)}; T_{Wz(m-1)k})$	$T_{Wzmk}=T_{Wr(m-1)k}+T_{mk}$	$T_{Wr(m-1)n}=\text{MAX}(T_{Wzm(n-1)}; T_{Wz(m-1)n})$	$T_{Wzmn}=T_{Wr(m-1)n}+T_{mn}$

Tab. 10.11. Wzory do obliczania najpóźniejszych terminów rozpoczęcia oraz zakończenia prac dla TCM III

Brygady	Termin rozpoczęcia procesu na działce 1	Termin zakończenia procesu na działce 1	Termin rozpoczęcia procesu na działce 2	Termin zakończenia procesu na działce 2	Termin rozpoczęcia procesu na działce k	Termin zakończenia procesu na działce k	Termin rozpoczęcia procesu na działce n	Termin rozpoczęcia procesu na działce k
Brygada 1	$T_{pr11} =$ $T_{pz11} =$ $-T_{11}$	$T_{pz11} =$ MIN ($T_{pr21};$ T_{pr12})	$T_{pr12} =$ $T_{pz12} =$ $-T_{12}$	$T_{pz12} =$ MIN ($T_{pr22};$ T_{pr13})	$T_{pr1k} =$ $T_{pz1k} =$ $-T_{1k}$	$T_{pz_{k1}} =$ MIN ($T_{pr2k};$ $T_{pr1(k+1)}$)	$T_{pr1n} =$ $T_{pz1n} =$ $-T_{1n}$	$T_{pz_{1n}} =$ T_{pr2n}
Brygada 2	$T_{pr21} =$ $T_{pz21} =$ $-T_{21}$	$T_{pz21} =$ MIN ($T_{pr22};$ T_{pr21})	$T_{pr22} =$ $T_{pz22} =$ $-T_{22}$	$T_{pz22} =$ MIN ($T_{pr32};$ T_{pr23})	$T_{pr2k} =$ $T_{pz2k} =$ $-T_{2k}$	$T_{pz2k} =$ MIN ($T_{pr3k};$ $T_{pr2(k+1)}$)	$T_{pr2n} =$ $T_{pz2n} =$ $-T_{2n}$	$T_{pz_{2n}} =$ T_{pr3n}
...
Brygada j	$T_{pr_{j1}} =$ $T_{pz_{j1}} =$ $-T_{j1}$	$T_{pz_{j1}} =$ MIN ($T_{pr_{(j+1)1}};$ $T_{pr_{j2}}$)	$T_{pr_{j2}} =$ $T_{pz_{j2}} =$ $-T_{j2}$	$T_{pz_{j2}} =$ MIN ($T_{pr_{(j+1)2}};$ $T_{pr_{j3}}$)	$T_{pr_{jk}} =$ $T_{pz_{jk}} =$ $-T_{jk}$	$T_{pz_{jk}} =$ MIN ($T_{pr_{(j+1)k}};$ $T_{pr_{(j+1)(k+1)}}$)	$T_{pr_{jn}} =$ $T_{pz_{jn}} =$ $-T_{jn}$	$T_{pz_{jn}} =$ $T_{pr_{(j+1)n}}$
...
Brygada m	$T_{pr_{m1}} =$ $T_{pz_{m1}} =$ $-T_{m1}$	$T_{pz_{m1}} =$ $T_{pr_{m1}}$	$T_{pr_{m2}} =$ $T_{pz_{m2}} =$ $-T_{m2}$	$T_{pz_{m2}} =$ $T_{pr_{m3}}$	$T_{pr_{jn}} =$ $T_{pz_{jn}} =$ $-T_{jn}$	$T_{pz_{jn}} =$ $T_{pr_{(j+1)n}}$	$T_{pr_{mn}} =$ $T_{pz_{mn}} =$ $-T_{mn}$	$T_{pz_{mn}} =$ $T_{WZ_{mn}}$

10.3. Analiza parametrów czasowych harmonogramów z zastosowaniem metodyki TCM, uwzględnieniem metody Goldratta oraz zmiennej kolejności działek roboczych

Celem obliczeń jest analiza porównawcza cykli realizacji robót budowlanych z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych tj. TCM I, TCM II oraz TCM III w wersji standardowej oraz z wykorzystaniem buforów czasowych E. Goldratta. Dodatkowo sprawdzono wpływ kolejności działek roboczych na czas trwania przedsięwzięcia. Jako strukturę modelowej budowy, dla której przeprowadzone zostały obliczenia przyjęto 10 działek roboczych o różnej wielkości. Na każdej z tych działek wykonywanych jest 10 procesów. Dane wyjściowe do obliczeń zostały wylosowane przez generator liczb pseudolosowych zawarty w interpretacji VBA. Są one wartościami całkowitymi z przedziału <1;16> odpowiadającymi jednostkom czasu. Przyjęto iż wartości czasów trwania procesów odpowiadają dniom. Możliwe jest jednak zastosowanie każdej innej jednostki czasu. Dla każdej metody użyto tych samych danych. Obliczenia przeprowadzone zostały z maksymalną możliwą dokładnością dostępną w programie MS Excel, wyniki zostały przedstawione w postaci liczb całkowitych.

10.3.1. Dane wyjściowe

W Tab. 10.12 zawarto dane, które zostały wykorzystane do dalszych obliczeń. Przyjmuje się iż wartości te odpowiadają dniom potrzebnym na wykonanie danej pracy.

Tab. 10.12 Dane wyjściowe do obliczeń

	Procesy										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Działka robocza	1	2	12	8	14	11	9	13	16	11	11
	2	7	3	11	2	6	10	4	10	5	7
	3	15	11	10	8	14	1	8	15	7	8
	4	7	11	12	16	7	7	10	13	12	5
	5	10	15	6	11	10	6	16	3	3	3

6	4	16	13	16	9	13	13	2	3	4
7	1	9	13	11	6	1	1	8	1	2
8	6	9	16	4	16	12	4	11	11	3
9	14	3	15	16	8	16	3	6	11	11
10	2	8	16	13	12	16	5	10	16	11

10.3.2. Harmonogram z zastosowaniem TCM I

Zastosowanie metody w procesie harmonogramowania zapewnia ciągłość w wykonywaniu prac przez danego wykonawcę. Specyfika tej metody powoduje, iż nie jest możliwe wyznaczenie wśród zadań, ścieżki krytycznej w pełnym znaczeniu tego pojęcia. Ze względu na konieczne opóźnienia w rozpoczęciu danego rodzaju robót, ciągłość jest zachowana przeważnie jedynie dla ostatniego procesu technologicznego i to właśnie on wyznacza ścieżkę krytyczną.

Przeprowadzono obliczenia harmonogramu dla wcześniej opisanych danych bez zmiany kolejności działek roboczych (Tab. 10.12). W Tab. 10.13 przedstawiono najwcześniejsze czasy rozpoczęcia oraz zakończenia poszczególnych procesów. Dane te przedstawiono również w formie graficznej na Rys. 10.1. Cyklogram ukazuje przebiegi procesów dla poszczególnych działek roboczych. Wykresy mają charakter ciągłych łamanych linii. Brak jest tu nagłych skoków reprezentujących przerwy w pracach. Jest to charakterystyczne dla TCM I. W Tab. 10.14 oraz na Rys. 10.2 pokazane zostały przebiegi dla najpóźniejszych czasów rozpoczęcia prac. Jak widzimy terminy najwcześniejszych i najpóźniejszych rozpocząć są sobie równe. Jest to efektem zapewnienia wykonawcom ciągłości robót. W praktyce może to okazać się bardzo niebezpieczne, gdyż rozwiązanie to nie pozostawia żadnego marginesu błędu.

W wyniku obliczeń uzyskano czas trwania całego przedsięwzięcia równy w przybliżeniu 268 jednostek.

Tab. 10.13. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I

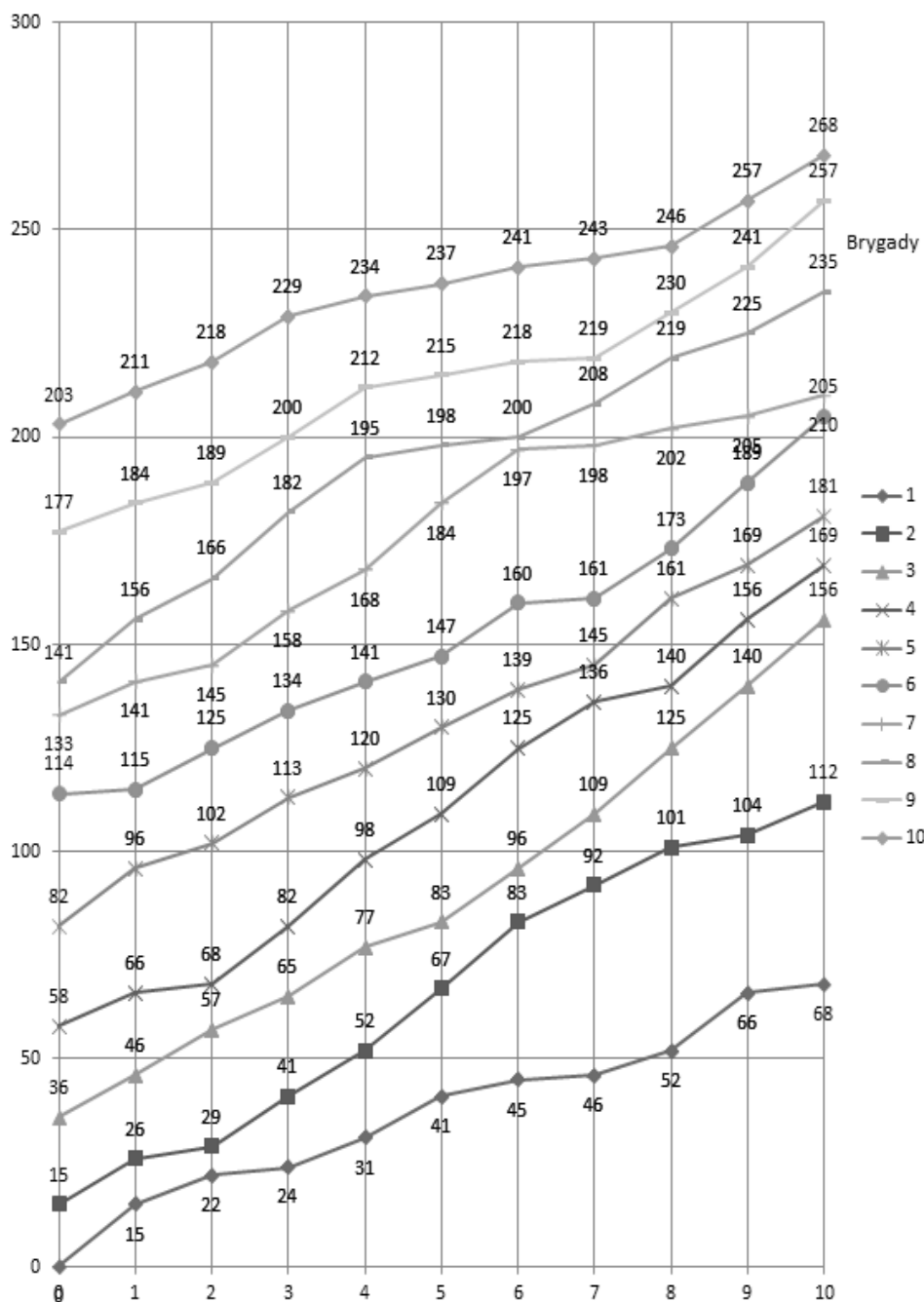
Działki robocze																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
1	0	2	2	9	24	31	31	41	41	45	45	46	46	52	52	66	66	68
2	9	21	21	24	35	35	46	46	61	61	77	77	86	86	95	95	98	106
3	30	38	38	49	49	59	71	71	77	77	90	90	103	103	119	119	134	150
4	52	66	66	68	68	76	92	92	103	103	119	119	130	130	134	134	150	163
5	76	87	87	93	93	107	114	114	124	124	133	133	139	139	155	155	163	175
6	108	117	117	127	127	128	135	135	141	141	154	154	155	155	167	167	183	199
7	127	140	140	144	144	152	162	162	178	178	191	191	192	192	196	196	199	204
8	140	156	156	166	166	181	181	194	194	197	199	199	207	207	218	218	224	234
9	176	187	187	192	192	199	211	211	214	214	217	217	218	218	229	229	240	256
10	202	213	213	220	220	228	233	233	236	236	240	240	242	242	245	245	256	268

Brygady

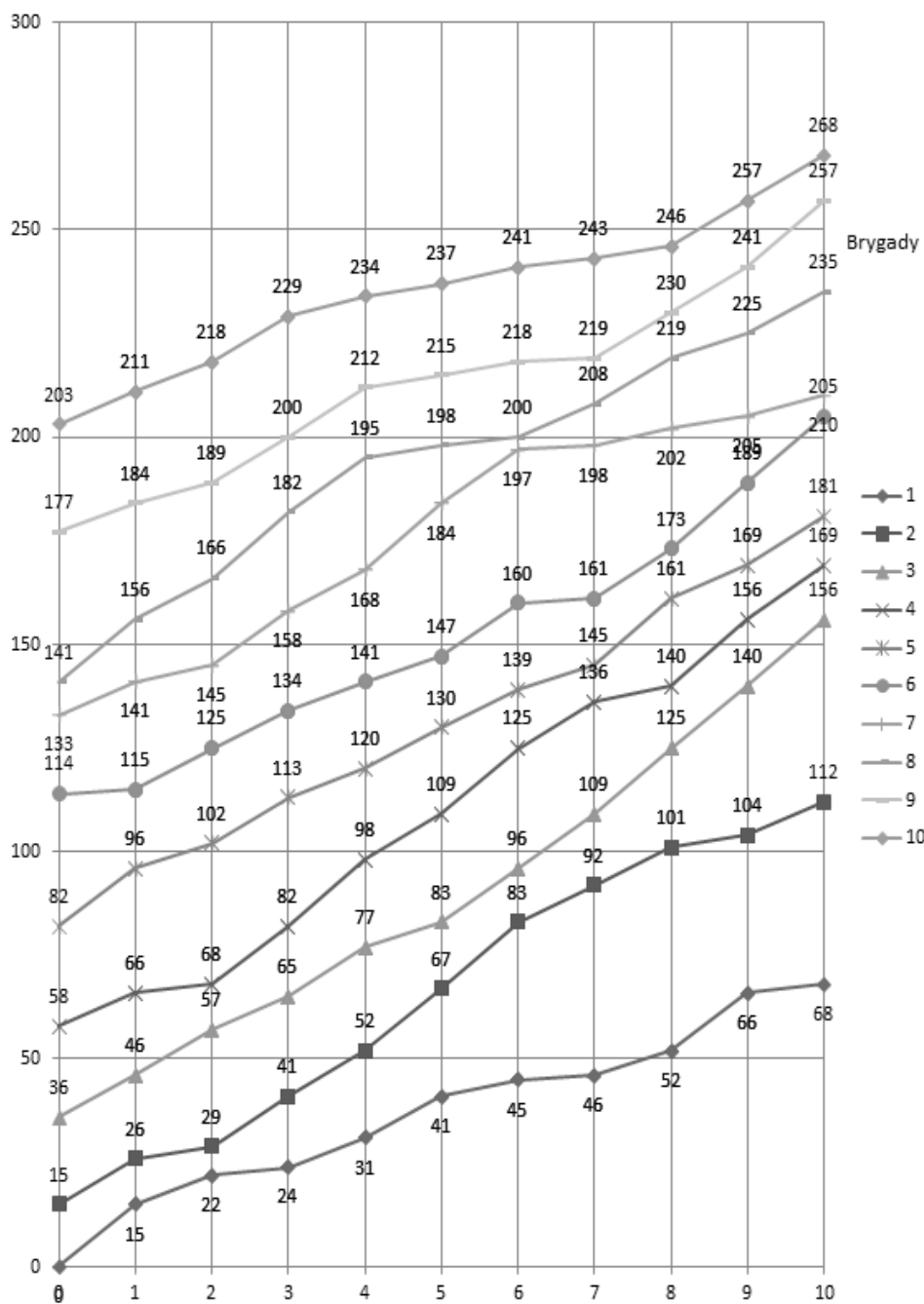
Tab. 10.14. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I

Działki robocze																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
1	0	2	2	9	24	24	31	31	41	41	45	45	46	46	52	52	66	66	68
2	9	21	21	24	24	35	35	46	46	61	61	77	77	86	86	95	95	98	106
3	30	38	38	49	49	59	59	71	71	77	77	90	90	103	103	119	119	134	150
4	52	66	66	68	68	76	76	92	92	103	103	119	119	130	130	134	134	150	163
5	76	87	87	93	93	107	107	114	114	124	124	133	133	139	139	155	155	163	175
6	108	117	117	127	127	128	128	135	135	141	141	154	154	155	155	167	167	183	199
7	127	140	140	144	144	152	152	162	162	178	178	191	191	192	192	196	196	199	204
8	140	156	156	166	166	181	181	194	194	197	197	199	199	207	207	218	218	224	234
9	176	187	187	192	192	199	199	211	211	214	214	217	217	218	218	229	229	240	256
10	202	213	213	220	220	228	228	233	233	236	236	240	240	242	242	245	245	256	268

Brygady



Rys. 10.1. Cyklogram przedstawiający graficznie najwcześniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia procesów na działkach roboczych w TCM I



Rys. 10.2. Cyklogram przedstawiający graficznie najpóźniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia procesów na działkach roboczych w TCM I

10.3.3. Harmonogram z zastosowaniem TCM I i metody Goldratta

Do użytego wcześniej harmonogramu zastosowano koncepcję łańcucha krytycznego E. Goldratta. Zgodnie z założeniami tej metody, skrócone zostały czasy trwania poszczególnych procesów do 50% ich wyjściowego czasu realizacji. Na końcach ścieżek podkrytycznych, tuż przed połączeniem ze ścieżką krytyczną dodane zostały bufony zasilające chroniące ją przed ewentualnymi opóźnieniami. Ze względu na specyfikę TCM I, bufony zasilające umieszczone zostały przed pracą ostatniej brygady. Tylko w ten sposób mogły być zachowane ciągłości robót wykonywanych przez poszczególnych wykonawców. Zabieg ten podzielił całość harmonogramu na dwie części. Pierwsza składa się z szeregu ścieżek podkrytycznych, natomiast w drugiej znajduje się jedynie ścieżka krytyczna zakończona buforem projektu.

Wartości buforów zasilających wynoszą 50% czasu o który została skrócona dana ścieżka. Mają one, w przeciwieństwie do typowych zadań w harmonogramie sporządzonym wg Metody Sprzężeń Czasowych, jedynie po jednym poprzedniku i są od siebie niezależne. Dlatego terminy ich występowania zazębiają się. Stanowią one swego rodzaju okno czasowe, w które powinny dopasować się procesy w przypadku opóźnienia. Na końcu ścieżki krytycznej umieszczony został bufor projektu, którego długość stanowi 50% zredukowanego czasu ścieżki krytycznej. Jego zadaniem będzie ochrona końcowego terminu zakończenia prac.

W Tab. 10.15 przedstawione zostały czasy najwcześniejszego, zaś w Tab. 10.16 najpóźniejszego rozpoczęcia oraz zakończenia procesów z zastosowaniem TCM I, z wykorzystaniem metody E. Goldratta. W tym przypadku czasy te różnią się jedynie umiejscowieniem w czasie buforów zasilających. Jak można zauważyć czas trwania całego przedsięwzięcia, wliczając bufor projektu, zmalał z 268 do około 159 jednostek. Jest to więc większy zysk czasu niż mogło by się to wydawać, biorąc pod uwagę wielkości czasu o jakie zostały pomniejszone procesy oraz wielkości buforów. Załącznik 12.4 zawiera parametry harmonogramu.

Cyklogramy umieszczone na Rys.10.3 oraz 10.4 przedstawiają graficznie uwzględnienie teorii Goldratta w harmonogramowaniu robót budowlanych.

Tab. 10.15. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I z łańcuchem krytycznym

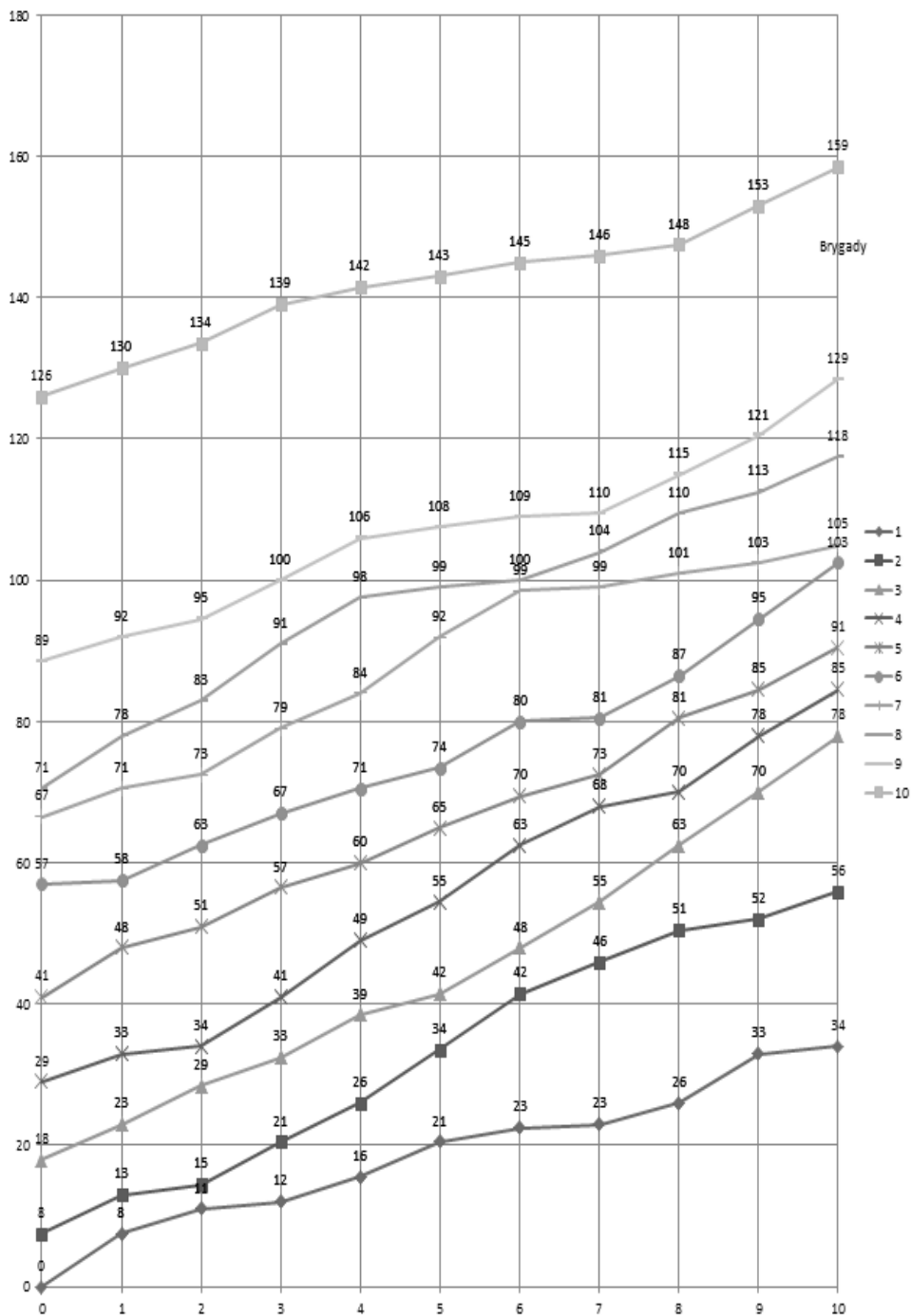
Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
1	0	1	1	5	5	12	12	16	16	21	21	23	23	23	23	26	26	33	33	34
2	5	11	11	12	12	18	18	23	23	31	31	39	39	43	43	48	48	49	49	53
3	15	19	19	25	25	30	30	36	36	39	39	45	45	52	52	60	60	67	67	75
4	26	33	33	34	34	38	38	46	46	52	52	60	60	65	65	67	67	75	75	82
5	38	44	44	47	47	54	54	57	57	62	62	67	67	70	70	78	78	82	82	88
6	54	59	59	64	64	64	64	68	68	71	71	77	77	78	78	84	84	92	92	100
7	64	70	70	72	72	76	76	81	81	89	89	96	96	96	96	98	98	100	100	102
8	70	78	78	83	83	91	91	97	97	99	99	100	100	104	104	109	109	112	112	117
9	88	94	94	96	96	100	100	106	106	107	107	109	109	109	109	115	115	120	120	128
10	126	131	131	135	135	139	139	141	141	143	143	145	145	146	146	147	147	153	153	159

Brygady

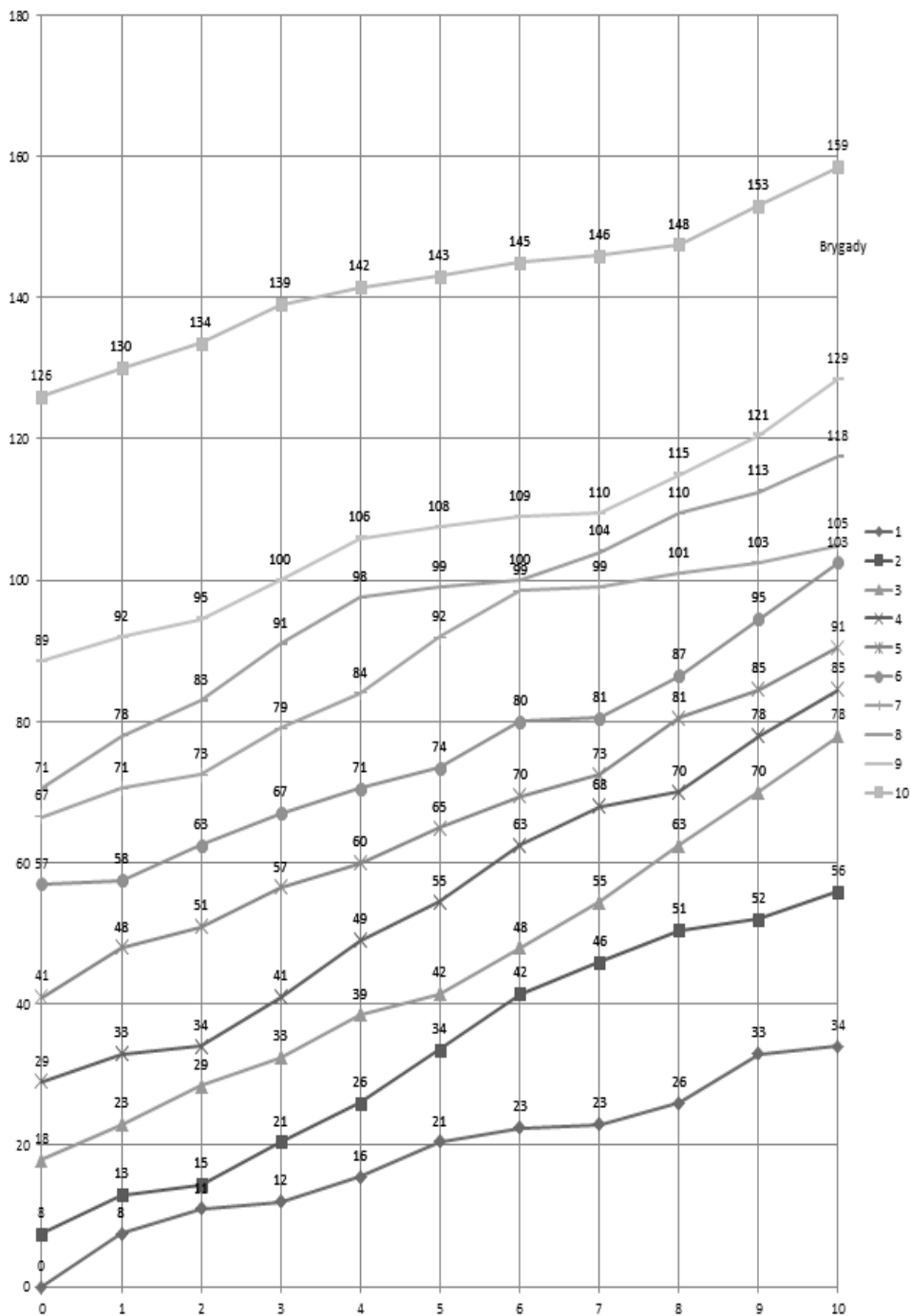
Tab. 10.16. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I z łańcuchem krytycznym

Działki robocze													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0	1	5	12	16	21	23	23	23	26	33	34	
2	5	11	12	18	23	31	31	39	43	48	49	53	
3	15	19	25	30	36	39	39	45	52	52	60	67	75
4	26	33	34	38	46	52	60	60	65	65	67	75	82
5	38	44	47	54	57	62	62	67	70	70	78	82	88
6	54	59	64	64	68	71	71	77	78	84	84	92	100
7	64	70	72	76	81	81	89	96	96	98	98	100	102
8	70	78	83	91	97	99	99	100	104	104	109	112	117
9	88	94	96	100	106	107	107	109	109	115	120	120	128
10	126	131	135	139	141	141	143	145	146	147	153	153	159

Brygady



Rys. 10.3. Cyklogram TCM I z łańcuchem krytycznym dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.4. Cyklogram TCM I z łańcuchem krytycznym dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.4. Harmonogram z zastosowaniem TCM I z optymalną kolejnością działek roboczych

Dla danych z Tab. 10.15 i 10.16 przeprowadzono obliczenia kolejnościowe. Wykorzystując dodatek Solver do programu MS Excel ustalono najbardziej korzystną kolejność działek roboczych. Jest nią kolejność: 10, 8, 1, 6, 9, 3, 4, 2, 5, 7. Jak wynika z analizy, w przypadku TCM I budowa powinna rozpoczynać się od działki na której procesy trwają najdłużej, zaś kończyć na tej na której są one najkrótsze. W Tab. 10.17 i 10.18 przedstawiono najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy rozpoczęcia robót po optymalizacji. Całość obliczeń została przedstawiona w załączniku.

Całkowity czas przedsięwzięcia w odniesieniu do pierwotnego harmonogramu został zredukowany z 268 do 203 jednostek. Notujemy tu zysk czasu około 24%. Taka redukcja długości trwania projektu jest znacząca jednak ustępuje w przypadku zastosowania metody Łańcucha Krytycznego. Jest o ok. 16% gorsza od tej w której zastosowano teorię E. Goldratta. Posiada ona jednak tę zaletę, iż zwiększa prawdopodobieństwo wykonania danego zadania w wyznaczonym terminie.

Rys. 10.5 przedstawia cyklogram robót w danych sektorach dla najwcześniejszych terminów prac. Wykres dla najpóźniejszych terminów przedstawia Rys. 10.6.

Tab. 10.17. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I z optymalną kolejnością działek roboczych

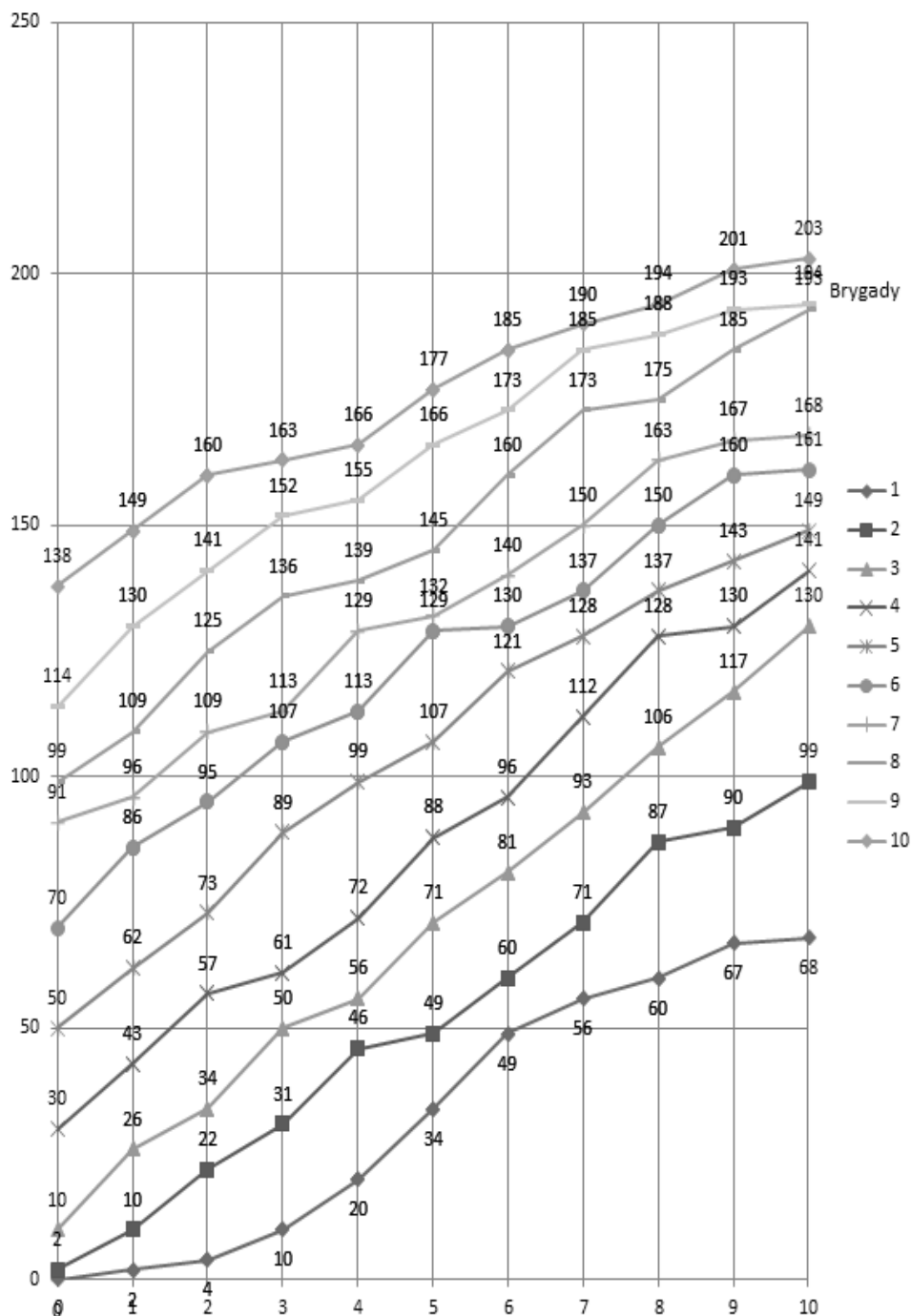
Działki robocze										
	10	8	1	6	9	3	4	2	5	7
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	2	8	10	14	28	43	50	57	67
2	2	10	19	31	47	50	61	72	75	90
3	10	26	42	50	63	78	88	100	111	117
4	33	46	50	64	80	96	104	120	122	133
5	51	63	79	90	99	107	121	128	134	144
6	63	79	91	100	113	129	130	137	147	153
7	94	99	103	116	129	132	140	150	154	170
8	99	109	120	136	138	144	159	172	182	185
9	114	130	141	152	155	166	173	185	190	193
10	137	149	152	163	167	178	186	191	198	201

Brygady

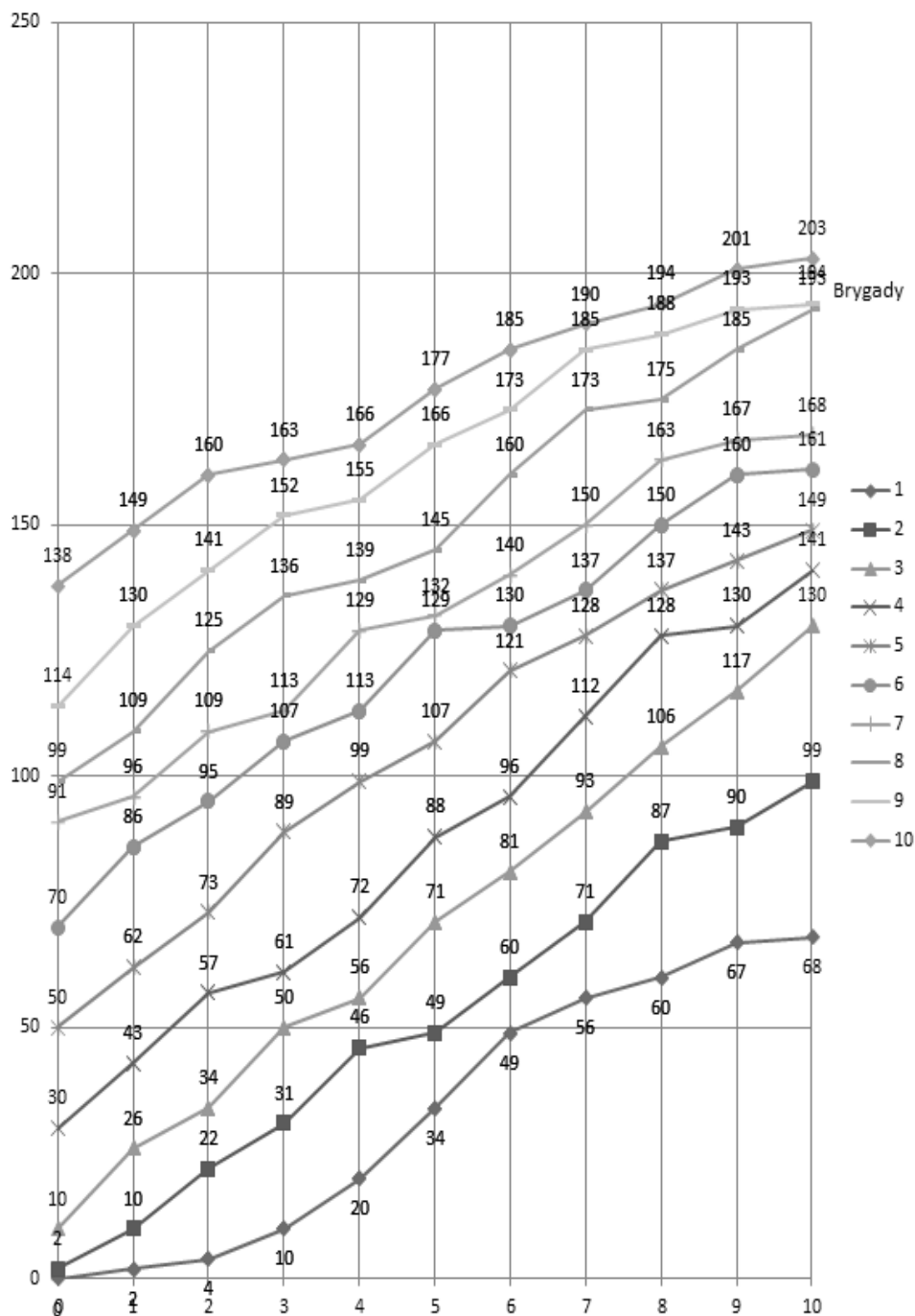
Tab. 10.18. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I z optymalną kolejnością działek roboczych

Działki robocze										
	10	8	1	6	9	3	4	2	5	7
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	2	8	10	14	28	43	50	57	67
2	2	10	19	31	47	50	61	72	75	90
3	10	26	42	50	63	78	88	100	111	117
4	33	46	50	64	80	96	104	120	122	133
5	51	63	79	90	99	107	121	128	134	144
6	63	79	91	100	113	129	130	137	147	153
7	94	99	103	116	129	132	140	150	154	170
8	99	109	120	136	138	144	159	172	182	185
9	114	130	141	152	155	166	173	185	190	193
10	137	149	152	163	167	178	186	191	198	201

Brygady



Rys. 10.5. Cyklogram TCM I z optymalizacją kolejności działek roboczych dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.6. Cyklogram TCM I z optymalizacją kolejności działek roboczych dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.5. Harmonogram z zastosowaniem TCM I z wyznaczoną kolejnością działań roboczych i metody Goldratta

W harmonogramie opracowanym z zastosowaniem dodatkowo Metody Łańcucha Krytycznego Goldratta, uzyskano kolejną redukcję czasu trwania przedsięwzięcia. Tab. 10.19 oraz 10.20 przedstawia najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy prac dla takiej organizacji robót. Po uwzględnieniu buforu projektu uzyskano harmonogram, którego koniec przewidywany jest na 147 jednostek. Uzyskano więc czas o ok. 28% krótszy niż w przypadku zoptymalizowanego zastosowaniem TCM I, lecz bez łańcucha krytycznego. Zysk w stosunku do niezoptymalizowanego harmonogramu lecz z koncepcją E. Goldratta nie jest aż tak znaczący, jest to jedynie 16%. W stosunku do pierwotnych 268 jednostek czasu mamy redukcję o 121 jednostek, czyli aż 45%. Na Rys. 10.7 oraz 10.8 zaprezentowano w sposób graficzny wyżej opisany harmonogram.

Tab. 10.19. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I z optymalną kolejnością działek roboczych i łańcuchem krytycznym

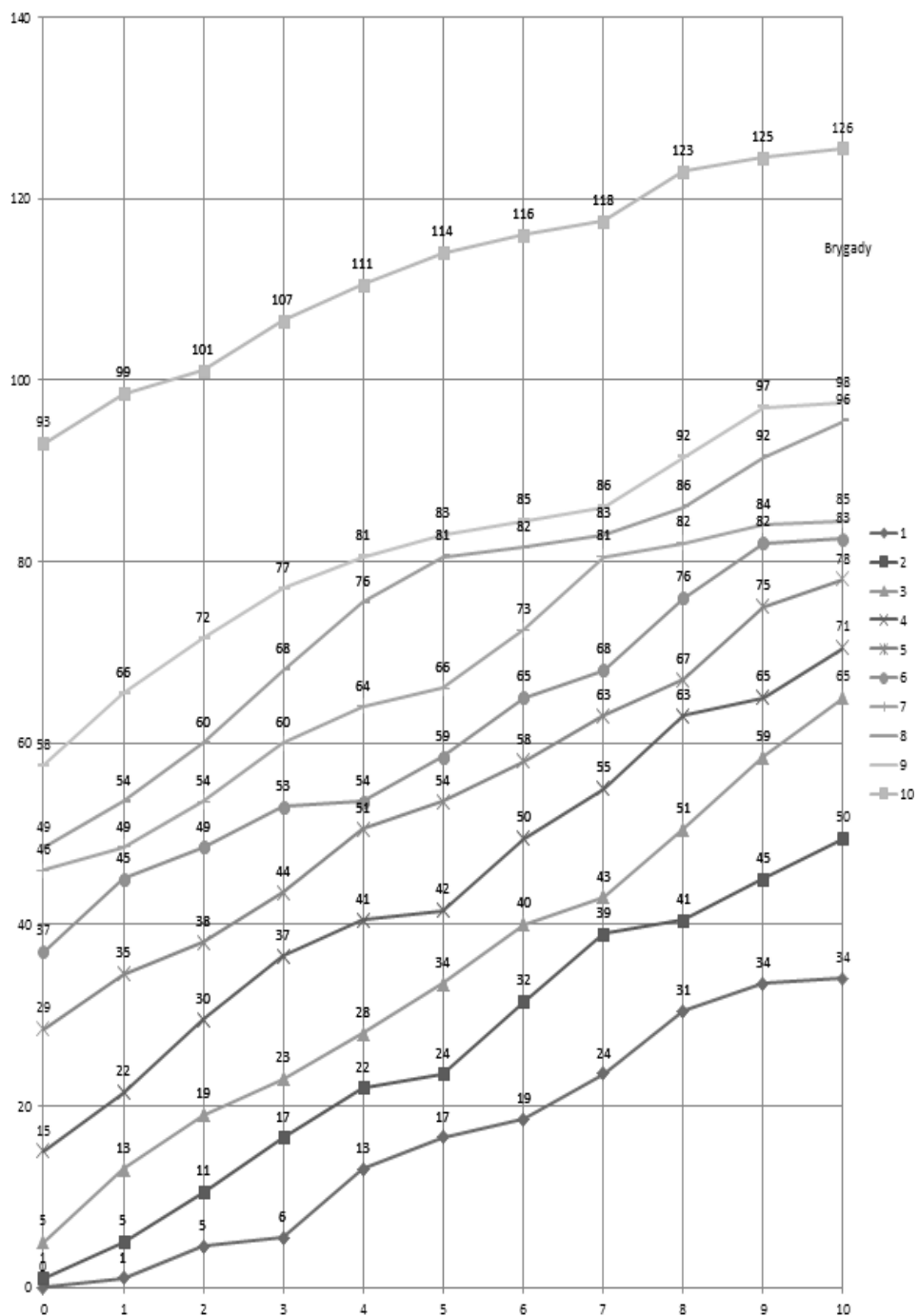
Działki robocze																			
	10	8	1	6	9	3	4	2	5	7									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
1	0	1	4	4	5	7	7	14	14	22	22	25	25	29	34	34			
2	1	5	10	10	16	16	24	24	25	31	31	36	36	38	38	45	50		
3	5	13	21	21	25	25	32	32	39	39	44	44	50	50	56	59	65		
4	17	23	23	25	32	32	40	40	48	48	52	52	60	60	61	61	67	72	
5	26	32	32	40	40	45	50	50	54	54	61	61	64	64	67	67	72	75	
6	32	40	40	46	46	50	57	57	65	65	65	69	69	74	74	77	77	77	
7	47	50	50	52	52	58	65	65	66	66	70	70	75	75	77	77	85	86	
8	50	55	55	60	60	68	68	69	69	72	72	80	80	86	86	91	91	93	97
9	57	65	65	71	71	76	76	78	78	83	83	87	87	93	93	95	95	97	97
10	93	99	99	100	100	106	106	108	108	113	113	117	117	120	120	123	123	125	126

Brygady

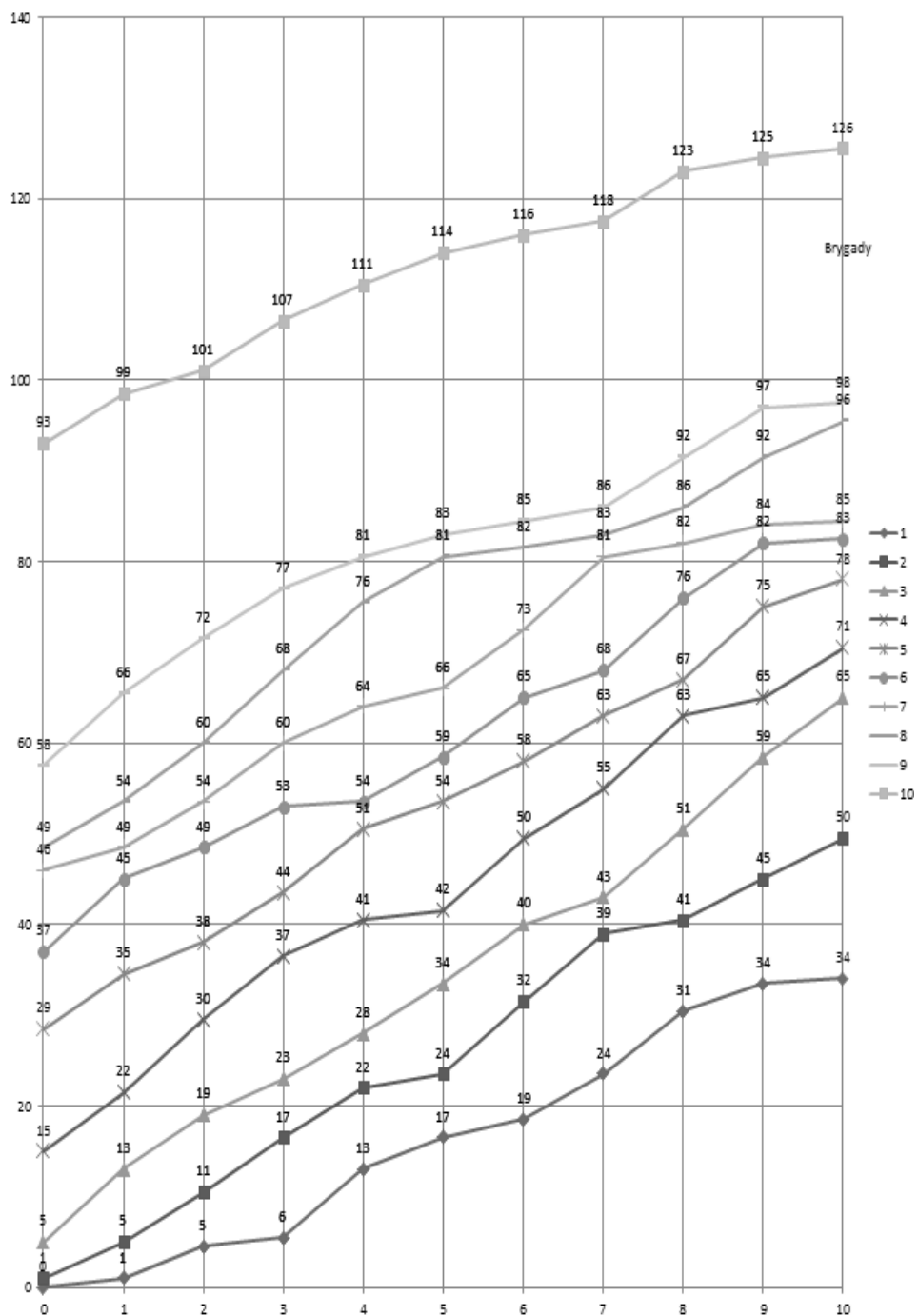
Tab. 10.20. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I z optymalną kolejnością działek roboczych i łańcuchem krytycznym

Działki robocze																	
	10	8	1	6	9	3	4	2	5	7							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
1	0	1	4	4	5	7	7	14	14	22	22	25	25	29	34	34	
2	1	5	10	10	16	16	24	24	25	31	31	36	36	38	45	50	
3	5	13	21	21	25	26	32	32	40	41	46	46	52	52	57	60	67
4	17	23	23	25	32	32	40	40	48	48	52	52	60	60	61	67	72
5	26	32	32	40	40	45	50	50	54	54	61	61	64	64	67	72	75
6	32	40	40	46	46	50	57	57	65	65	65	69	69	74	74	77	77
7	47	50	50	52	52	58	65	65	66	70	70	75	75	77	77	85	86
8	50	55	55	60	60	68	68	69	72	72	80	80	86	86	91	93	97
9	57	65	65	71	71	76	76	78	83	83	87	87	93	93	95	97	97
10	93	99	99	100	100	106	106	108	113	113	117	117	120	120	123	125	126

Brygady



Rys. 10.7. Cyklogram TCM I z optymalizacją kolejności działek roboczych oraz łańcuchem krytycznym dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia



Rys. 10.8. Cyklogram TCM I z optymalizacją kolejności działek roboczych oraz łańcuchem krytycznym dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia

10.3.6. Harmonogram z zastosowaniem TCM I dla najbardziej niekorzystnej kolejności działek roboczych

W celu wyznaczenia cyklu realizacji zastosowano dodatek Solver do programu MS Excel oraz poprzednio użyte algorytmy obliczeniowe. Uzyskano w ten sposób kolejność działek roboczych zapewniającą najdłuższy możliwy termin zakończenia prac. Uzyskana kolejność: 5, 6, 1, 4, 7, 3, 8, 2, 10, 9.

Poniżej w Tab. 10.21 oraz 10.22 przedstawiono najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia prac dla harmonogramu. Długość trwania przedsięwzięcia wydłużyła się do 312 jednostek. Jest to wynik o około 16% gorszy niż w pierwotnym harmonogramie TCM I oraz o 35% gorszy niż w wersji z najkorzystniejszą kolejnością działek roboczych. Przebieg prac na poszczególnych działkach dla najwcześniejszych terminach rozpoczęcia został przedstawiony graficznie na Rys. 10.9, zaś dla najpóźniejszych na Rys. 10.10. Parametry obliczeniowe zestawiono w załączniku 12.5.

Tab. 10.21. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I z najbardziej niekorzystną kolejnością działek roboczych

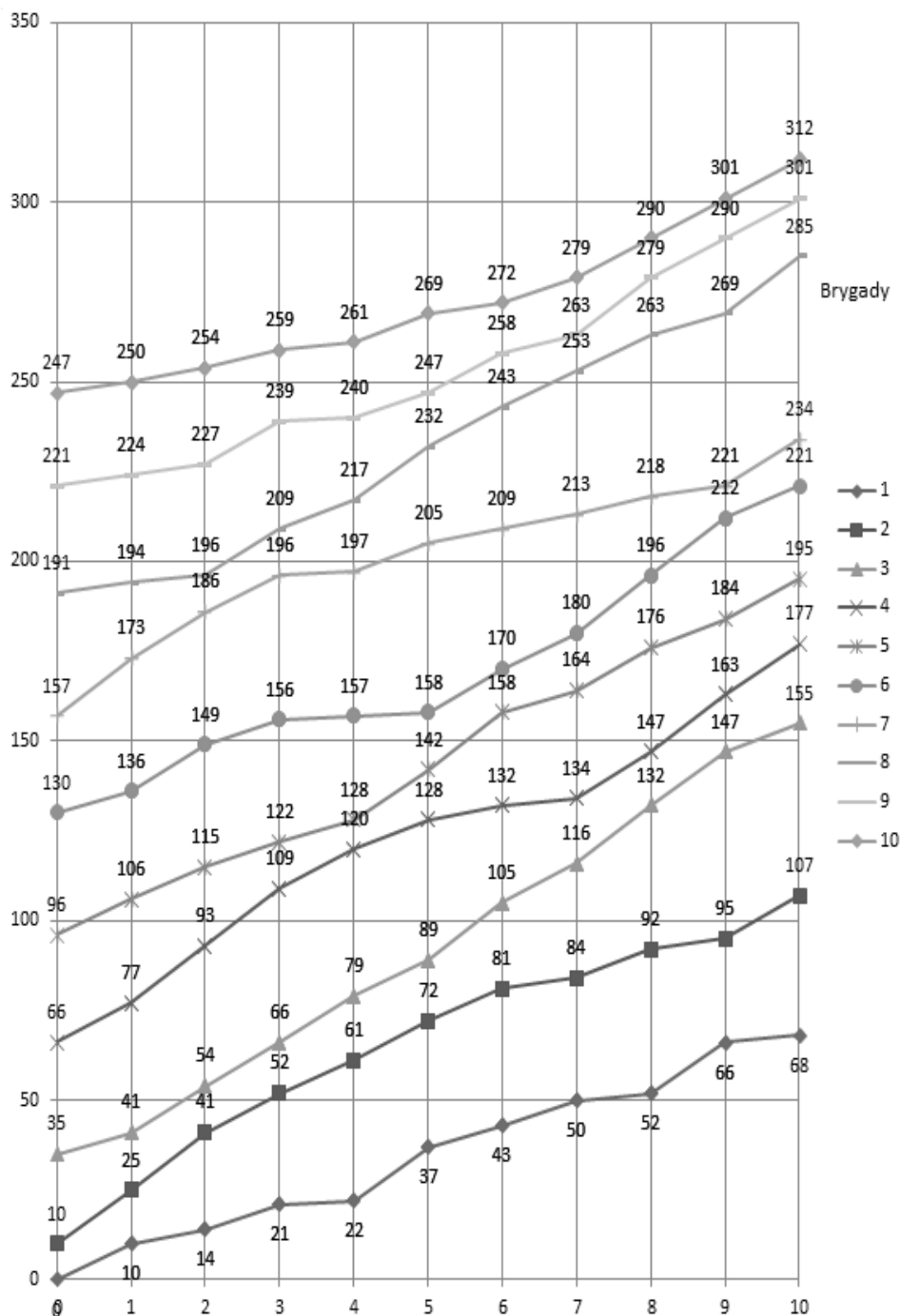
Działki robocze										
	5	6	1	4	4	7	3	8	2	9
	0	1	2	3	4	4	5	6	7	8
	0	10	14	14	16	23	24	39	45	52
	0	10	14	16	23	24	24	39	45	52
1	0	10	14	16	23	24	24	39	45	52
2	10	25	41	41	53	64	73	84	93	96
3	37	43	56	64	76	89	99	115	126	142
4	62	73	89	103	119	130	138	142	144	157
5	95	105	114	125	132	138	152	168	174	186
6	131	137	150	159	166	167	168	180	190	206
7	148	164	177	190	200	201	209	213	217	222
8	185	188	190	206	219	227	242	253	263	273
9	220	223	226	237	249	250	257	268	273	289
10	246	249	253	264	269	271	279	282	289	301

Brygady

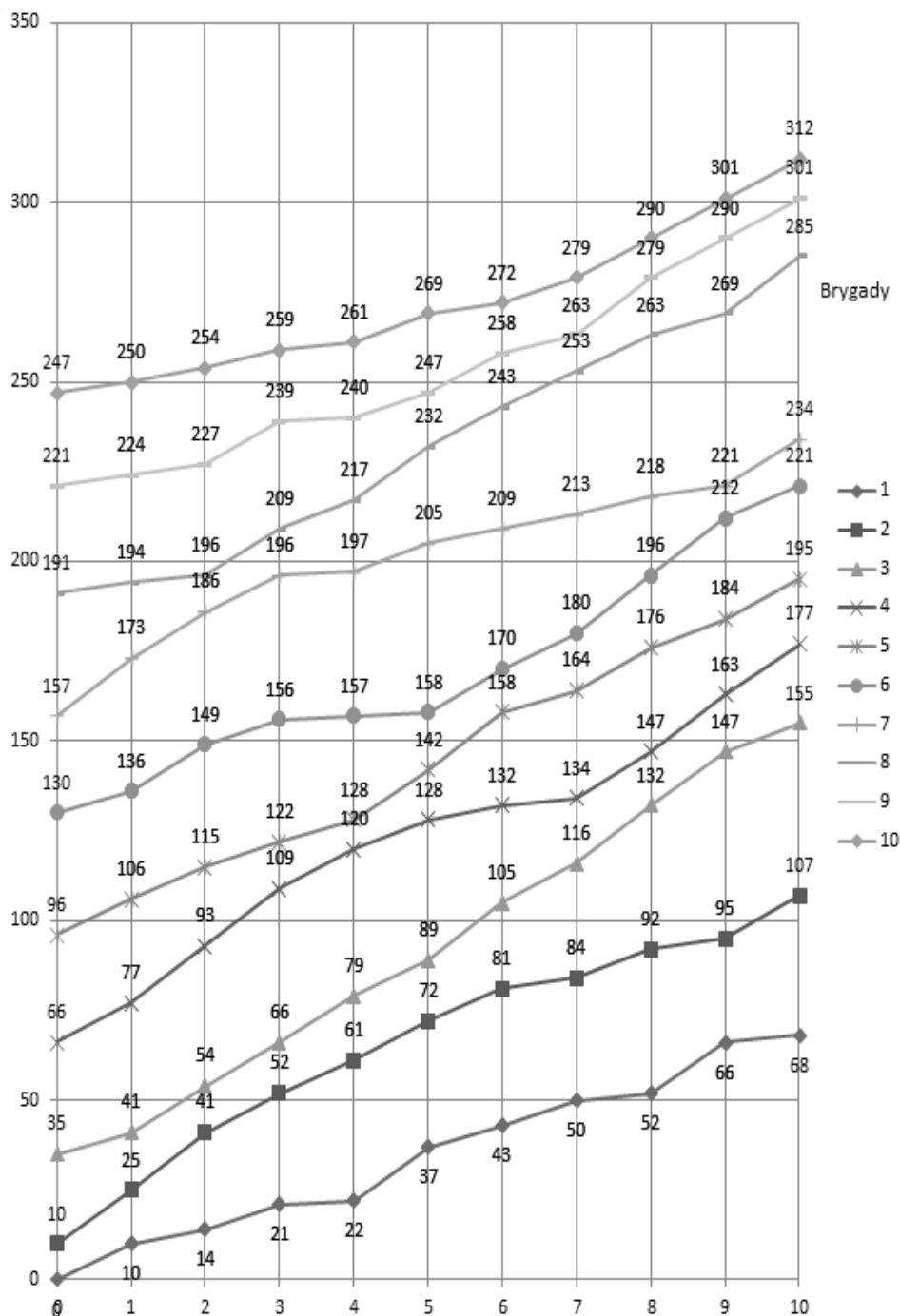
Tab. 10.22. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM I z najbardziej niekorzystną kolejnością działek roboczych

Działki robocze																				
	5	6	1	4	7	3	8	2	10	9										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
1	71	81	92	96	114	116	121	128	137	138	138	153	159	165	180	187	191	193	209	223
2	81	96	96	112	116	128	128	139	142	151	153	164	165	174	187	190	193	201	223	226
3	106	112	112	125	131	139	139	151	151	164	164	174	174	190	190	201	201	217	226	241
4	114	125	125	141	141	155	155	171	171	182	182	190	200	204	215	217	217	230	241	257
5	132	142	142	151	157	168	177	184	184	190	190	204	204	220	224	230	230	242	257	265
6	142	148	151	164	168	177	189	196	217	218	218	219	220	232	232	242	242	258	265	281
7	148	164	164	177	177	190	196	206	218	219	219	227	238	242	249	253	258	263	281	284
8	185	188	188	190	190	206	206	219	219	227	227	242	242	253	253	263	263	273	284	290
9	220	223	223	226	226	237	237	249	249	250	250	257	257	268	268	273	273	289	290	301
10	246	249	249	253	253	264	264	269	269	271	271	279	279	282	282	289	289	301	301	312

Brygady



Rys. 10.9. Cyklogram TCM I z najmniej korzystną kolejnością działek roboczych dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.10. Cyklogram TCM I z najmniej korzystną kolejnością działek roboczych dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.7. Harmonogram z zastosowaniem TCM II

Priorytetem jest zachowanie ciągłości prac na danej działce roboczej. Takie założenie powoduje, iż konieczne jest opóźnienie rozpoczęcia prac na kolejnych sektorach tak, aby poprzedniki poszczególnych procesów nie tworzyły przerw w pracach na danej działce. Konsekwencją tego jest, podobnie jak w przypadku TCM I, brak jednolitej ścieżki krytycznej od początku do końca przedsięwzięcia. Można za nią uznać jedynie ciąg procesów dla ostatniej działki roboczej.

Dla danych z tabeli wejściowej sporządzono harmonogram według założeń TCM II – drugiej Metody Sprzężeń Czasowych. Została przy tym zachowana wyjściowa kolejność działek roboczych. Jak zostało to przedstawione w Tab. 10.23 oraz 10.24, zawierających najwcześniejsze oraz najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót, policzony w ten sposób czas trwania przedsięwzięcia wyniósł 407 jednostek. Podobnie jak w TCM I, tutaj również czasy najwcześniejsze i najpóźniejsze czasy rozpoczęcia są tożsame.

Wyniki obliczeń parametrów czasowych zostały przedstawione na Rys. 10.11 i 10.12 w postaci cyklogramów najwcześniejszych i najpóźniejszych dat rozpoczęć. Jest na nich widoczna różnica pomiędzy założeniami metod TCM I i TCM II. Linie reprezentujące cykle pracy brygad mają kształt „schodów”. Pionowe linie tych załamania ilustrują długości przestojów pomiędzy pracami. Jak widzimy na cyklogramach, zastosowanie metody TCM II powoduje przerwy między poszczególnymi zadaniami wykonywanymi przez brygadę.

Tab. 10.23. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM II

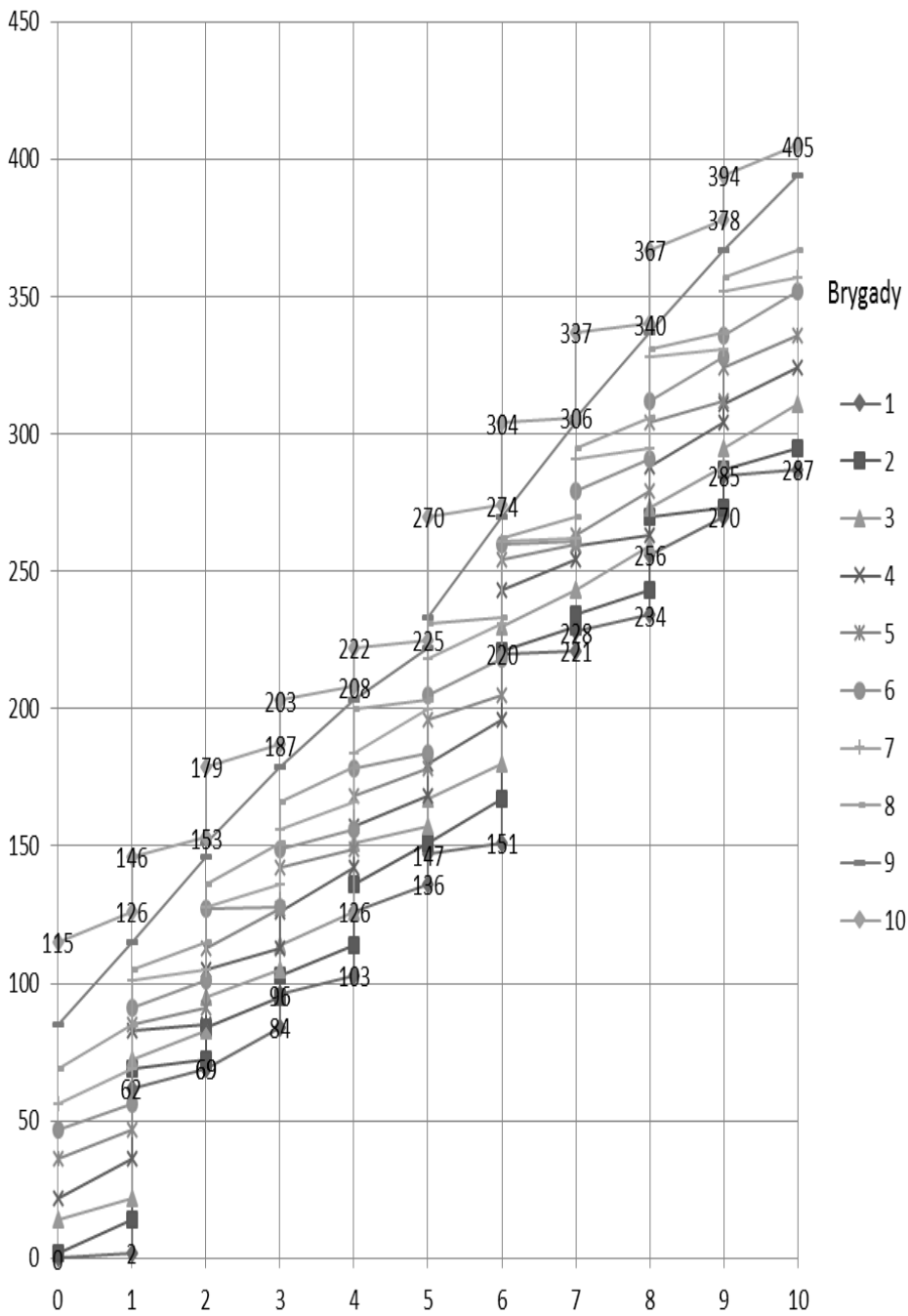
Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	0	2	62	69	69	84	96	103	126	136	147	151	220	221	228	234	256	270	285	287
2	2	14	69	72	84	95	103	114	136	151	151	167	221	230	234	243	270	273	287	295
3	14	22	72	83	95	105	114	126	151	157	167	180	230	243	243	259	273	288	295	311
4	22	36	83	85	105	113	126	142	157	168	180	196	243	254	259	263	288	304	311	324
5	36	47	85	91	113	127	142	149	168	178	196	205	254	260	263	279	304	312	324	336
6	47	56	91	101	127	128	149	156	178	184	205	218	260	261	279	291	312	328	336	352
7	56	69	101	105	128	136	156	166	184	200	218	231	261	262	291	295	328	331	352	357
8	69	85	105	115	136	151	166	179	200	203	231	233	262	270	295	306	331	337	357	367
9	85	115	115	146	151	179	179	203	203	222	233	270	270	304	306	337	337	367	367	394
10	115	126	146	153	179	187	203	208	222	225	270	274	304	306	337	340	367	378	394	405

Brygady

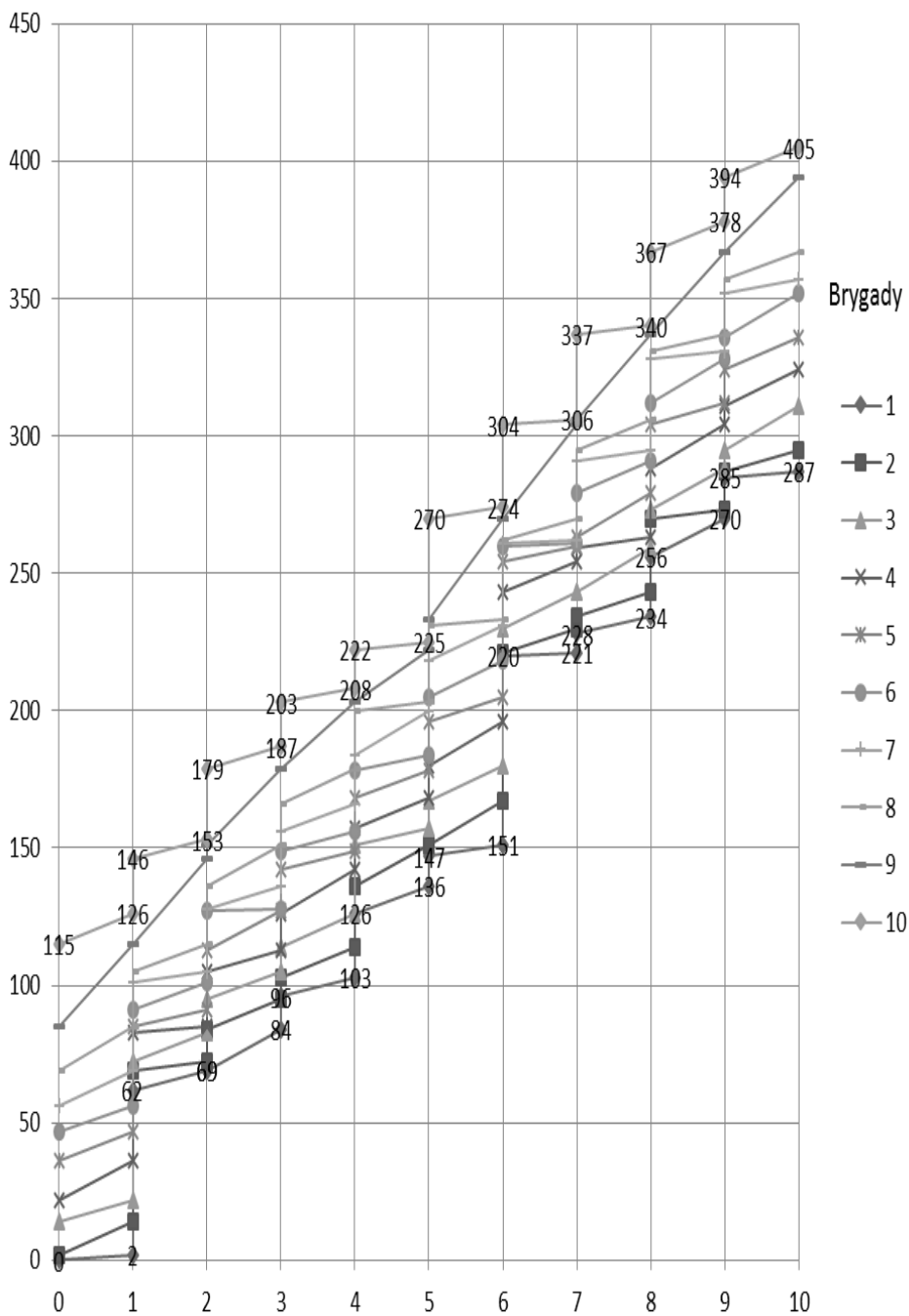
Tab. 10.24. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM II

		Działki robocze																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	0	2	62	69	69	84	96	103	126	136	147	151	220	221	228	234	256	270	285	287
2	2	14	69	72	84	95	103	114	136	151	151	167	221	230	234	243	270	273	287	295
3	14	22	72	83	95	105	114	126	151	157	167	180	230	243	243	259	273	288	295	311
4	22	36	83	85	105	113	126	142	157	168	180	196	243	254	259	263	288	304	311	324
5	36	47	85	91	113	127	142	149	168	178	196	205	254	260	263	279	304	312	324	336
6	47	56	91	101	127	128	149	156	178	184	205	218	260	261	279	291	312	328	336	352
7	56	69	101	105	128	136	156	166	184	200	218	231	261	262	291	295	328	331	352	357
8	69	85	105	115	136	151	166	179	200	203	231	233	262	270	295	306	331	337	357	367
9	85	115	115	146	151	179	179	203	203	222	233	270	270	304	306	337	337	367	367	394
10	115	126	146	153	179	187	203	208	222	225	270	274	304	306	337	340	367	378	394	405

Brygady



Rys. 10.11. Cyklogram TCM II dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót



Rys. 10.12. Cyklogram TCM II dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia robót

10.3.8. Harmonogram z zastosowaniem TCM II i metody Goldratta

Opracowano przykładowy harmonogram według zasad metody sprzężeń czasowych TCM II z użyciem Łańcucha Krytycznego E. Goldratta. Zgodnie z założeniem metody, zastosowano skrócenia procesów o 50%. Wartości buforów zostały także ustanowione na 50% zredukowanego czasu.

Dla zachowania ciągłości wykonywanych prac na działkach roboczych, co jest priorytetem metody, bufory zasilające zostały umieszczone przed ostatnim, krytycznym sektorem. W ten sposób powstał jeszcze jeden sektor składający się jedynie z buforów zasilających. Podzielił on całość przedsięwzięcia na część krytyczną oraz pozostałe zadania. Luka czasowa, jaką tworzą te bufory chroni procesy krytyczne przed możliwymi opóźnieniami na ścieżkach podkrytycznych. Opóźnienie którejkolwiek z robót powoduje przesunięcie całego bloku kolejnych procesów w miejsce zastosowanych rezerw czasowych. W podobny sposób chroniony jest końcowy termin realizacji robót przez bufor projektu umieszczony za ostatnim zadaniem ścieżki krytycznej.

Efekty zastosowania koncepcji Goldratta w TCM II zostały przedstawione w Tab. 10.25 oraz 10.26. Jej wpływ na harmonogram w tym wypadku jest bardzo znaczący. Całkowity czas projektu z uwzględnieniem bufora projektu wynosi 222 jednostek. Jest to 45% redukcja czasu w stosunku do pierwotnej wersji. Cały harmonogram został przedstawiony w załączniku.

Cyklogramy przedstawione na Rys. 10.13 i 10.14 obrazują wpływ łańcucha krytycznego na harmonogram.

Tab. 10.25. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM II z łańcuchem krytycznym

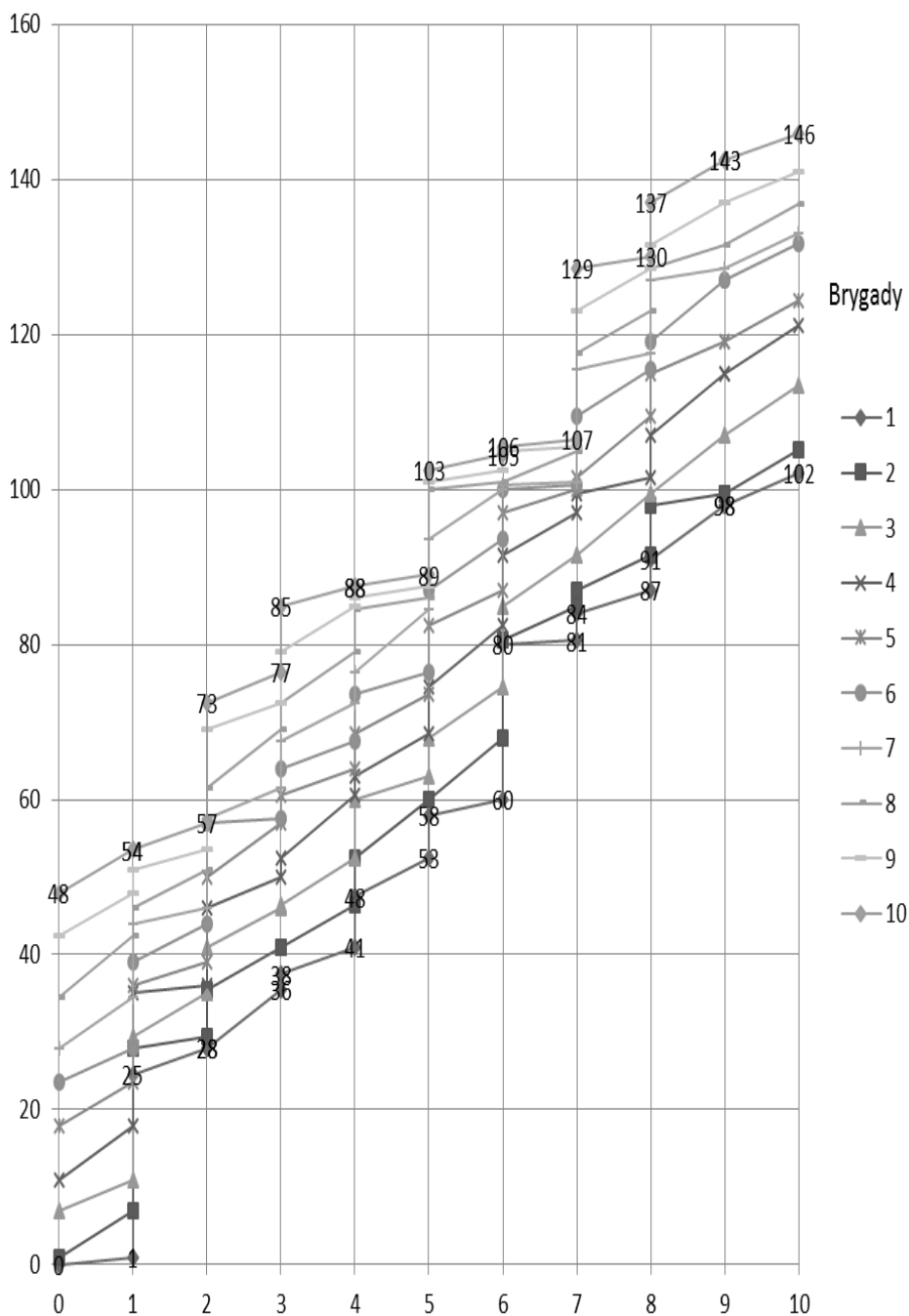
Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	0	1	25	28	28	36	38	41	48	53	58	60	80	81	84	87	91	98	98	102
2	1	7	28	30	36	41	41	47	53	60	60	68	81	85	87	92	98	100	100	105
3	7	11	30	35	41	46	47	53	60	63	68	75	85	92	92	100	100	107	107	114
4	11	18	35	36	46	50	53	61	63	69	75	83	92	97	100	102	107	115	115	121
5	18	24	36	39	50	57	61	64	69	74	83	87	97	100	102	110	115	119	119	124
6	24	28	39	44	57	58	64	68	74	77	87	94	100	101	110	116	119	127	127	132
7	28	35	44	46	58	62	68	73	77	85	94	100	101	101	116	118	127	129	129	133
8	35	43	46	51	62	69	73	79	85	86	100	101	101	105	118	123	129	132	132	137
9	43	48	51	54	69	73	79	85	86	88	101	103	105	106	123	129	132	137	137	141
10	48	54	54	57	73	77	85	88	88	89	103	105	106	107	129	130	137	143	143	146

Brygady

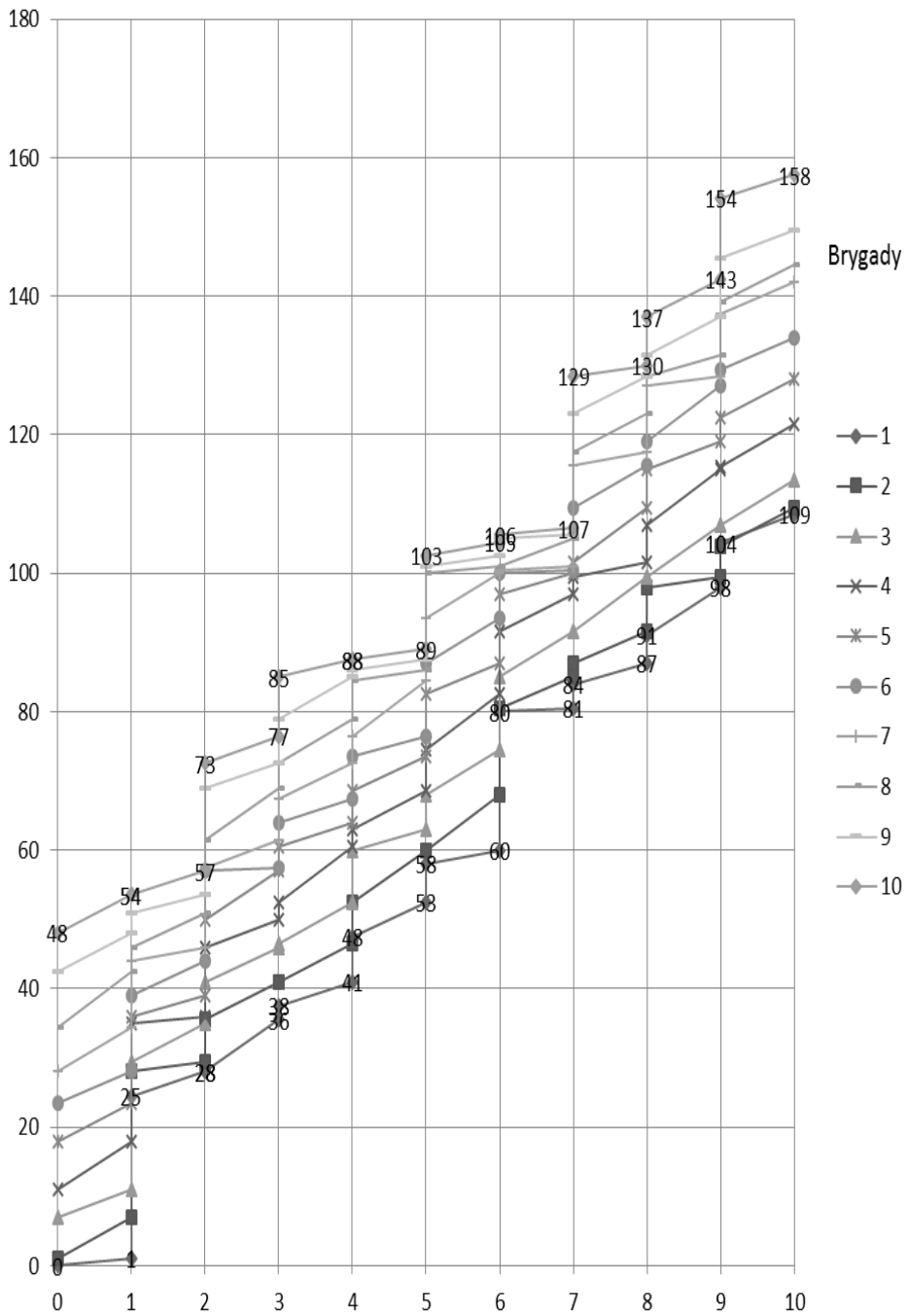
Tab. 10.26. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM II z łańcuchem krytycznym

Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
1	0	1	25	28	28	36	38	41	48	53	58	60	80	81	84	87	91	98	104	109
2	1	7	28	30	36	41	41	47	53	60	60	68	81	85	87	92	98	100	104	110
3	7	11	30	35	41	46	47	53	60	63	68	75	85	92	92	100	100	107	107	114
4	11	18	35	36	46	50	53	61	63	69	75	83	92	97	100	102	107	115	115	122
5	18	24	36	39	50	57	61	64	69	74	83	87	97	100	102	110	115	119	123	128
6	24	28	39	44	57	58	64	68	74	77	87	94	100	101	110	116	119	127	129	134
7	28	35	44	46	58	62	68	73	77	85	94	100	101	101	116	118	127	129	138	142
8	35	43	46	51	62	69	73	79	85	86	100	101	101	105	118	123	129	132	139	145
9	43	48	51	54	69	73	79	85	86	88	101	103	105	106	123	129	132	137	146	150
10	48	54	54	57	73	77	85	88	88	89	103	105	106	107	129	130	137	143	154	158

Brygady



Rys. 10.13. Cyklogram TCM II z łańcuchem krytycznym dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.14. Cyklogram TCM II z łańcuchem krytycznym dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.9. Harmonogram z zastosowaniem TCM II z wyznaczoną kolejnością działek roboczych

Przeprowadzono obliczenia mające na celu określenie właściwej kolejności działek roboczych dla harmonogramu wykonanego drugą z metod sprzężeń czasowych, TCM II. Analiza przeprowadzona z zastosowaniem MS Excel i dodatku Solver wykazała, iż kolejność działek (sektorów) zapewniająca najkrótsze wykonanie przedsięwzięcia to kolejno: 7, 2, 5, 10, 1, 6, 4, 3, 9, 8.

W efekcie zmiany kolejności wykonania uzyskano końcowy termin robót równy 344 jednostek. Oznacza to zmniejszenie czasu trwania przedsięwzięcia o ok. 15% w stosunku do pierwotnego harmonogramu z zastosowaniem metody TCM II. Terminy rozpoczęcia i zakończenia procesów dla najwcześniejszych oraz najpóźniejszych terminów rozpoczęcia przedstawiają odpowiednio Tab. 10.27 oraz 10.28

Cyklogram na Rys. 10.15 przedstawia graficznie rezultaty szeregowania zadań dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia, zaś cyklogram na Rys. 10.16 dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia.

Tab. 10.27. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM II z optymalną kolejnością działek roboczych

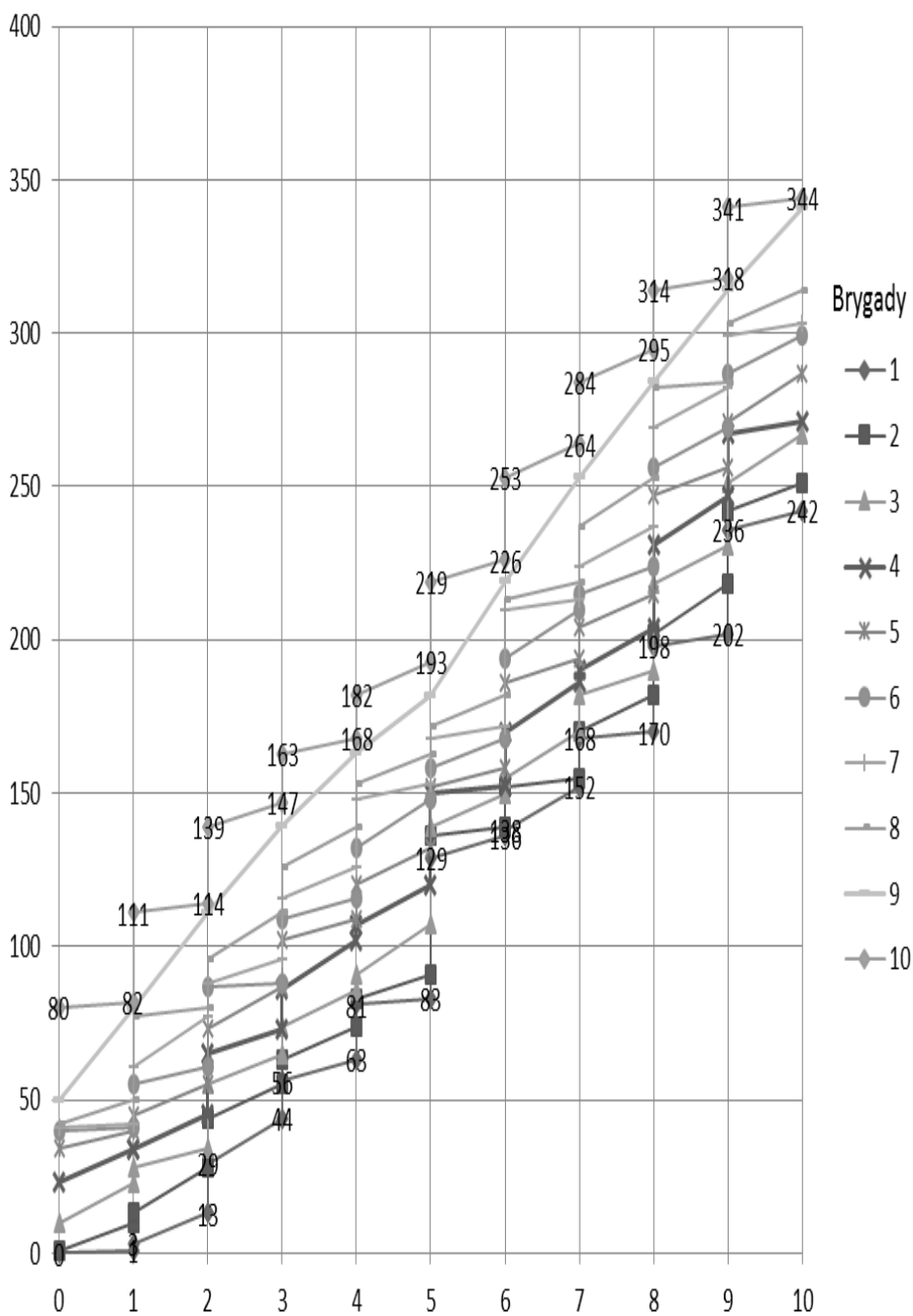
		Działki robocze																		
		9	4	10	1	7	3	5	6	2	8									
	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7	7	8	8	9	9	10	
1	0	1	3	13	29	44	56	63	81	83	129	136	138	152	168	170	198	202	236	242
2	1	10	13	28	44	55	63	74	83	91	136	139	152	155	170	182	202	218	242	251
3	10	23	28	34	55	65	74	86	91	107	139	150	155	170	182	190	218	231	251	267
4	23	34	34	45	65	73	86	102	107	120	150	152	170	186	190	204	231	247	267	271
5	34	40	45	55	73	87	102	109	120	132	152	158	186	194	204	215	247	256	271	287
6	40	41	55	61	87	88	109	116	132	148	158	168	194	210	215	224	256	269	287	299
7	41	42	61	77	88	96	116	126	148	153	168	172	210	213	224	237	269	282	299	303
8	42	50	77	80	96	111	126	139	153	163	172	182	213	219	237	253	282	284	303	314
9	50	80	80	111	111	139	139	163	163	182	182	219	219	253	284	284	314	314	341	341
10	80	82	111	114	139	147	163	168	182	193	219	226	253	264	284	295	314	318	341	344

Brygady

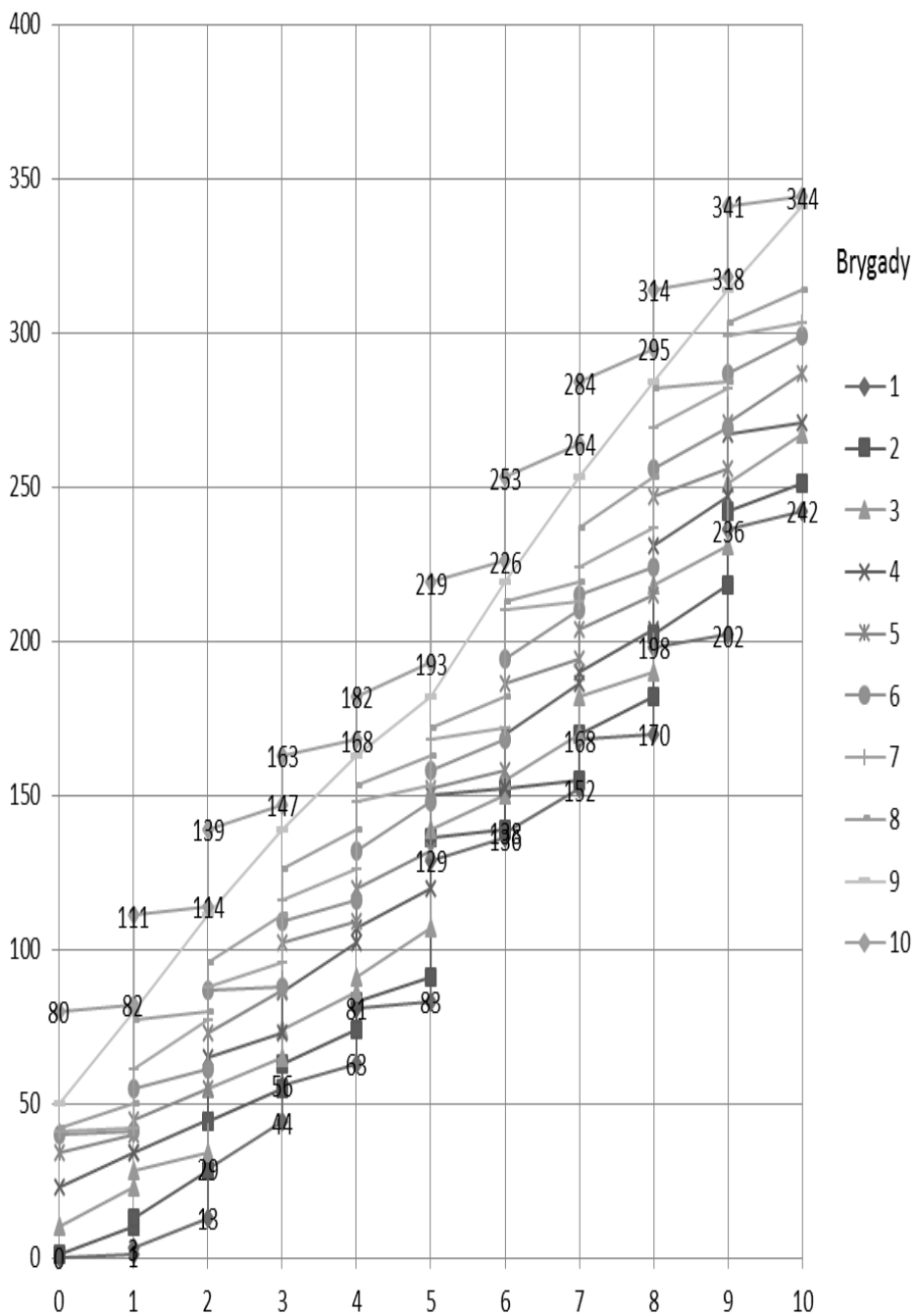
Tab. 10.28. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM II z optymalną kolejnością działek roboczych

Działki robocze																				
	9	4	4	10	1	7	3	5	6	8										
	0	1	2	2	3	4	4	5	5	6										
	10	1	2	2	3	3	4	4	5	6										
	9	10	8	9	10	9	8	7	6	5										
1	0	1	3	13	29	44	56	63	81	83	129	136	138	152	168	170	198	202	236	242
2	1	10	13	28	44	55	63	74	83	91	136	139	152	155	170	182	202	218	242	251
3	10	23	28	34	55	65	74	86	91	107	139	150	155	170	182	190	218	231	251	267
4	23	34	34	45	65	73	86	102	107	120	150	152	170	186	190	204	231	247	267	271
5	34	40	45	55	73	87	102	109	120	132	152	158	186	194	204	215	247	256	271	287
6	40	41	55	61	87	88	109	116	132	148	158	168	194	210	215	224	256	269	287	299
7	41	42	61	77	88	96	116	126	148	153	168	172	210	213	224	237	269	282	299	303
8	42	50	77	80	96	111	126	139	153	163	172	182	213	219	237	253	282	284	303	314
9	50	80	80	111	111	139	139	163	163	182	182	219	219	253	284	284	314	314	341	341
10	80	82	111	114	139	147	163	168	182	193	219	226	253	264	284	295	314	318	341	344

Brygady



Rys. 10.15. Cyklogram TCM II z optymalizacją kolejności działań roboczych dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.16. Cyklogram TCM II z optymalizacją kolejności działek roboczych dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.10. Harmonogram z zastosowaniem TCM II z optymalną kolejnością działek roboczych z użyciem metody Goldratta

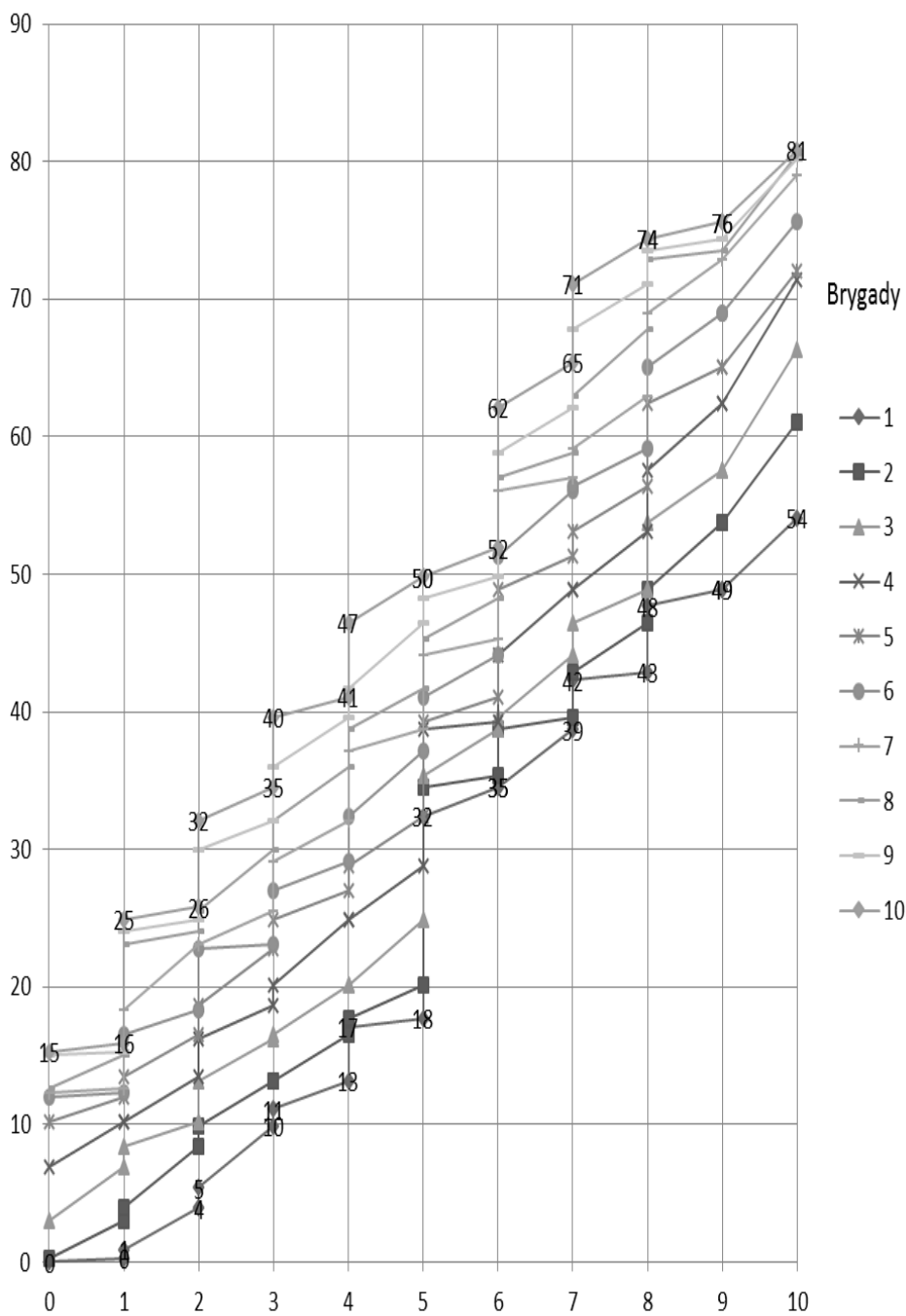
By uzyskać dodatkową redukcję czasu realizacji, do harmonogramowania robót zastosowano metodę łańcucha krytycznego Goldratta. W efekcie otrzymano, po uwzględnieniu buforu projektu, termin końcowy wynoszący 183 jednostki. Zmiany czasów poszczególnych procesów można prześledzić w Tab. 10.29 oraz 10.30 przedstawiających terminy najwcześniejszych i najpóźniejszych rozpoczęć prac. Czas trwania przedsięwzięcia został, zatem skrócony o 55% w stosunku do pierwotnego, o 17% w stosunku do nieoptymalizowanego TCM II z zastosowanym łańcuchem krytycznym, oraz o 47% w stosunku do pierwotnego harmonogramu z zastosowaniem TCM II.

Wyniki te zawierają cyklogramy na Rys. 10.17 i 10.18. Widoczne są na nim zarówno bufory czasowe, jak i bliskość linii cykli, a także odmienne nachylenie ostatniej krzywej reprezentującej działania na ostatniej działce roboczej.

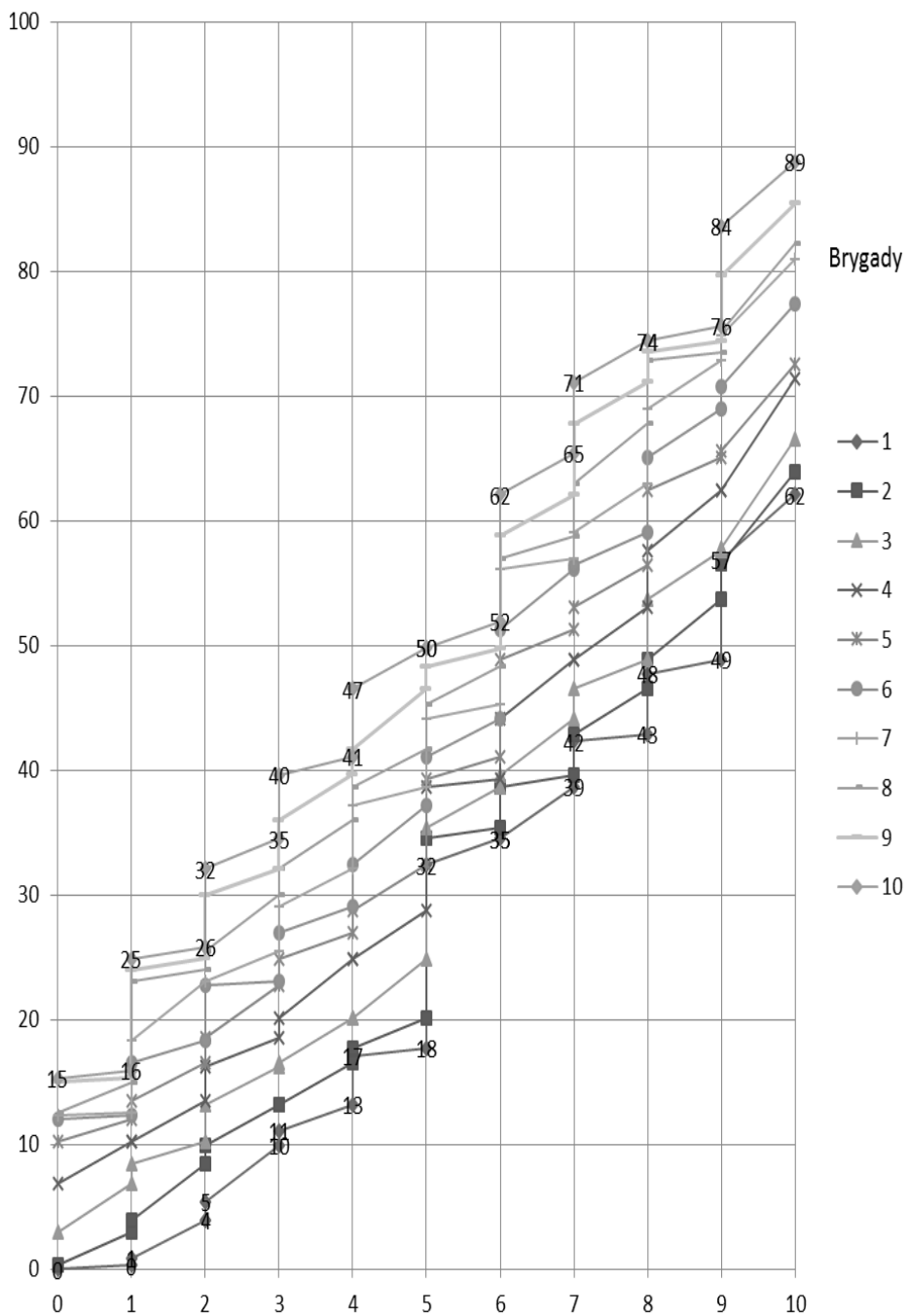
Tab. 10.29. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM II z optymalną kolejnością działek roboczych i łańcuchem krytycznym

Działki robocze																			
	9	4	10	1	7	3	5	6	2	8									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
1	0	0	1	4	5	10	11	13	17	18	32	35	35	39	42	43	48	49	54
2	0	3	4	8	10	13	17	18	20	35	35	39	40	43	47	49	54	54	61
3	3	7	8	10	13	16	17	20	20	25	35	39	40	44	47	49	54	58	66
4	7	10	10	14	16	19	20	25	25	29	39	39	44	49	49	53	58	62	71
5	10	12	14	17	19	23	25	27	29	32	39	41	49	51	53	56	62	65	72
6	12	12	17	18	23	23	27	29	32	37	41	44	51	56	56	59	65	69	76
7	12	13	18	23	23	26	29	32	37	39	44	45	56	57	59	63	69	73	79
8	13	15	23	24	26	30	32	36	39	42	45	48	57	59	63	68	73	74	80
9	15	15	24	25	30	32	36	40	42	47	48	50	59	62	68	71	74	74	80
10	15	16	25	26	32	35	40	41	47	50	50	52	62	65	71	74	74	76	81

Brygady



Rys. 10.17. Cyklogram TCM II z optymalizacją kolejności działek roboczych oraz łańcuchem krytycznym dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.18. Cyklogram TCM II z optymalizacją kolejności działek roboczych oraz łańcuchem krytycznym dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.11. Harmonogram z zastosowaniem TCM II dla najbardziej niekorzystnej kolejności działek roboczych

Przeprowadzono analizę porównawczą przyjmując przypadek najniekorzystniejszej kolejności działek roboczych w harmonogramie. Do obliczeń wykorzystano dodatek Solver programu MS Excel. Analiza pozwoliła wyznaczyć najmniej korzystną kolejność działek roboczych, która wynosi odpowiednio: działki 6, 4, 5, 9, 7, 1, 8, 3, 2, 10. Front robót o najdłuższym łącznym czasie trwania prac został tutaj umiejscowiony w środku harmonogramu tuż po froncie o najkrótszym sumarycznym czasie trwania. Dokładniejsze dane, przedstawiające najwcześniejsze i najpóźniejsze czasy rozpoczęcia zadań przedstawiono w Tab. 10.31 oraz 10.32. Całość została przedstawiona graficznie w postaci cyklogramów na Rys. 10.19 oraz 10.20 Załącznik zawiera kompletny harmonogram dla powyższego przypadku.

Czas realizacji przedsięwzięcia według przyjętych założeń wydłużył się do 427 jednostek. Wynik jest, więc o 5% gorszy niż w pierwszej wersji tego harmonogramu i o 24% gorszy niż w wersji poddanej optymalizacji.

Tab. 10.31. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM II z najbardziej niekorzystną kolejnością działek roboczych

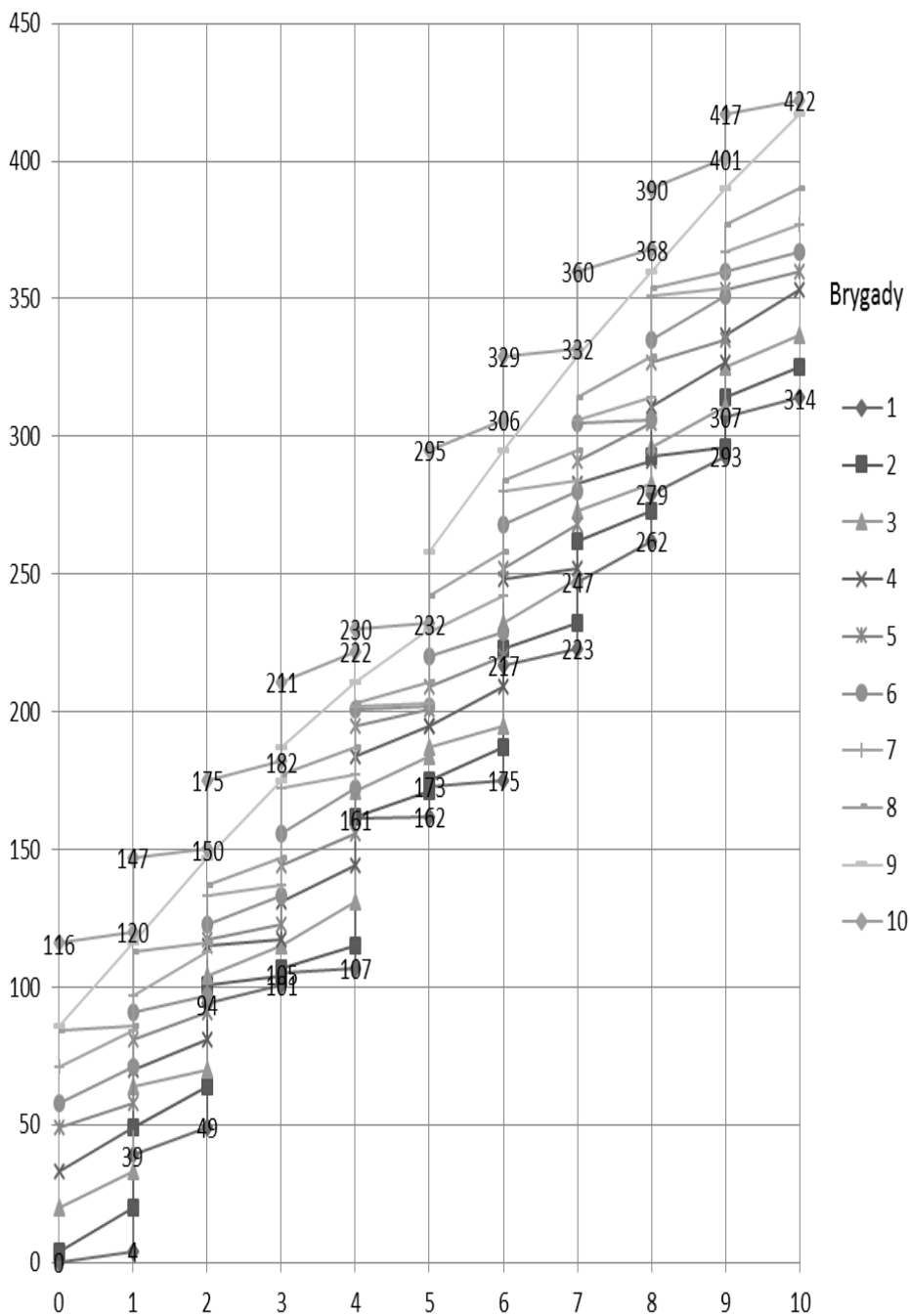
Działki robocze																				
	7	5	3	4	4	10	2	9	1	6	8									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	0	4	39	49	94	101	105	107	161	162	173	175	217	223	247	262	279	293	307	314
2	4	20	49	64	101	104	107	115	162	171	175	187	223	232	262	273	293	296	314	325
3	20	33	64	70	104	115	115	131	171	184	187	195	232	248	273	283	296	311	325	337
4	33	49	70	81	115	117	131	144	184	195	195	209	248	252	283	291	311	327	337	353
5	49	58	81	91	117	123	144	156	195	201	209	220	252	268	291	305	327	335	353	360
6	58	71	91	97	123	133	156	172	201	202	220	229	268	280	305	306	335	351	360	367
7	71	84	97	113	133	137	172	177	202	203	229	242	280	284	306	314	351	354	367	377
8	84	86	113	116	137	147	177	187	203	211	242	258	284	295	314	329	354	360	377	390
9	86	116	116	147	147	175	187	211	211	230	258	295	295	329	329	360	360	390	390	417
10	116	120	147	150	175	182	211	222	230	232	295	306	329	332	360	368	390	401	417	422

Brygady

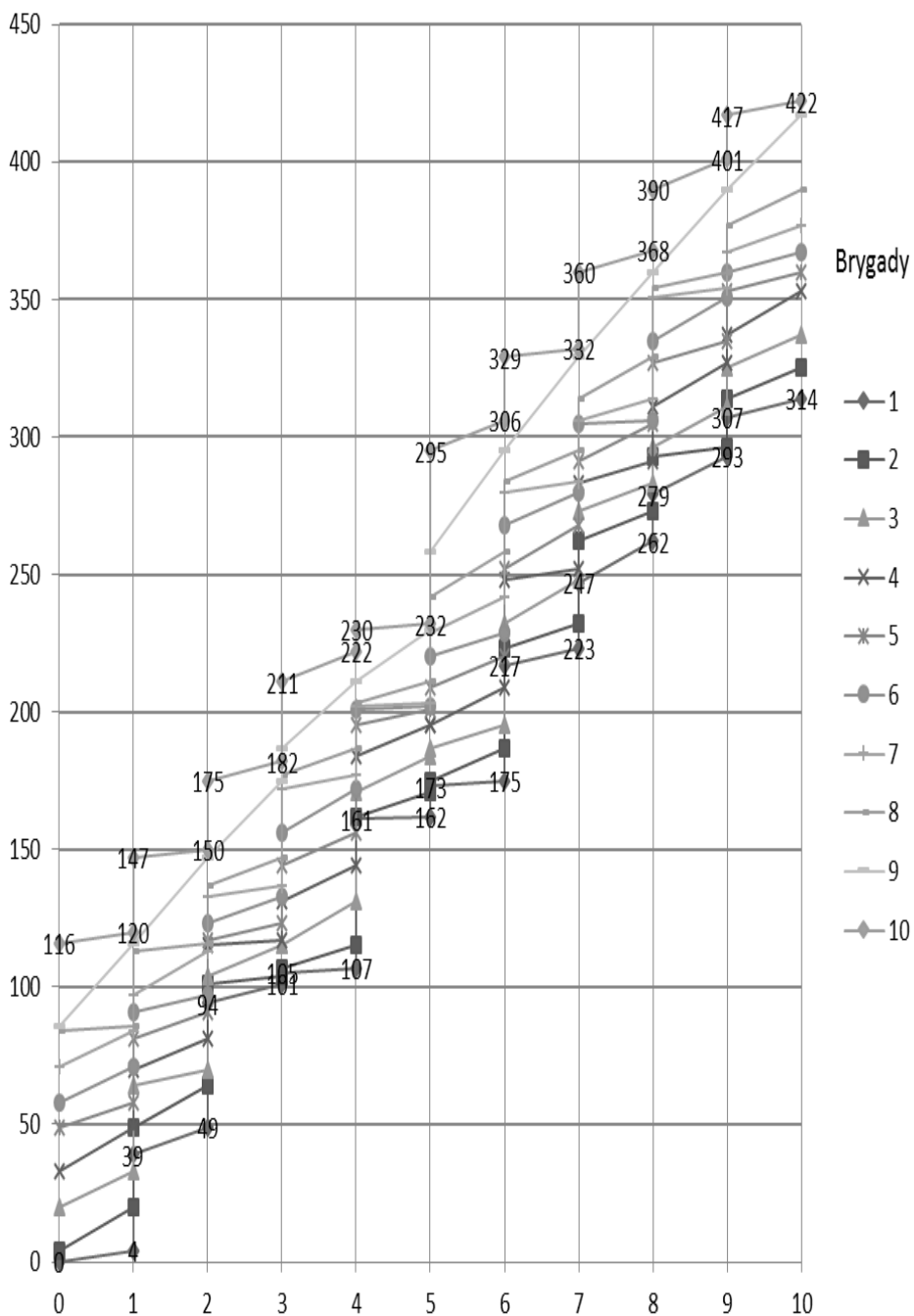
Tab. 10.32. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM II z najbardziej niekorzystną kolejnością działek roboczych

Działki robocze																				
7	5	3	4	4	10	2	9	1	6	8										
0	1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10									
1	0	4	39	49	94	101	105	107	161	162	173	175	217	223	247	262	279	293	307	314
2	4	20	49	64	101	104	107	115	162	171	175	187	223	232	262	273	293	296	314	325
3	20	33	64	70	104	115	115	131	171	184	187	195	232	248	273	283	296	311	325	337
4	33	49	70	81	115	117	131	144	184	195	195	209	248	252	283	291	311	327	337	353
5	49	58	81	91	117	123	144	156	195	201	209	220	252	268	291	305	327	335	353	360
6	58	71	91	97	123	133	156	172	201	202	220	229	268	280	305	306	335	351	360	367
7	71	84	97	113	133	137	172	177	202	203	229	242	280	284	306	314	351	354	367	377
8	84	86	113	116	137	147	177	187	203	211	242	258	284	295	314	329	354	360	377	390
9	86	116	116	147	147	175	187	211	211	230	258	295	295	329	329	360	360	390	390	417
10	116	120	147	150	175	182	211	222	230	232	295	306	329	332	360	368	390	401	417	422

Brygady



Rys. 10.19. Cyklogram TCM II z najmniej korzystną kolejnością działek roboczych dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.20. Cyklogram TCM II z najmniej korzystną kolejnością działek roboczych dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.12. Harmonogram z zastosowaniem TCM III

Zastosowana Metoda Sprzężeń Czasowych TCM III zapewnia minimalizację cyklu realizacji. Przerwy w pracach mogą wystąpić w każdym momencie, jeśli tylko wpływa to korzystnie na czas wykonania całego przedsięwzięcia. Nie występuje w tej metodzie więc ich redystrybucja. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie ścieżki krytycznej.

Dla danych wyjściowych wyznaczono harmonogram według metodyki TCM III. Najwcześniejsze oraz najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych prac przedstawiono w Tab. 10.33 oraz 10.34. Cały harmonogram zaś, przedstawiony został w załączniku nr 12. Przy kolejności działek roboczych zgodnej z tabelą 4.1 ścieżka krytyczna obejmuje zadania: 1-1, 2-1, 3-1, 3-2, 4-2, 5-2, 6-2, 6-3, 7-3, 8-3, 9-3, 10-3, 10-4, 10-5, 10-6, 10-7, 10-8, 10-9, 10-10. Pierwsza z podanych par liczb oznacza numer działki roboczej, zaś druga numer procesu.

Całość została przedstawiona graficznie w formie cyklogramów dla najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac, na Rys. 10.21 oraz 10.22. Linie cyklu ukazują znaczną ciągłość w pracach brygad, jednak występują także znaczne przerwy w działaniach. Sięgają one nawet kilkunastu jednostek. Cykl realizacji wynosi: 234 jednostki.

Tab. 10.33. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM III

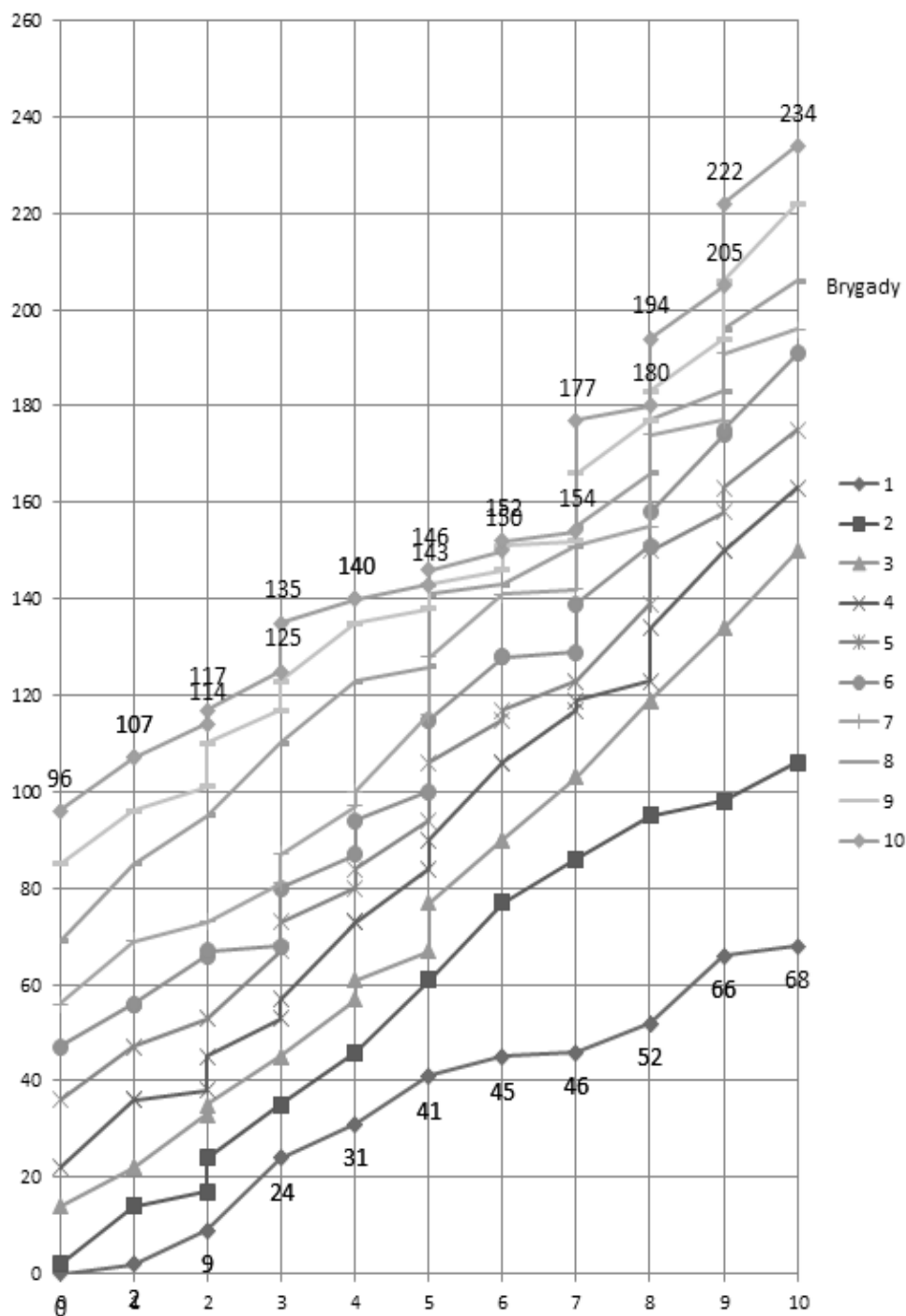
Działki robocze																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
1	0	2	2	9	24	24	31	31	41	41	45	45	46	46	52	52	66	66	68
2	2	14	14	17	24	35	35	46	46	61	61	77	77	86	86	95	95	98	106
3	14	22	22	33	35	45	45	57	61	67	77	90	90	103	103	119	119	134	150
4	22	36	36	38	45	53	57	73	73	84	90	106	106	117	119	123	134	150	163
5	36	47	47	53	53	67	73	80	84	94	106	115	117	123	123	139	150	158	175
6	47	56	56	66	67	68	80	87	94	100	115	128	128	129	139	151	158	174	191
7	56	69	69	73	73	81	87	97	100	116	128	141	141	142	151	155	174	177	191
8	69	85	85	95	95	110	110	123	123	126	141	143	143	151	155	166	177	183	206
9	85	96	96	101	110	117	123	135	135	138	143	146	151	152	166	177	183	194	222
10	96	107	107	114	117	125	135	140	140	143	146	150	152	154	177	180	194	205	234

Brygady

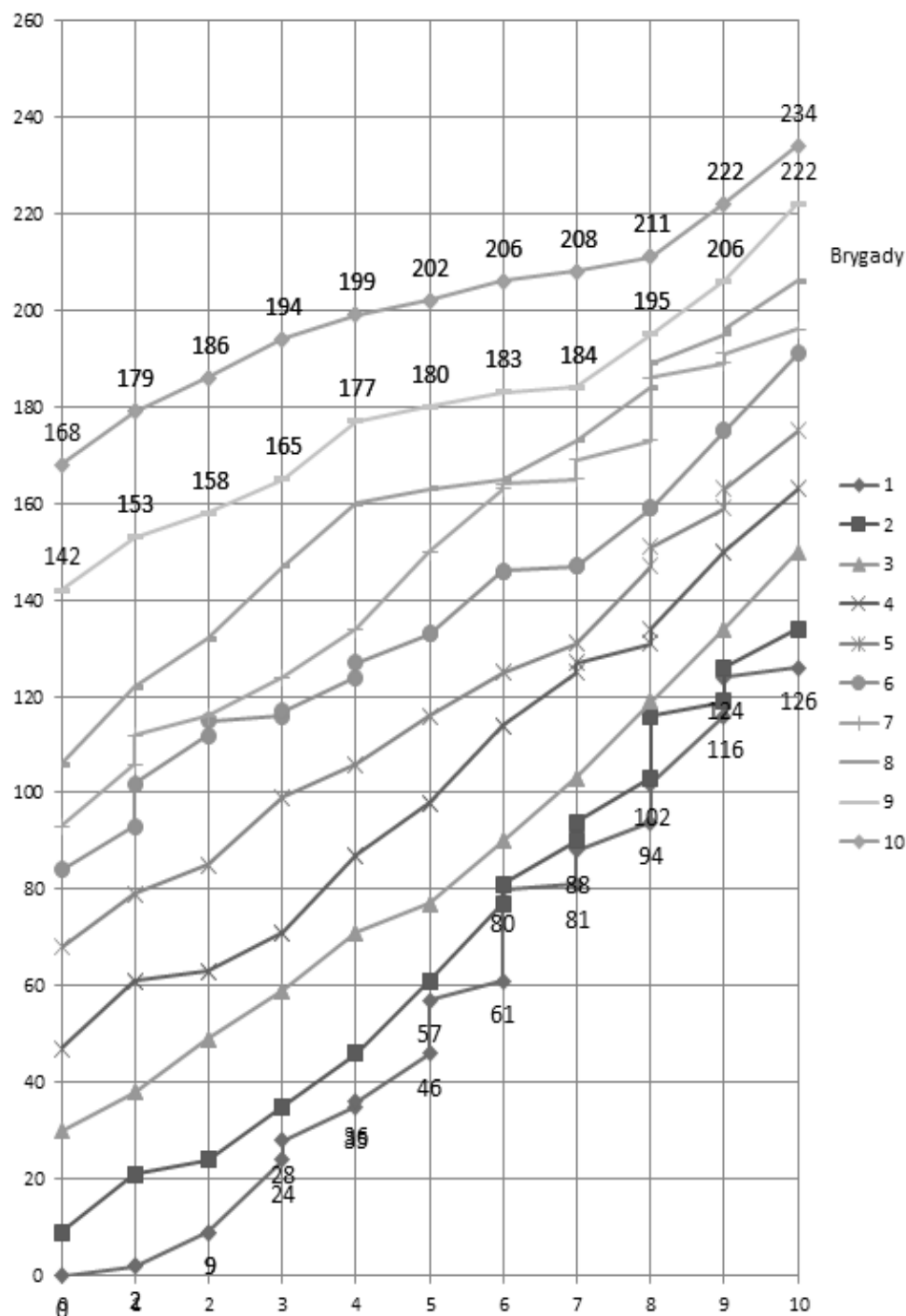
Tab. 10.34. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM III

Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	0	2	2	9	24	28	35	36	46	57	61	80	81	88	94	102	116	124	126	
2	9	21	21	24	24	35	35	46	46	61	61	77	81	90	94	103	116	119	126	134
3	30	38	38	49	49	59	59	71	71	77	77	90	90	103	103	119	119	134	134	150
4	47	61	61	63	63	71	71	87	87	98	98	114	114	125	127	131	134	150	150	163
5	68	79	79	85	85	99	99	106	106	116	116	125	125	131	131	147	151	159	163	175
6	84	93	102	112	115	116	117	124	127	133	133	146	146	147	147	159	159	175	175	191
7	93	106	112	116	116	124	124	134	134	150	150	163	164	165	169	173	186	189	191	196
8	106	122	122	132	132	147	147	160	160	163	163	165	165	173	173	184	189	195	196	206
9	142	153	153	158	158	165	165	177	177	180	180	183	183	184	184	195	195	206	206	222
10	168	179	179	186	186	194	194	199	199	202	202	206	206	208	208	211	211	222	222	234

Brygady



Rys. 10.21. Cyklogram TCM III dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.22. Cyklogram TCM III dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.13. Harmonogram z zastosowaniem TCM III i metody Goldratta

Do harmonogramowania robót zastosowano metodę TCM III z łańcuchem krytycznym E. Goldratta. Wymagało to jednak odmiennego podejścia niż w poprzednich przypadkach. Jest to efekt większej zależności od siebie poszczególnych procesów. Większość z nich (nie uwzględniając tych rozpoczynających daną ścieżkę podkrytyczną) posiada dwóch poprzedników. Dodatkowo zawsze koniec jednego z nich jest początkiem dla danego procesu. Luki czasowe pomiędzy procesami są, więc niewielkie. Z tego powodu nie jest możliwe umieszczenie bufora zasilającego dla ścieżki podkrytycznej, który by nie wpływał na przebieg głównej ścieżki krytycznej. Umieszczone, więc w harmonogramie bufony zasilające w większości przypadków generują dodatkowe przerwy w pracach na ścieżce krytycznej.

Zgodnie z koncepcją Goldratta zastosowano skrócenie czasu trwania zadań ścieżki krytycznej o 50% czasu podstawowego i tyle samo dla pozostałych procesów.

Harmonogram został przedstawiony został w załączniku, natomiast poniżej zamieszczono dane dla cyklogramów. Tab. 10.35 przedstawia najwcześniejsze czasy rozpoczęcia oraz zakończenia procesów i buforów czasowych. Jak można zauważyć termin końcowy przedsięwzięcia z uwzględnieniem bufora projektu skrócił się do 207 jednostek, czyli około 12% w stosunku do pierwszej wersji harmonogramu. Zostało to przedstawione graficznie za pomocą cyklogramu na Rys. 10.23

Tab. 10.36 i wykres na Rys. 10.24 przedstawiają harmonogram dla najpóźniejszych czasów rozpoczęcia prac.

Tab. 10.35. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z metodą TCM III i metodą Goldratta

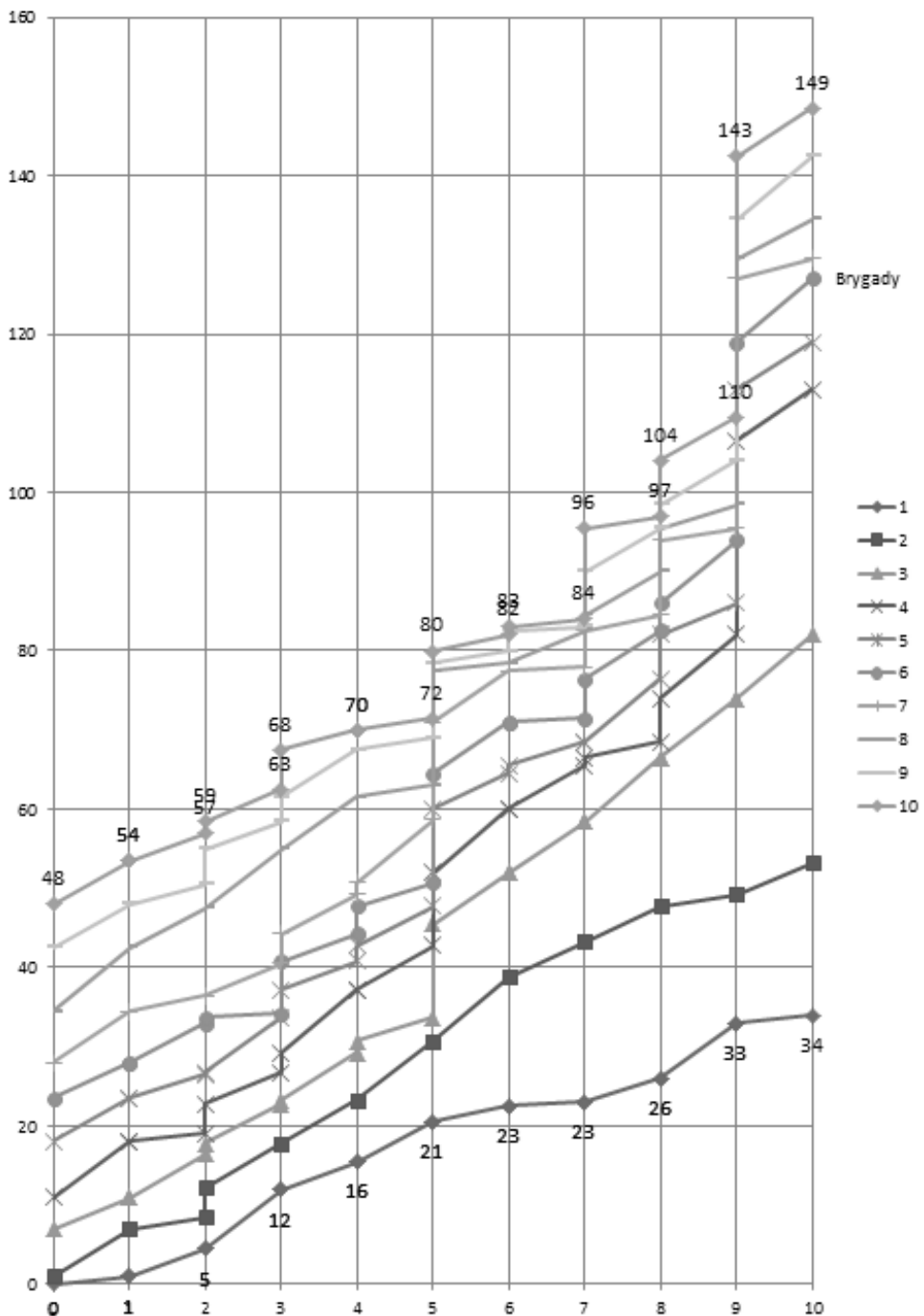
Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
1	0	1	1	5	5	12	12	16	16	21	21	23	23	23	23	26	26	33	33	34
2	1	7	7	9	12	18	18	23	23	31	31	39	39	43	43	48	48	49	49	53
3	7	11	11	17	18	23	23	29	31	34	46	52	52	59	59	67	67	74	74	82
4	11	18	18	19	23	27	29	37	37	43	52	60	60	66	67	69	74	82	107	113
5	18	24	24	27	27	34	37	41	43	48	60	65	66	69	69	77	82	86	113	119
6	24	28	28	33	34	34	41	44	48	51	65	71	71	72	77	83	86	94	119	127
7	28	35	35	37	37	41	44	49	51	59	71	78	78	78	83	85	94	96	127	130
8	35	43	43	48	48	55	55	62	62	63	78	79	83	85	90	96	99	130	135	
9	43	48	48	51	55	59	62	68	68	69	79	80	83	83	90	96	99	104	135	143
10	48	54	54	57	59	63	68	70	70	72	80	82	83	84	96	97	104	110	143	149

Brygady

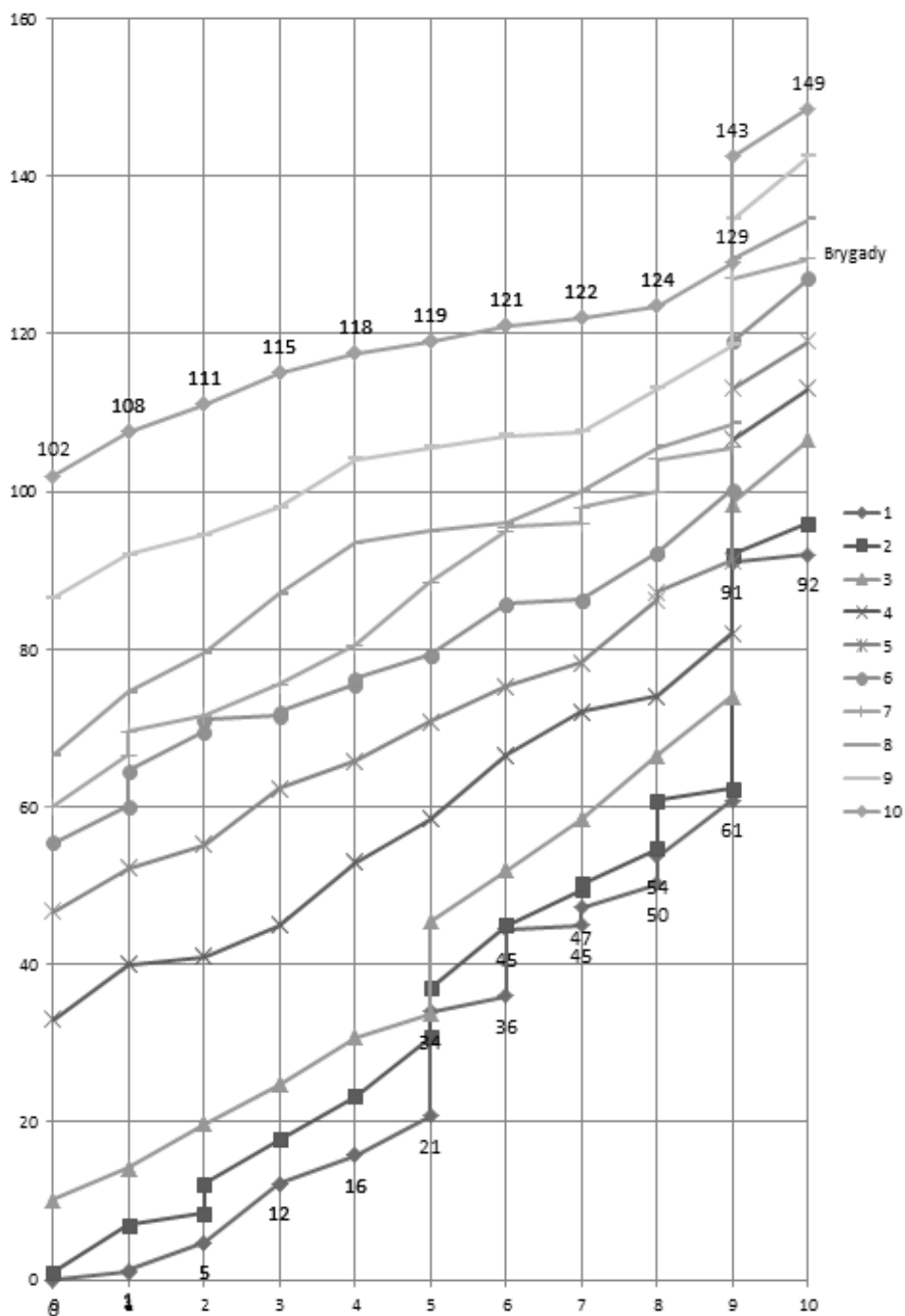
Tab. 10.36. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z metodą TCM III i metodą Goldratta

Działki robocze																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
1	0	1	1	5	5	12	12	16	16	21	34	36	45	45	47	50	54	61	91	92
2	1	7	7	9	12	18	18	23	23	31	37	45	45	50	50	55	61	62	92	96
3	10	14	14	20	20	25	25	31	31	34	46	52	52	59	59	67	67	74	99	107
4	33	40	40	41	41	45	45	53	53	59	59	67	67	72	72	74	74	82	107	113
5	47	52	52	55	55	62	62	66	66	71	71	75	75	78	78	86	87	91	113	119
6	56	60	65	70	71	72	72	76	76	79	86	86	86	86	86	92	92	100	119	127
7	60	67	70	72	72	76	76	81	81	89	89	95	96	96	98	100	104	106	127	130
8	67	75	75	80	80	87	87	94	94	95	95	96	96	100	100	106	106	109	130	135
9	87	92	92	95	95	98	98	104	104	106	106	107	107	108	108	113	113	119	135	143
10	102	108	108	111	111	115	115	118	118	119	119	121	121	122	122	124	124	129	143	149

Brygady



Rys. 10.23. Cyklogram TCM III z metodą Goldratta dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac.



Rys. 10.24. Cyklogram TCM III z metodą Goldratta dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.3.14. Harmonogram z zastosowaniem TCM III i optymalną kolejnością działek roboczych

Kolejność działek roboczych przetasowano w taki sposób, aby uzyskać możliwie najkrótszy czas wykonania. Dodatek Solver programu MS Excel wyznaczył kolejność: 10, 4, 3, 1, 2, 5, 9, 8, 6, 7. Warto zauważyć, iż w tym przypadku, podobnie jak w TCM I, prace rozpoczynają się na działce o najdłuższym czasie trwania robót. Takie zmiany wpłynęły na przebieg ścieżki krytycznej. W obecnym harmonogramie możliwe jest wyznaczenie jej na kilka sposobów. Na potrzeby dalszych obliczeń przyjęto, ścieżkę krytyczną kolejno obejmującą zadania: 10-1, 10-2, 10-3, 10-4, 4-4, 3-4, 1-4, 2-4, 5-4, 9-4, 9-5, 9-6, 8-6, 6-6, 6-7, 6-8, 7-8, 7-9, 7-10. Pierwsze liczby z podanych par oznaczają nr działki roboczej, zaś drugie nr procesu.

Tak jak to zostało przedstawione w Tab. 10.37 oraz 10.38, zawierających najwcześniejsze oraz najpóźniejsze czasy prac, termin zakończenia prac w tym przypadku wynosi 181 jednostek. Jest to o 23% krócej niż w pierwotnym harmonogramie oraz o 13% krócej niż w harmonogramie z zastosowanym łańcuchem krytycznym. Rys. 10.25 oraz 10.26 przedstawiają to graficznie za pomocą linii cykli.

Tab. 10.37. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM III z optymalną kolejnością działek roboczych

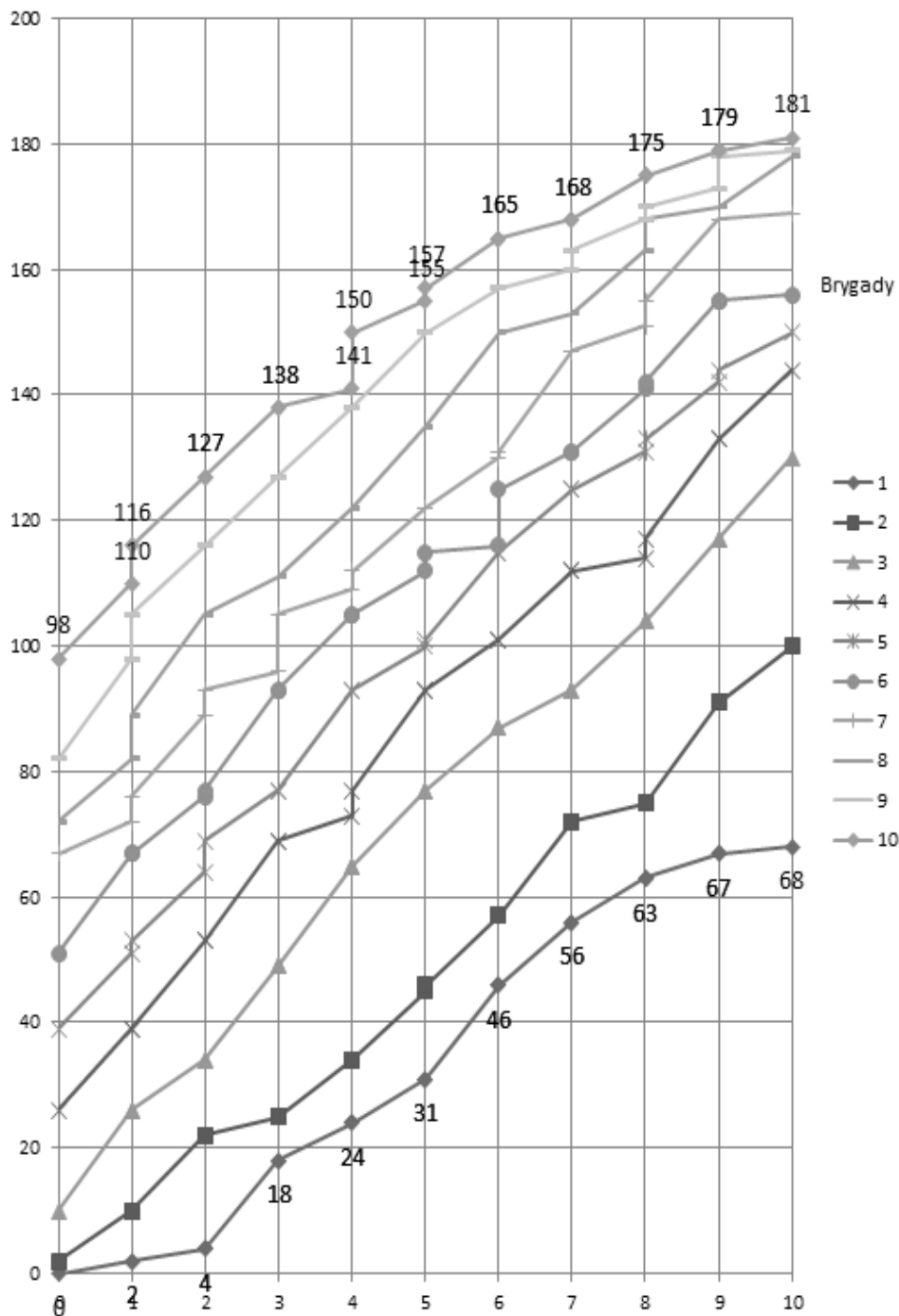
Działki robocze																			
	10	4	3	1	2	5	9	8	6	7									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1									
1	0	2	2	9	24	24	26	26	33	33	43	43	57	57	63	63	67	67	68
2	2	10	10	21	24	35	47	47	50	50	65	65	68	68	77	77	93	93	102
3	10	26	26	38	38	48	48	56	56	67	67	73	73	88	88	104	104	117	130
4	26	39	39	55	55	63	63	77	77	79	79	90	90	106	106	110	117	133	144
5	39	51	51	62	63	77	77	88	88	94	94	104	106	114	114	130	133	142	150
6	51	67	67	74	77	78	88	97	97	107	107	113	114	130	130	142	142	155	156
7	67	72	74	84	84	92	97	110	110	114	114	130	130	133	142	146	155	168	169
8	72	82	84	97	97	112	112	128	128	138	138	141	141	147	147	158	168	170	178
9	82	98	98	110	112	119	128	139	139	144	144	147	147	158	158	169	170	173	179
10	98	110	110	115	119	127	139	150	150	157	157	160	160	171	171	174	174	178	181

Brygady

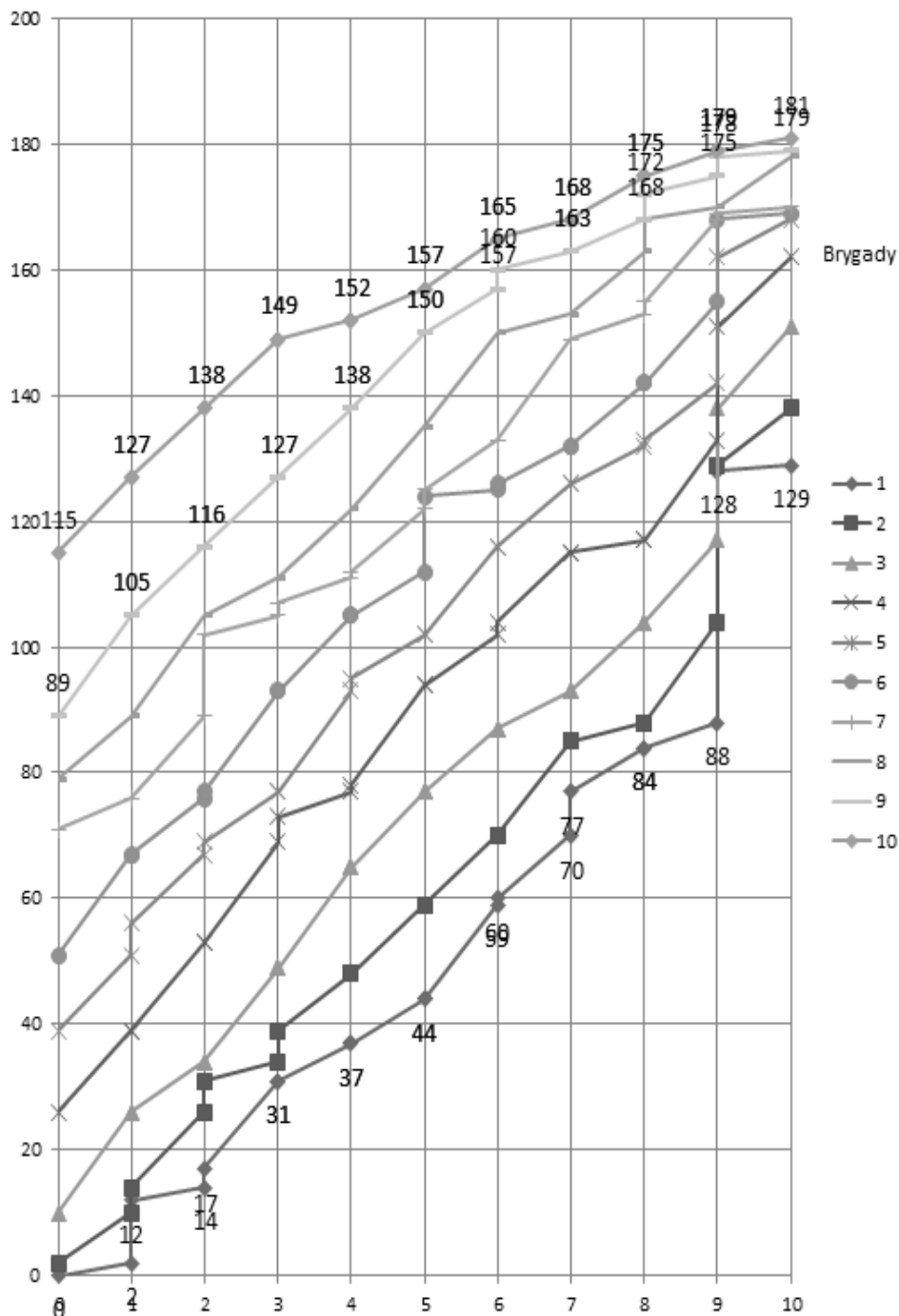
Tab. 10.38. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM III z optymalną kolejnością działek roboczych

Działki robocze																				
	10	4	3	1	2	5	9	8	6	7										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
1	0	2	3	10	10	25	33	35	35	42	42	52	56	70	73	79	84	88	128	129
2	2	10	14	25	25	36	36	48	49	52	52	67	70	73	79	88	88	104	129	138
3	10	26	26	38	38	48	48	56	56	67	67	73	73	88	88	104	104	117	138	151
4	26	39	39	55	55	63	63	77	77	79	79	90	90	106	110	114	117	133	151	162
5	40	52	57	64	64	78	78	89	90	96	96	106	106	114	114	130	133	142	162	168
6	52	68	68	75	88	89	89	98	98	108	108	114	114	130	130	142	142	155	168	169
7	70	75	75	85	90	98	100	113	121	125	125	141	141	144	146	150	155	168	169	170
8	75	85	85	98	98	113	113	129	131	141	141	144	144	150	150	161	168	170	170	178
9	94	110	110	122	122	129	129	140	142	147	147	150	150	161	161	172	172	175	178	179
10	115	127	127	132	132	140	140	151	151	158	158	161	161	172	172	175	175	179	179	181

Brygady



Rys. 10.25. Cyklogram TCM III z optymalizacją kolejności działek roboczych dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót



Rys. 10.26. Cyklogram TCM III z optymalizacją kolejności działek roboczych dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia robót

10.3.15. Harmonogram z zastosowaniem TCM III z optymalną kolejnością działek roboczych i łańcuchem krytycznym

Koncepcje łańcucha krytycznego E. Goldratta zastosowano także dla harmonogramu ze zoptymalizowaną kolejnością działek roboczych. W tym przypadku również konieczne było podzielenie buforów zasilających na mniejsze, obejmujące jedynie część ścieżki, a niekiedy pojedyncze zadanie. Uniknięto w ten sposób wpływu na ustaloną wcześniej ścieżkę krytyczną, co za tym idzie opóźnienie terminu zakończenia robót.

Analogicznie do wcześniejszych przypadków stosowania łańcucha krytycznego ścieżkę krytyczną i pozostałe procesy skrócono o 50%. Wartości buforów wynoszą 50% tych czasów.

Całkowity czas przedsięwzięcia po zastosowaniu do harmonogramu koncepcji Goldratta wynosi 177 jednostek. Jest to czas krótszy o 32% od czasu początkowej wersji organizacji robót. W stosunku do TCM III z łańcuchem krytycznym, lecz bez optymalizacji kolejności działek roboczych jest redukcja czasu o 14%. Porównując natomiast do wersji poddanej jedynie przetasowaniu kolejności zachodzi zysk czasu równy jedynie 2%. Tab. 10.39 oraz 10.40 przedstawiają najwcześniejsze oraz najpóźniejsze terminy rozpoczęcia poszczególnych prac.

Rys. 10.27 oraz 10.28 przedstawiają cyklogramy ilustrujące przebieg prac dla tego harmonogramu. Długie łamane linie reprezentują pracę w danym sektorze, zaś krótkie odpowiadają zasilającym umieszczonym pomiędzy cyklami.

Tab. 10.39. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM III z optymalną kolejnością działek roboczych i metodą Goldratta

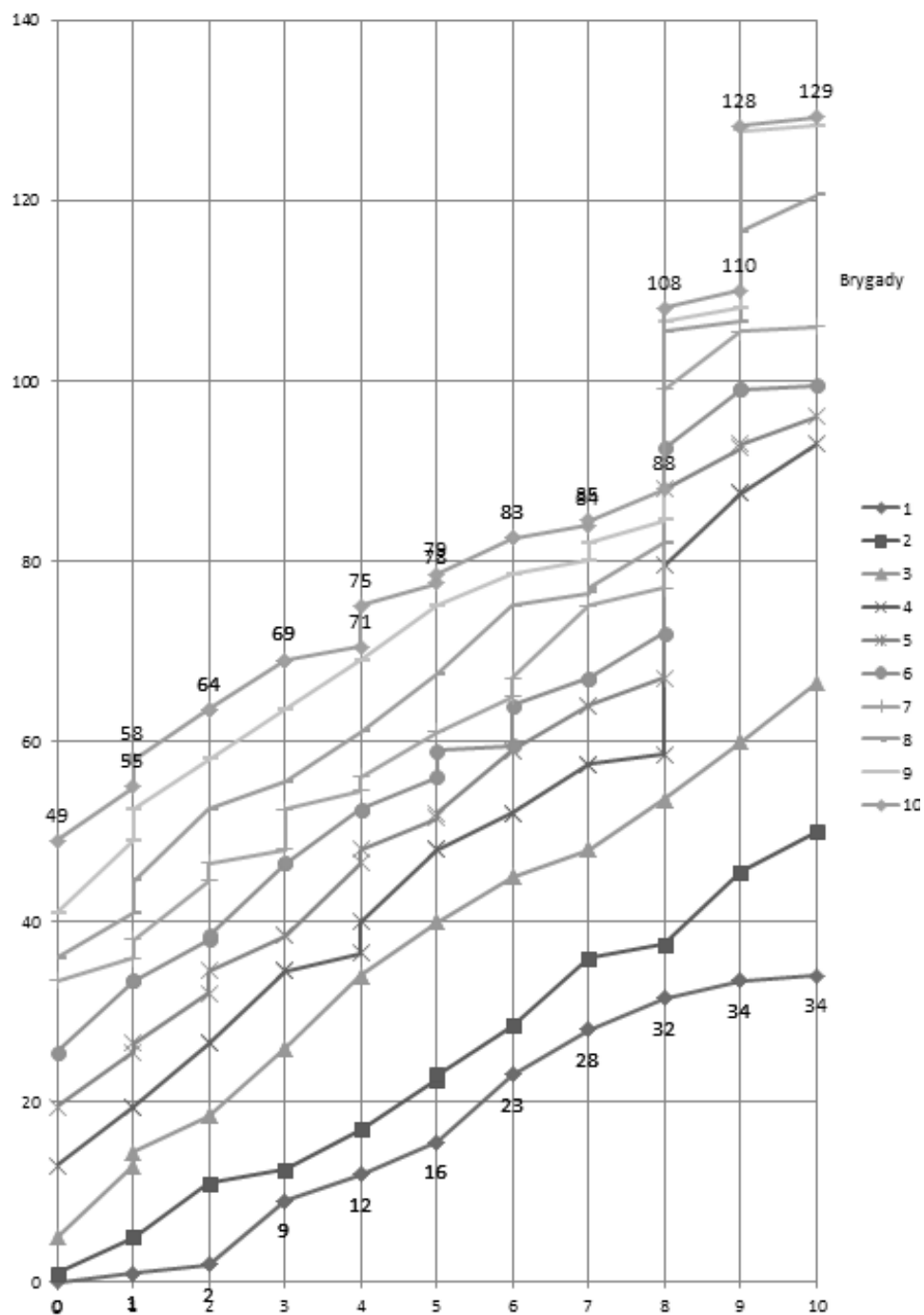
Działki robocze																			
	10	1	9	8	4	3	5	2	6	7									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
1	0	1	2	9	12	16	23	28	32	34	34								
2	1	5	11	13	17	23	29	36	38	46	50								
3	5	13	19	26	34	40	45	48	54	60	67								
4	13	20	27	35	37	40	48	58	59	80	88	93							
5	20	26	32	35	39	47	48	52	59	64	67	88	93	96					
6	26	34	34	38	39	47	53	56	60	64	67	72	93	99	100				
7	34	36	38	45	47	48	53	55	61	65	67	75	75	77	99	106	106		
8	36	41	45	53	53	56	61	61	68	68	75	75	77	77	82	106	107	117	121
9	41	49	53	58	58	64	64	69	75	75	79	80	82	85	107	108	128	128	128
10	49	55	58	64	64	69	71	75	78	79	83	84	85	88	108	110	128	128	129

Brygady

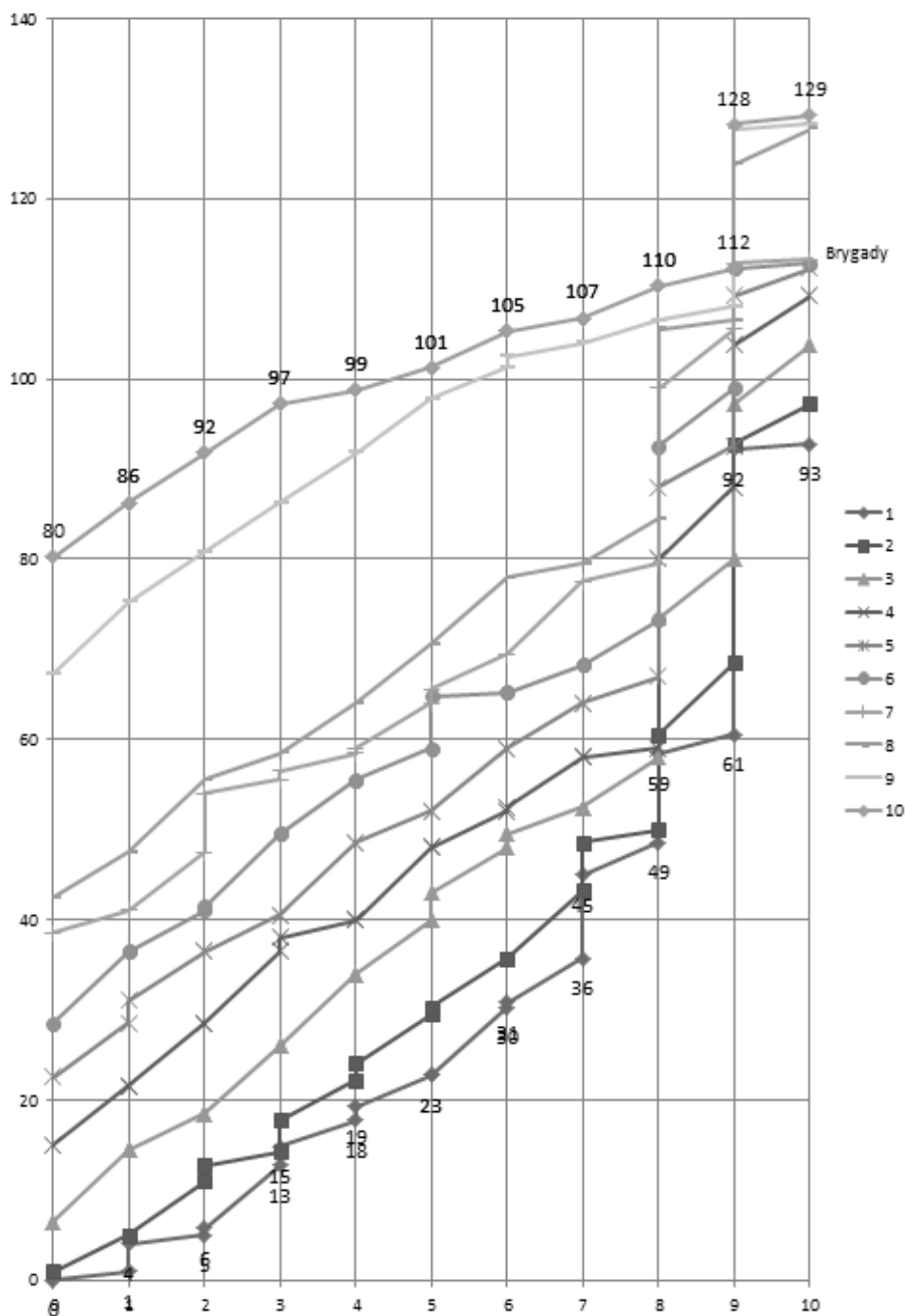
Tab. 10.40. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM III z optymalną kolejnością działek roboczych i metodą Goldratta

Działki robocze																				
	10	1	9	8	4	3	5	2	6	7										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	0	1	4	5	6	13	15	18	19	23	23	30	31	36	45	49	59	61	92	93
2	1	5	5	11	13	14	18	22	24	30	30	36	36	43	49	50	61	69	93	97
3	7	15	15	19	19	26	26	34	34	40	43	48	50	53	53	58	74	80	97	104
4	15	22	22	29	29	37	38	40	40	48	48	52	53	58	58	59	80	88	104	109
5	23	29	31	37	37	41	41	49	49	52	52	59	59	64	64	67	88	93	109	112
6	29	37	37	41	42	50	50	56	56	59	65	65	65	68	68	73	93	99	112	113
7	39	41	41	48	54	56	57	59	59	64	66	70	70	78	78	80	99	106	113	113
8	43	48	48	56	56	59	59	64	64	71	71	78	78	80	80	85	106	107	124	128
9	67	75	75	81	81	86	86	92	92	98	98	101	103	104	104	107	107	108	128	128
10	80	86	86	92	92	97	97	99	99	101	101	105	105	107	107	110	110	112	128	129

Brygady



Rys. 10.27. Cyklogram TCM III z optymalizacją kolejności działek roboczych oraz metodą Goldratta dla najwcześniejszych dat rozpoczęcia prac



Rys. 10.28. Cyklogram TCM III z optymalizacją kolejności działek roboczych oraz metodą Goldratta dla najpóźniejszych dat rozpoczęcia prac

10.3.16. Harmonogram z zastosowaniem TCM III i najbardziej niekorzystną kolejnością działek roboczych

Dla pokazania pełnego potencjału wpływu zmiany kolejności działek roboczych na czas trwania przedsięwzięcia przedstawiono poniżej harmonogram z TCM III dla najmniej efektywnej ich kolejności. Jest on punktem odniesienia dla wersji z optymalną sekwencją sektorów robót. Jak zostało przedstawione w Tab. 10.41 oraz 10.42, zawierających najwcześniejsze oraz najpóźniejsze terminy rozpoczęcia robót, czas przedsięwzięcia w tym przypadku wyniósł 259 jednostek. Oznacza to, iż całkowity czas projektu jest dłuższy o około 10 procent niż w TCM III bez żadnych zmian oraz o 43% dłuższy niż z zastosowaniem TCM III i najbardziej efektywną kolejnością działek roboczych. Wykresy na Rys. 10.29 i 10.30 przedstawiają cyklogramy dla wyżej wymienionych tabel.

Tab. 10.41. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM III z najbardziej niekorzystną kolejnością działek roboczych

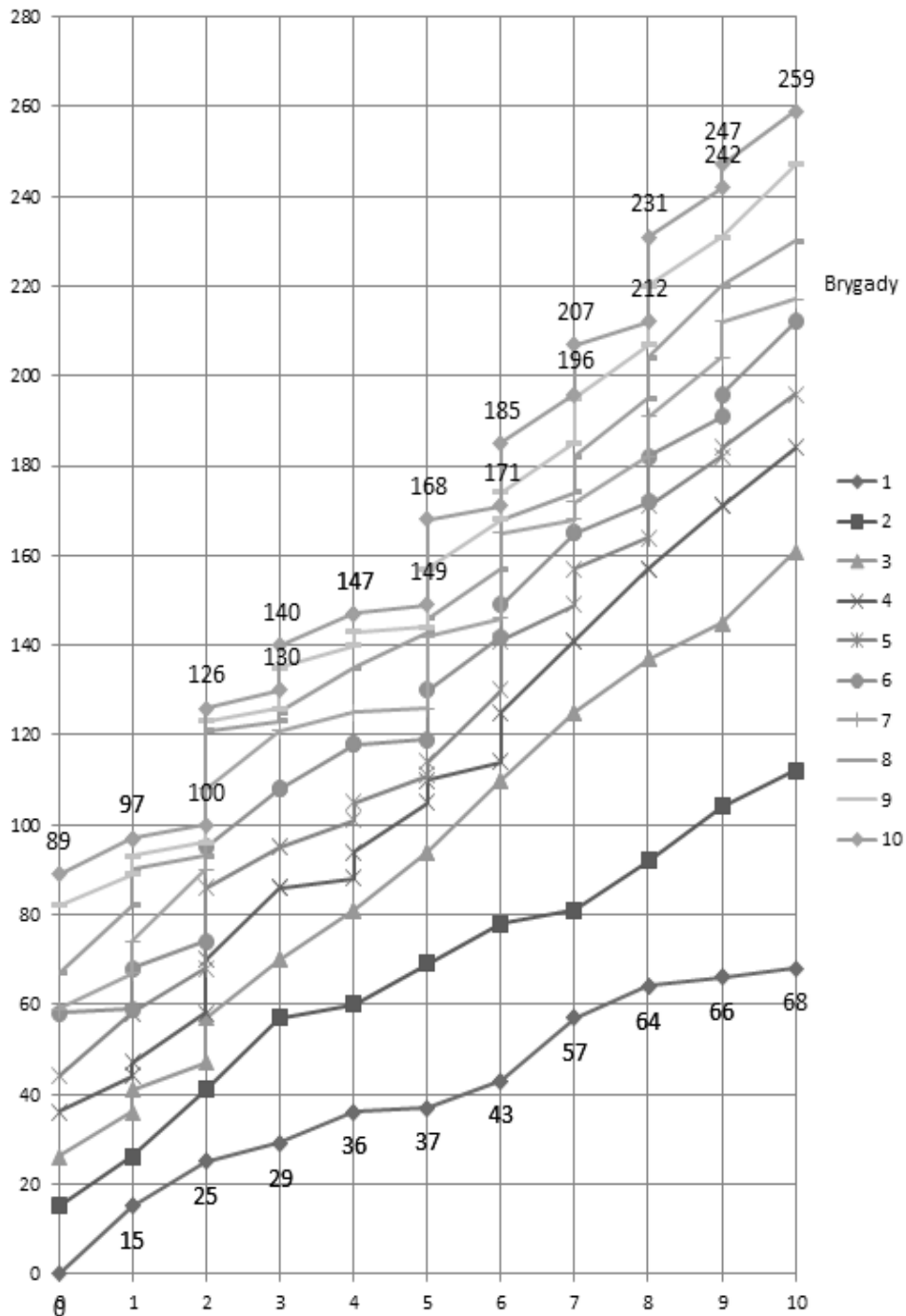
Działki robocze										
	3	5	6	8	2	7	9	4	1	10
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	15	25	29	35	42	43	57	64	66
2	15	26	41	57	66	69	78	81	92	104
3	26	36	41	70	86	97	110	125	137	145
4	36	44	47	58	70	86	99	110	121	141
5	44	58	68	86	95	111	117	121	127	141
6	58	59	68	74	95	108	111	123	133	134
7	59	67	74	90	108	121	123	133	137	138
8	67	82	90	93	121	123	138	148	156	168
9	82	89	93	96	123	126	138	149	154	156
10	89	97	97	100	126	130	149	152	161	163

Brygady

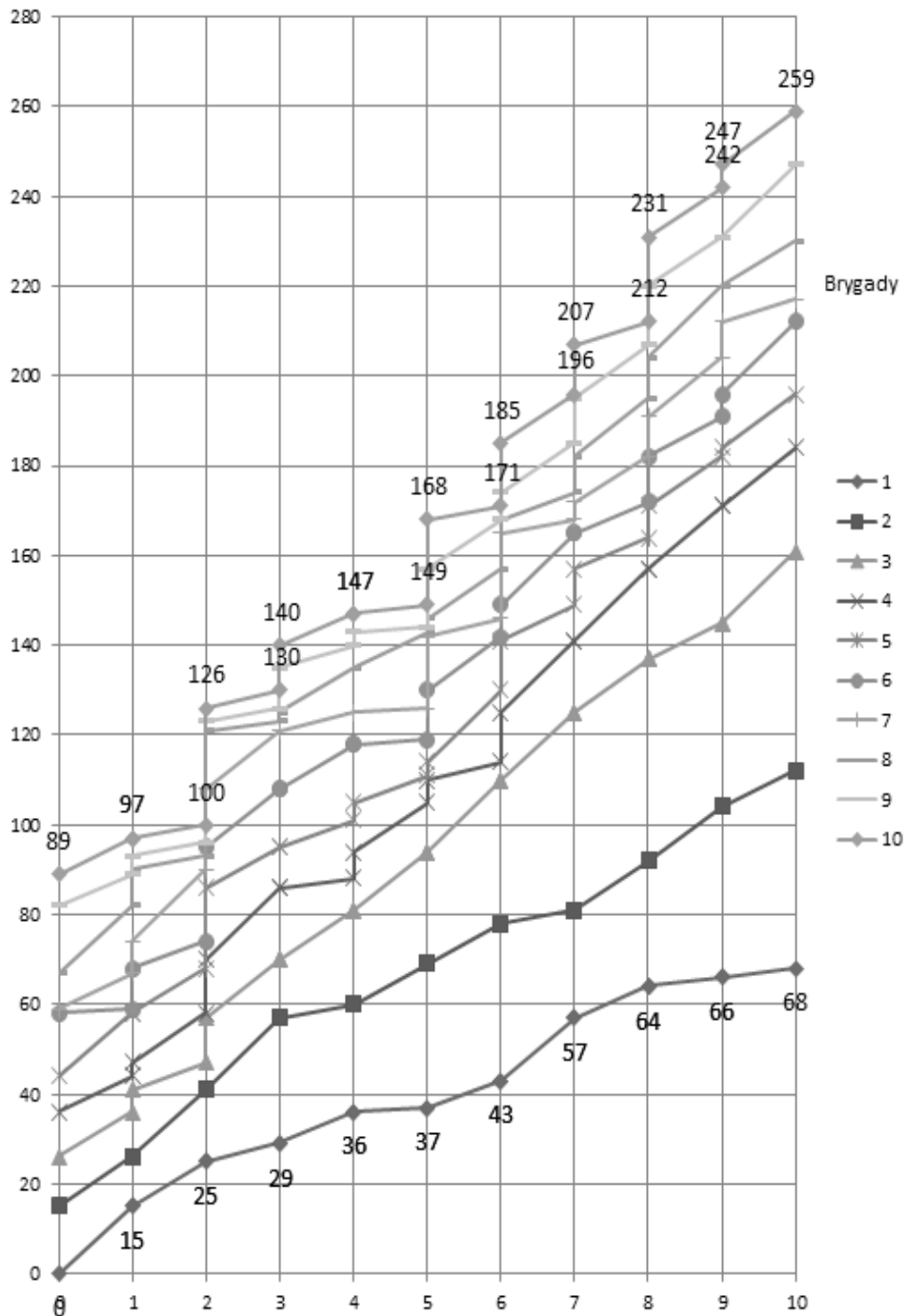
Tab. 10.42. Najpóźniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach w TCM III z najbardziej niekorzystną kolejnością działek roboczych

Działki robocze																				
	3	5	6	6	8	8	2	7	9	4	1	10								
0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7	7	8	8	9	9	10		
1	0	15	16	26	37	41	55	61	76	83	87	88	93	107	111	118	135	137	149	151
2	15	26	26	41	41	57	61	70	83	86	88	97	107	110	118	129	137	149	151	159
3	41	51	51	57	57	70	70	86	86	97	97	110	110	125	129	141	149	157	159	175
4	73	81	81	92	92	108	108	112	112	114	114	125	125	141	141	157	157	171	175	188
5	86	100	100	110	110	119	119	135	138	144	144	150	150	158	164	171	171	182	188	200
6	114	115	116	122	122	135	135	147	147	157	157	158	158	174	174	181	182	191	200	216
7	115	123	123	139	139	152	152	156	163	167	176	177	178	181	181	191	191	204	216	221
8	136	151	151	154	154	156	156	167	167	177	177	185	185	191	191	204	204	220	221	231
9	167	174	174	177	177	180	180	191	191	196	196	197	197	208	208	220	220	231	231	247
10	193	201	201	204	204	208	208	211	211	218	218	220	220	231	231	236	236	247	247	259

Brygady



Rys. 10.29. Cyklogram TCM III z najmniej korzystną kolejnością działek roboczych dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia prac



Rys. 10.30. Cyklogram TCM III z najmniej korzystną kolejnością działek roboczych dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia prac

10.4. Wnioski z analizy

Przeprowadzona analiza porównawcza umożliwia określenie wpływu założeń modelowych i zastosowanych hybrydowych metod obliczeniowych na czasy realizacji procesów budowlanych. Wykonane obliczenia pokazały możliwości zastosowania prezentowanych w pracy metod obliczeniowych w szczególności z zastosowaniem systemów potokowych typu TCM I, II, III oraz z uwzględnieniem metody Goldratta i zmiany kolejności działań roboczych. Łączne czasy trwania przedsięwzięcia w zależności od zastosowanej metody lub zestawu metod zostały przedstawione w Tab. 10.43.

Tab. 10.43. Zestawienie terminów zakończenia robót dla poszczególnych wariantów

Modyfikacja harmonogramu	TCM I [jedn. czasu]	TCM II [jedn. czasu]	TCM III [jedn. czasu]
TCM bez zmian	268	405	234
TCM + metoda Goldratta	175	190	207
TCM + optymalizacja kolejności	203	344	181
Optymalizacja kolejności i metoda Goldratta	144	103	177
Maksymalny cykl	312	422	259

Dla danych z Tab. 10.12 z uwzględnieniem przyjętej kolejności działań roboczych najkrótszy cykl wykonania uzyskano stosując metodę TCM III zapewniającą 234 jednostki. Pozostałe cykle realizacji są zróżnicowane od 15% do 70%.

Dla zmienionych kolejności działań, najkrótszy czas cyklu zapewnia użycie trzeciej metody TCM III (181 jednostek), niewiele gorszy jest wariant z zastosowaniem metody pierwszej, TCM I (203 jednostek), natomiast zastosowanie drugiej metody TCM II (344 jednostek).

Wykorzystanie metody Goldratta w każdym z przypadków zastosowania metod TCM korzystnie wpływa na czas trwania przedsięwzięcia, jednak w różnym stopniu zależnie od wyboru metody TCM. Największe różnice dotyczą zastosowania drugiej metody TCM II. Czas cyklu został skrócony niemal o połowę. W ten sposób zniwelowana została duża różnica w łącznym czasie przedsięwzięcia.

Najmniejsze zmiany wynikają z zastosowania metody Goldratta w harmonogramie z użyciem TCM III. Przerwy robocze, wynikające z obliczeń są "niewielkie", co powoduje, że wprowadzanie buforów zasilających generuje dodatkowe przestoje.

Najkrótsze czasy trwania przedsięwzięcia otrzymano wprowadzając do obliczeń procedurę wyznaczania kolejności działek roboczych oraz metodę Goldratta. Takie połączenie pozwoliło skrócić czas z zastosowaniem TCM I o 47%, TCM II o 57% i TCM III o 24% w stosunku do pierwotnych wersji harmonogramu.

Porównując wyniki zastosowania metod sprzężeń czasowych w harmonogramowaniu robót budowlanych w wariantach z najbardziej i najmniej efektywną kolejnością działek roboczych, w każdym z przypadków, uzyskano kilkunastoprocentowy efekt skrócenia czasu trwania przedsięwzięcia. Pomiedzy najbardziej i najmniej efektywną kolejnością występuje, co najmniej 20% różnica cyklu realizacji.

Tab. 10.44, 10.45 oraz 10.46 przedstawiają procentowy wpływ modyfikacji na poszczególne harmonogramy.

Tab. 10.44. Procentowy wpływ kolejności działek roboczych oraz metody Goldratta na TCM I

TCM I	Jednostki czasu	%
Założona kolejność	268	100
Metoda Goldratta	159	59
Optymalna kolejność	203	76
Optymalna kolejność i metoda Goldratta	144	53
Maksymalna długość cyklu	312	116

Tab. 10.45. Procentowy wpływ kolejności działek roboczych oraz metody Goldratta na TCM II

TCM II	Jednostki czasu	%
Założona kolejność	405	100

Metoda Goldratta	190	47
Optymalna kolejność	344	85
Optymalna kolejność i metoda Goldratta	103	25
Maksymalna długość cyklu	422	104

Tab. 10.46. Procentowy wpływ kolejności działań roboczych oraz metody Goldratta na TCM III

TCM III	Jednostki czasu	%
Założona kolejność	234	100
Metoda Goldratta	207	88
Optymalna kolejność	181	77
Optymalna kolejność i metoda Goldratta	177	76
Maksymalna długość cyklu	259	111

Głównym celem tej części pracy było wykonanie aplikacji pozwalającej na wyznaczanie harmonogramów z zastosowaniem metod TCM I, TCM II oraz TCM III. Wykorzystując aplikację EXCEL porównano ze sobą wyniki obliczeń z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych dla warunków losowych oraz rzeczywistych. Sprawdzone także wpływ zmiany kolejności działań roboczych oraz wpływ zastosowania metody łańcucha krytycznego E. Goldratta na końcowe harmonogramy. Analiza ta oprócz wyłonienia najbardziej efektywnej metody pozwoliła na sprawdzenie poprawności użytkowania aplikacji.

11. Podsumowanie

Aktualnie prowadzone prace badawcze dotyczą modelowania przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem narzędzi sztucznej inteligencji w zakresie szeregowania zadań. Zagadnienia będące przedmiotem zainteresowania obejmują doskonalenie metod sprzężeń czasowych z użyciem algorytmów metaheurystycznych, optymalizację zależności czasowo-kosztowych z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji (algorytmów ewolucyjnych, Tabu Search i in.), harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych z rozmytymi czasami wykonania zadań, optymalne planowanie przedsięwzięć budowlanych z zależnościami typu czas/koszt/zasoby z użyciem algorytmów genetycznych i hybrydowego algorytmu ewolucyjnego.

Monografia ta zawiera rozwiązania zagadnień z praktyki budowlanej głównie z zastosowaniem aplikacji MS EXCEL, do użycia w problemach inżynierskich. Bazuje na założeniach, pojęciach i opracowanych modelach obliczeniowych, stanowiących metodykę TCM. Jest poszerzeniem dotychczas prezentowanych zagadnień o nowe modele i algorytmy obliczeniowe.

Zagadnienia te są kontynuacją problematyki zapoczątkowanej przez Profesora V.A. Afanasjewa i jego zespół. Rozwiązane są zagadnienia wynikające z założeń powstałej w latach 70-tych XX w. metodyki Petersburskiej Szkoły Potokowej Organizacji Robót Budowlanych.

W pracy przedstawiono podstawowe założenia, aparat pojęciowy i techniki obliczeniowe tworzące nowe podejście do rozwiązywania zagadnień harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych. Dotychczasowe prace autorów dotyczyły szeregu zagadnień poszerzających obszar zastosowań, w szczególności obejmują:

- Rozwój i doskonalenie Metod Sprzężeń Czasowych (ang. Time Couplings Method), tj. szczególnych metod o charakterze potokowym, uwzględniające sprzężenia czasowe. W szczególności: analizę zależności technologicznych i organizacyjnych występujących w procesach budowlanych i ich modelowanie. Opracowanie metod obliczeniowych w celu wyznaczenia terminów realizacji z uwzględnieniem kombinacji ograniczeń, z zastosowaniem algorytmu B&B i funkcji celu typu T-min.
- Nowe ujęcie metodologii Metod Sprzężeń Czasowych, opracowanie założeń i odpowiedników pojęć z Teorii szeregowania zadań oraz metodologii typu LSM (Linear Scheduling Methods) LOB (Line of Balance) i inne, do występujących w literaturze światowej.
- Próbę uwzględnienia w harmonogramowaniu robót czynników losowych metodą Goldratta (łańcucha krytycznego CC/BM) z zastosowaniem buforów czasu i teorii ograniczeń.

- Zastosowanie i opracowanie potokowych metod harmonogramowania prac budowlanych z zastosowaniem algorytmów metaheurystycznych, genetycznych, HEA (hybrydowego algorytmu ewolucyjnego W. Bożejko, M. Wodecki).
- Badanie i opracowanie metodyk obliczeń harmonogramów budowlanych z zastosowaniem funkcji celu typu czas/koszt z ograniczeniami zasobowymi.
- Opracowanie i weryfikację na przykładach z praktyki budowlanej nowych metod obliczeniowych w harmonogramowaniu robót budowlanych z zastosowaniem algorytmu Tabu Search i niepewnych danych.

Opracowanie stanowi podsumowanie badań nad rozwojem i doskonaleniem metod harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem Metod Sprzężeń Czasowych. W celu upowszechnienia metodyki przedstawiono liczne przykłady liczbowe ilustrujące opracowane modele i algorytmy obliczeniowe. W pracy przyjęto głównie modele i metody obliczeniowe o charakterze deterministycznym, z uwagi na potrzebę przybliżenia podstawowych metod obliczeniowych, które mogą być zastosowane w obliczeniach inżynierskich z zastosowaniem aplikacji MS EXCEL.

12. Załączniki

1. Harmonogram z zastosowaniem TCM I
2. Harmonogram z zastosowaniem TCM I z łańcuchem krytycznym
3. Harmonogram z zastosowaniem TCM I z optymalną kolejnością działań roboczych
4. Harmonogram z zastosowaniem TCM I z optymalną kolejnością działań roboczych i łańcuchem krytycznym
5. Harmonogram z zastosowaniem TCM I z najgorszą kolejnością działań roboczych
6. Harmonogram z zastosowaniem TCM II
7. Harmonogram z zastosowaniem TCM II z łańcuchem krytycznym
8. Harmonogram z zastosowaniem TCM II z optymalną kolejnością działań roboczych
9. Harmonogram z zastosowaniem TCM II z optymalną kolejnością działań roboczych i łańcuchem krytycznym
10. Harmonogram z zastosowaniem TCM II z najgorszą kolejnością działań roboczych
11. Harmonogram z zastosowaniem TCM III
12. Harmonogram z zastosowaniem TCM III z łańcuchem krytycznym
13. Harmonogram z zastosowaniem TCM III z optymalną kolejnością działań roboczych
14. Harmonogram z zastosowaniem TCM III z optymalną kolejnością działań roboczych i łańcuchem krytycznym
15. Harmonogram z zastosowaniem TCM III z najgorszą kolejnością działań roboczych

Tab. 12.1. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM I

		Procesy																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
Sektory/Działki robocze	1	0	2	9	21	30	38	52	66	76	87	108	117	127	140	140	156	176	187	202	213
			2	12	8	14	11	11	14	11	9	13	16	16	11	11	11	11	11	11	11
	2	2	9	21	24	38	49	66	68	87	93	117	127	140	144	156	166	187	192	213	220
			7	3	11	2	6	6	6	6	6	10	4	10	5	5	5	5	5	5	7
	3	9	24	24	35	49	59	68	76	93	107	127	128	144	152	166	181	192	199	220	228
			15	11	10	8	14	8	8	8	14	1	8	15	15	15	15	15	15	15	15
	4	24	31	35	46	59	71	76	92	107	114	128	135	152	162	181	194	199	211	228	233
			7	11	12	16	7	16	16	16	7	7	10	13	13	13	13	13	13	13	12
	5	24	31	35	46	59	71	76	92	107	114	128	135	152	162	181	194	199	211	228	233
			10	15	6	11	10	11	11	11	10	6	16	3	3	3	3	3	3	3	3
6	41	45	61	77	90	103	119	124	133	141	154	178	191	197	199	214	217	236	240		
		4	16	13	16	9	16	16	16	9	13	13	13	2	2	2	3	3	3	4	
7	45	46	77	86	90	103	119	130	133	139	154	155	191	192	199	207	217	218	240	242	
		1	9	13	11	6	11	11	11	6	1	1	1	1	1	8	8	1	1	2	
8	46	52	86	95	103	119	130	134	139	155	155	167	192	196	207	218	218	229	242	245	
		6	9	16	4	16	4	4	4	16	12	4	4	4	11	11	11	11	11	3	
9	52	66	95	98	119	134	134	150	155	163	167	183	196	199	218	224	229	240	245	256	
		14	3	15	16	8	16	16	16	8	16	3	3	3	6	6	11	11	11	11	
10	66	68	98	106	134	150	150	163	163	175	183	199	199	204	224	234	240	256	268		
		2	8	16	13	12	13	13	13	12	16	5	5	5	10	10	16	16	16	12	
	66	68	98	106	134	150	150	163	163	175	183	199	199	204	224	234	240	256	268		

Tab. 12.2. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM I

		Procesy																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	8Z	10											
Sektory/Działki robocze	1	0	1	5	11	19	26	33	38	44	54	59	64	70	70	78	88	94	94	118	126	131	
		1	6	4	7	6	7	5	5	6	5	5	7	7	8	8	6	6	24	24	126	126	131
	2	0	1	5	11	19	26	33	38	44	54	59	64	70	70	78	88	94	94	102	126	131	
		5	11	12	19	25	33	34	44	47	59	64	70	72	78	83	94	96	96	96	111	131	135
		4	2	6	1	3	5	5	3	3	5	5	2	2	5	5	3	3	15	15	111	131	135
	3	0	1	5	11	19	25	33	34	44	47	59	64	70	72	78	83	94	96	117	131	131	135
		5	12	18	25	30	34	38	47	54	64	64	72	76	83	91	96	100	100	100	122	135	139
		8	6	5	4	7	1	4	4	7	1	4	4	4	8	8	4	4	22	22	122	135	139
	4	0	1	5	12	18	25	30	34	38	47	54	64	72	76	83	91	96	100	112	135	135	139
		16	18	23	30	36	38	46	54	57	64	68	76	81	91	97	100	106	106	106	129	139	141
	4	6	6	8	4	4	8	8	4	4	4	5	5	7	7	6	6	24	24	129	139	141	
5	0	1	5	12	18	23	30	36	46	54	64	68	76	81	91	97	100	106	115	139	139	141	
	16	21	23	31	36	39	46	52	57	62	68	71	81	89	97	99	106	107	107	127	141	143	
	5	8	3	6	5	3	6	6	5	3	3	8	8	2	2	20	20	20	20	127	141	143	
6	0	1	5	12	18	23	30	36	46	54	64	68	71	81	89	97	100	107	121	141	141	143	
	16	21	23	31	36	39	46	52	57	62	68	71	81	89	97	99	106	107	121	141	141	143	
7	0	1	5	12	18	23	30	36	46	54	64	68	71	81	89	97	100	107	121	141	141	143	
	21	23	31	39	45	52	52	60	62	67	71	77	89	96	99	100	107	109	109	131	143	145	
	2	8	7	8	5	7	8	8	5	7	7	7	7	7	8	1	2	2	22	22	143	143	145
8	0	1	5	12	18	23	30	36	46	54	64	68	71	81	89	97	100	107	121	141	141	143	
	21	23	31	39	45	52	52	60	62	67	71	77	89	96	99	100	107	109	109	131	143	145	
	2	8	7	8	5	7	8	8	5	7	7	7	7	7	8	1	2	2	22	22	143	143	145
9	0	1	5	12	18	23	30	36	46	54	64	68	71	81	89	97	100	107	121	141	141	143	
	23	23	39	43	45	52	60	65	67	70	77	78	96	96	100	104	109	109	109	122	145	146	
	1	5	7	6	3	3	1	3	3	1	1	1	1	1	4	4	1	1	13	13	145	146	
10	0	1	5	12	18	23	30	36	46	54	64	68	71	81	89	97	100	107	121	141	141	143	
	23	26	43	48	52	60	65	67	70	78	78	84	96	98	104	109	109	115	115	137	146	147	
	3	4	5	8	8	2	2	8	8	6	6	6	2	2	6	6	6	6	22	22	146	147	
BP	0	1	5	12	18	23	30	36	46	54	64	68	71	81	89	97	100	107	121	141	141	143	
	26	43	48	52	60	65	67	70	78	78	84	96	98	104	109	109	115	123	123	146	146	147	
	33	48	49	60	67	75	78	82	84	84	92	98	100	109	112	115	120	120	143	147	153	153	
	7	2	8	8	4	8	4	8	4	8	8	2	2	3	3	6	6	23	23	147	147	153	
	33	48	49	60	67	75	78	82	84	84	92	98	100	109	112	115	120	124	124	147	147	153	
	34	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	
	33	49	53	67	75	82	82	88	92	92	100	100	102	112	117	120	128	128	153	153	159	159	
	1	4	8	7	6	8	8	8	8	8	8	3	3	5	5	8	8	25	25	153	153	159	

Tab. 12.3. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM I

		Procesy																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
Sektory/Działki robocze	10	0	2	10	10	26	33	46	51	63	63	79	94	99	109	114	130	137	149	
		2	8	16	13	12	16	46	51	63	63	79	94	99	109	114	130	137	149	
	8	2	8	10	19	26	42	46	50	63	79	91	99	103	109	120	130	141	149	152
		6	9	16	4	16	4	4	63	79	91	100	103	103	109	120	130	141	149	152
	1	8	10	19	31	42	50	50	64	79	90	91	100	103	116	120	136	141	152	163
		2	12	8	14	11	9	14	79	90	91	100	103	103	116	120	136	141	152	163
	6	10	14	31	47	50	63	64	80	90	99	100	113	116	129	136	152	155	163	167
		4	16	13	16	9	13	16	80	90	99	100	113	116	129	136	152	155	163	167
	9	14	28	47	50	63	78	80	96	99	107	113	129	129	132	138	144	155	166	178
		14	3	15	16	8	15	16	96	99	107	113	129	129	132	138	144	155	166	178
3	28	43	50	61	78	88	96	104	107	121	129	130	132	140	144	159	166	173	186	
	15	11	10	8	14	10	8	104	107	121	129	130	132	140	144	159	166	173	186	
4	43	50	61	72	88	100	104	120	121	128	130	137	140	150	159	172	173	185	191	
	7	11	12	16	7	12	16	120	121	128	130	137	140	150	159	172	173	185	191	
2	50	57	72	75	100	111	120	122	128	134	137	147	150	154	172	182	185	190	198	
	7	3	11	2	6	11	2	128	134	144	147	153	154	170	172	182	185	190	198	
5	57	67	75	90	111	117	122	133	134	144	147	153	154	170	182	185	190	193	201	
	10	15	6	11	10	6	11	133	134	144	147	153	154	170	182	185	190	193	201	
7	67	68	90	99	117	130	133	144	144	150	153	154	170	171	185	193	193	194	203	
	1	9	13	11	6	13	11	144	144	150	153	154	170	171	185	193	193	194	203	
67	68	90	99	117	130	133	144	144	150	153	154	170	171	185	193	193	194	201	203	

Tab. 12.4. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM I

		Procesy																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10													
Sektory/Działki robocze	10	0	1	1	5	5	13	17	23	26	32	32	40	47	50	50	55	57	65	65	90	95	101	
			1	4	5	10	13	17	23	26	32	32	40	47	50	50	55	57	65	70	25	95	95	101
	8	1	4	5	10	13	21	23	25	32	40	40	46	50	52	55	60	65	71	71	22	93	101	102
		3	5	8	8	2	8	2	2	8	8	6	6	2	2	6	6	6	6	22	22	93	101	102
	1	4	5	10	13	21	23	25	32	40	45	40	46	50	52	55	60	68	71	76	76	100	101	102
		4	5	10	16	21	25	25	32	40	45	46	50	52	58	60	68	71	76	76	24	100	102	108
		1	6	4	7	6	4	7	7	6	6	5	5	7	7	8	8	8	6	6	24	100	102	108
	6	4	5	10	16	21	25	25	32	40	45	46	50	52	58	60	68	71	76	78	22	100	108	110
		5	7	16	24	25	32	32	40	45	50	50	57	58	65	68	69	76	78	78	22	100	108	110
		2	8	7	8	5	7	8	8	5	5	7	7	7	7	68	68	69	76	78	22	100	108	110
9	7	14	24	25	32	39	40	48	50	54	57	65	65	66	69	72	78	83	83	23	106	110	115	
	7	14	24	25	33	40	40	48	50	54	57	65	65	66	69	72	78	83	87	23	110	110	115	
3	14	22	25	31	39	44	48	52	54	61	65	65	66	70	72	80	83	87	87	22	109	115	119	
	8	6	5	4	7	5	4	4	4	7	1	1	4	4	8	8	8	8	4	22	109	115	119	
4	14	22	25	31	41	46	48	52	54	61	65	65	66	70	72	80	83	87	93	24	115	115	119	
	22	25	31	36	44	50	52	60	61	64	65	69	70	75	80	86	87	93	93	24	116	119	122	
2	25	31	36	46	52	60	61	68	61	64	65	69	70	75	80	86	87	93	95	24	119	119	122	
	22	25	31	36	46	52	52	60	61	64	65	69	70	75	80	86	87	93	95	24	119	119	122	
5	25	29	36	38	50	56	60	61	64	67	69	74	75	77	86	91	93	95	95	15	110	122	125	
	4	4	2	2	3	6	1	1	6	3	5	5	2	2	5	5	91	93	15	15	110	122	125	
7	25	29	36	38	52	57	60	61	64	67	69	74	75	77	86	91	93	95	107	20	122	122	125	
	29	34	38	45	56	59	61	67	67	72	74	77	77	85	91	93	95	97	20	20	117	125	127	
	5	5	8	8	3	3	6	6	5	5	3	3	8	8	2	2	93	95	20	20	117	125	127	
7	34	34	38	45	57	60	61	67	67	72	74	77	77	85	91	93	95	97	105	13	110	127	128	
	34	45	50	59	65	67	72	72	75	77	77	85	85	86	93	97	97	97	13	13	110	127	128	
	1	5	7	6	3	1	6	6	3	3	1	1	1	1	4	4	4	4	1	13	127	128	128	
BP	34	34	45	50	60	67	72	72	75	77	77	85	85	86	93	97	97	97	114	128	128	144	144	
																						17	144	

Tab. 12.5. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM I

		Procesy																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
5	0	10	10	25	37	43	62	73	95	105	131	137	148	164	185	188	220	223	246	249
	10	15	6	11	10	6	10	11	10	105	131	137	148	164	185	188	220	223	246	249
6	10	14	25	41	43	56	73	89	105	114	137	150	164	177	188	190	223	226	249	253
	4	16	13	16	9	13	16	16	105	114	137	150	164	177	188	190	223	226	249	253
1	14	16	41	53	56	64	89	103	114	125	150	159	177	190	190	206	226	237	253	264
	2	12	8	14	11	8	14	14	114	125	150	159	177	190	190	206	226	237	253	264
4	14	16	41	53	56	64	89	103	114	125	150	159	177	190	190	206	226	237	253	264
	7	11	12	16	7	12	16	16	114	125	150	159	177	190	190	206	226	237	253	264
7	16	23	53	64	64	76	103	119	125	132	159	166	190	200	206	219	237	249	264	269
	7	11	12	16	7	12	16	16	114	125	150	159	177	190	190	206	226	237	253	264
3	23	24	64	73	76	89	119	130	132	138	166	167	200	201	219	227	249	250	269	271
	1	9	13	11	6	11	11	11	132	138	166	167	200	201	219	227	249	250	269	271
8	24	39	73	84	89	99	130	138	138	152	167	168	201	209	227	242	250	257	271	279
	15	11	10	8	14	10	8	8	138	152	167	168	201	209	227	242	250	257	271	279
2	24	39	73	84	89	99	130	138	138	152	167	168	201	209	227	242	250	257	271	279
	6	9	16	4	16	16	16	16	138	152	167	168	201	209	227	242	250	257	271	279
10	39	45	84	93	99	115	138	142	152	168	168	180	209	213	242	253	257	268	279	282
	6	9	16	4	16	16	16	16	138	152	167	168	201	209	227	242	250	257	271	279
9	45	52	93	96	115	126	142	144	168	174	180	190	213	217	253	263	268	273	282	289
	7	3	11	2	6	11	2	2	168	174	180	190	213	217	253	263	268	273	282	289
10	45	52	93	96	115	126	142	144	168	174	180	190	213	217	253	263	268	273	282	289
	2	8	16	13	12	16	13	13	168	174	180	190	213	217	253	263	268	273	282	289
9	52	54	104	126	142	144	144	157	174	186	190	206	217	222	263	273	273	289	289	301
	2	8	16	13	12	16	13	13	168	174	180	190	213	217	253	263	268	273	282	289
9	52	54	104	126	142	144	144	157	174	186	190	206	217	222	263	273	273	289	289	301
	14	3	15	16	8	15	16	16	186	194	206	222	222	225	273	279	289	300	301	312
9	54	68	104	107	142	157	157	173	186	194	206	222	222	225	273	279	289	300	301	312
	14	3	15	16	8	15	16	16	186	194	206	222	222	225	273	279	289	300	301	312
9	54	68	104	107	142	157	157	173	186	194	206	222	222	225	273	279	289	300	301	312
	14	3	15	16	8	15	16	16	186	194	206	222	222	225	273	279	289	300	301	312

Sektory/Działki robocze

Tab. 12.6. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM II

		TCM II										
		Procesy										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Sektory/Działki robocze	1	0	2	14	22	36	47	56	69	85	115	126
		0	2	14	22	36	47	56	69	85	115	126
		62	69	72	83	85	91	101	105	105	115	146
		62	69	72	83	85	91	101	105	105	115	146
		69 kr	84	84	95	105	113	127	128	136	151	187
		69	84	95	105	113	127	128	136	151	179	187
		96	103	114	126	142	149	156	166	166	179	203
		96	103	114	126	142	149	156	166	166	179	203
		126	136	151	157	168	178	184	184	200	203	222
		126	136	151	157	168	178	184	184	200	203	222
	147	151	167	180	196	205	218	218	231	233	270	
	147	151	167	180	196	205	218	218	231	233	270	
	220	221	230	243	254	260	261	261	262	270	304	
	220	221	230	243	254	260	261	261	262	270	304	
	228	234	243	259	263	279	291	291	295	306	337	
	228	234	243	259	263	279	291	291	295	306	337	
	256	270	273	288	304	312	328	331	331	337	367	
	256	270	273	288	304	312	328	331	331	337	367	
	285	287	295	311	324	336	352	357	357	367	394	
	285	287	295	311	324	336	352	357	357	367	394	

Tab. 12.8. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM II

		Procesy																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
7	0	1	1	10	10	23	23	34	34	40	40	41	41	42	42	50	50	80	80	82
	0	1	1	10	10	23	23	34	34	40	40	41	41	42	42	50	50	80	80	82
2	27	34	34	37	37	48	48	50	50	56	56	66	66	70	70	80	80	111	111	118
	27	34	34	37	37	48	48	50	50	56	56	66	66	70	70	80	80	111	111	118
5	34 kr	44	44	59	59	65	65	76	76	86	86	92	92	108	108	111	111	139	139	142
	34	44	44	59	59	65	65	76	76	86	86	92	92	108	108	111	111	139	139	142
10	57	59	59 kr	67	67	83	83	96	96	108	108	124	124	129	129	139	139	163	163	175
	57	59	59	67	67	83	83	96	96	108	108	124	124	129	129	139	139	163	163	175
1	78	80	80	92	92	100	100	114	114	125	125	134	134	147	147	163	163	182	182	193
	78	80	80	92	92	100	100	114	114	125	125	134	134	147	147	163	163	182	182	193
6	96	100	100	116	116	129	129	145	145	154	154	167	167	180	180	182	182	219	219	223
	96	100	100	116	116	129	129	145	145	154	154	167	167	180	180	182	182	219	219	223
4	136	143	143	154	154	166	166	182	182	189	189	196	196	206	206	219	219	253	253	258
	136	143	143	154	154	166	166	182	182	189	189	196	196	206	206	219	219	253	253	258
3	171	186	186	197	197	207	207	215	215	229	229	230	230	238	238	253	253	284	284	292
	171	186	186	197	197	207	207	215	215	229	229	230	230	238	238	253	253	284	284	292
9	203	217	217	220	220	235	235	251	251	259	259	275	275	278	278	284	284	314	314	325
	203	217	217	220	220	235	235	251	251	259	259	275	275	278	278	284	284	314	314	325
8	236	242	242	251	251	267	267	271	271	287	287	299	299	303	303	314	314	341	341	344
	236	242	242	251	251	267	267	271	271	287	287	299	299	303	303	314	314	341	341	344

Sektory/Działki robocze

Tab. 12.10. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM II

		TCM II																	
		Procesy																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
7	0	4	4	20	33	33	49	49	58	58	71	84	84	86	86	116	116	120	
	4	4	16		13		16		9		13	13		2		30		4	
5	0	4	4	20	33	33	49	49	58	58	71	84	84	86	86	116	116	120	
	39	49	49	64	70	70	81	81	91	91	97	97	113	113	116	147	147	150	
3	10	15	15	64	6	11	11	117	117	123	123	133	133	147	147	175	175	182	
	39	49	64	64	70	70	81	81	91	91	97	97	113	113	116	147	147	150	
4	94	101	104	104	115	115	117	117	123	123	133	133	137	137	147	175	175	182	
	7	3	11	2	2	6	10	10	10	10	10	4	4	10	28	28	7		
10	94	101	104	104	115	115	117	117	123	123	133	133	137	137	147	175	175	182	
	105	107	107	115	115 kr	131	131	144	144	156	156	172	172	177	187	211	211	222	
2	2	8	8	13	13	16	16	144	144	156	156	172	172	177	187	211	211	222	
	105	107	107	115	115	131	131	144	144	156	156	172	172	177	187	211	211	222	
9	161	162	171	171	184	184	195	195	201	201	202	202	203	203	211	230	230	232	
	1	9	13	11	11	6	1	1	6	1	1	1	1	8	19	19	2		
2	161	162	171	171	184	184	195	195	201	201	202	202	203	203	211	230	230	232	
	173	175	187	187	195	195 kr	209	209	220	220	229	229	242	242	258	295	295	306	
9	2	12	8	14	14	11	11	209	209	220	220	229	229	242	258	295	295	306	
	173	175	187	187	195	195	209	209	220	220	229	229	242	242	258	295	295	306	
1	217	223	232	232	248	248	252	252	268	268	280	280	284	284	295	329	329	332	
	6	9	16	4	4	16	4	252	252	268	268	280	280	284	295	329	329	332	
6	217	223	232	232	248	248	252	252	268	268	280	280	284	284	295	329	329	332	
	247	262	273	273	283	283	291	291	305	305	306	306	314	314	329	360	360	368	
8	15	11	10	8	8	14	1	1	14	1	1	8	8	15	31	31	8		
	247	262	273	273	283	283	291	291	305	305	306	306	314	314	329	360	360	368	
8	279	293	296	296	311	311	327	327	335	335	351	351	354	354	360	390	390	401	
	14	3	15	16	16	8	16	16	8	16	16	3	3	6	30	30	11		
8	279	293	296	296	311	311	327	327	335	335	351	351	354	354	360	390	390	401	
	307	314	325	325	337	337	353	353	360	360	367	367	377	377	390	390	417	422	
8	7	11	12	16	16	7	7	7	7	7	7	10	10	13	27	27	5		
	307	314	325	325	337	337	353	353	360	360	367	367	377	377	390	390	417	422	
		Sektory/Działki robocze																	

Tab. 12.11. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM III

		TCM III													
		Procesy													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
1	0 2 2 0 krt	2 14 12 8	22 36 14 8	36 47 14 61	47 56 11 79	47 56 9 93	56 69 13 93	69 85 16 106	85 96 11 142	96 107 11 168	107 179 11 179				
2	2 7 2 krt	9 14 21	17 22 38	33 36 2	38 47 61	47 53 6	56 66 10	66 73 4	85 95 10	96 101 5	107 114 7				
3	9 15 9 krt	24 24 24	35 35 49	45 53 8	53 67 14	67 79 80	67 79 80	80 87 87	87 95 110	110 117 117	117 125 125				
4	24 7	31 35	46 45	57 57	73 73	73 73	73 73	80 80	87 87	87 87	97 97	110 110	123 123	135 135	140 140
5	28 31 36	41 46 46	61 61 15	61 61 6	61 61 11	61 61 10	61 61 10	61 61 10	61 61 10	61 61 10	61 61 10	61 61 10	61 61 10	61 61 10	61 61 10
6	41 57	45 61	61 77	77 77	77 77	77 77	77 77	77 77	77 77	77 77	77 77	77 77	77 77	77 77	77 77
7	45 80	46 81	77 86	90 90	90 90	90 90	90 90	90 90	90 90	90 90	90 90	90 90	90 90	90 90	90 90
8	46 88	52 94	86 103	119 119	119 119	119 119	119 119	119 119	119 119	119 119	119 119	119 119	119 119	119 119	119 119
9	52 102	66 116	95 119	134 134	134 134	134 134	134 134	134 134	134 134	134 134	134 134	134 134	134 134	134 134	134 134
10	66 124	68 126	98 126	106 126	134 150	134 150	134 150	134 150	134 150	134 150	134 150	134 150	134 150	134 150	134 150

Sektory/Działki robocze

Tab. 12.12. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM III

		Procesy/bufory czasu																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
BZ	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
BZ	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
BZ	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
4	12	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	12	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
BZ	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
5	16	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
	16	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
BZ	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
6	21	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	21	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
BZ	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
7	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
BZ	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
8	23	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
	23	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
BZ	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
9	26	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
	26	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
BZ	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
10	33	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	33	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
BP	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34

Tab. 12.13. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM III

		TCM III												
		Procesy												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
10	0	2	2	10	26	39	51	51	67	72	72	82	98	110
		2	8	16	13	12	16	12	16	5	5	10	16	12
	0	krt	2	10	26	39	40	52	68	70	75	85	94	127
4	2	9	10	21	38	55	62	67	74	74	84	97	98	110
		7	11	12	16	16	7	7	7	10	10	13	12	5
3	9	24	24	35	48	55	63	77	77	84	92	97	112	127
		15	11	10	8	14	1	1	1	8	8	15	7	8
	10	25	25	36	48	55	63	78	88	89	90	98	113	140
	24	26	35	47	56	63	77	88	88	97	97	110	128	150
		2	12	8	14	11	9	9	9	13	13	16	11	11
	33	35	36	48	56	63	77	89	89	100	113	129	140	151
		7	3	11	6	6	6	6	10	10	10	10	5	7
2	26	33	47	50	67	79	88	94	97	107	110	128	144	157
		7	3	11	2	2	2	2	10	4	4	10	5	7
	35	42	49	52	67	79	90	96	98	108	121	141	142	158
		10	15	6	11	11	10	10	10	16	16	3	3	3
5	33	43	50	65	73	90	94	104	107	113	114	130	144	160
		10	15	6	11	10	10	10	6	6	16	3	3	3
	42	52	67	73	88	90	96	106	108	114	125	144	147	161
		57	65	88	90	106	106	114	114	130	133	141	147	171
		14	3	15	16	16	8	8	16	3	3	6	11	11
9	56	70	70	73	88	90	106	114	114	130	141	150	161	172
		14	3	15	16	16	8	8	16	3	3	6	11	11
8	57	63	68	77	88	104	110	114	130	142	146	158	169	174
		6	9	16	4	4	16	12	12	4	4	11	11	3
6	73	79	79	88	104	110	114	130	130	142	146	161	172	175
		6	9	16	4	4	16	12	12	4	4	11	11	3
6	63	67	77	93	104	117	133	142	142	155	168	170	173	178
		4	16	13	16	9	13	13	13	13	13	2	3	4
7	84	88	88	104	117	133	142	142	155	168	172	175	175	179
		1	9	13	11	6	6	1	1	1	1	8	1	2
128	129	129	138	138	151	162	162	168	168	169	170	178	179	181
		1	9	13	11	6	6	1	1	1	1	8	1	2
		129	138	138	151	162	162	168	168	169	170	178	179	181

Sektory/Działki robocze

Tab. 12.14. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na dziawkach z zastosowaniem TCM III

		Procesy/bufory czasu																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
BZ	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	1	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
BZ	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
BZ	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	1	16	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
BZ	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
2	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
BZ	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
5	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
BZ	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
9	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
BZ	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
8	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
BZ	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
6	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
BZ	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
7	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
BZ	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
BP	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132
	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132

Dziaki robocze/bufory czasu

Tab. 12.15. Najwcześniejsze daty zakończenia oraz rozpoczęcia poszczególnych procesów na działkach z zastosowaniem TCM III

		TCM III														
		Procesy														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
3	0	15	15	26	36	44	58	58	59	67	67	82	82	89	89	97
	0 krt	15	11	26	10	8	14	14	1	8	8	15	15	7	7	8
5	15	25	26	41	47	58	58	68	74	74	90	90	93	93	96	100
	16	26	15	41	6	11	10	109	116	122	123	139	151	154	174	201
6	25	29	41	57	70	86	86	95	95	108	108	121	121	123	123	130
	37	41	16	57	13	16	9	108	109	118	122	135	139	152	154	208
2	29	36	57	60	70	81	86	88	95	101	108	118	121	125	125	147
	60	67	3	70	11	2	110	118	124	135	145	152	156	156	166	215
7	36	37	60	69	81	94	105	111	118	119	125	126	135	143	143	149
	71	72	9	81	13	11	6	124	130	145	146	165	166	166	174	217
8	37	43	69	78	94	110	110	114	114	130	130	142	142	146	146	171
	79	85	9	94	16	4	125	130	146	146	158	170	174	174	185	220
9	43	57	78	81	110	125	125	141	141	149	149	165	165	168	168	196
	93	107	3	110	15	16	8	158	158	174	178	181	185	191	197	231
4	57	64	81	92	125	137	141	157	157	164	165	172	172	182	182	212
	111	118	11	129	12	16	7	171	171	174	181	181	191	191	204	236
1	64	66	92	104	137	145	157	171	171	182	182	191	191	204	204	242
	135	137	12	149	8	14	11	171	171	182	182	191	191	204	204	247
10	66	104	112	145	161	171	184	184	196	196	212	212	217	220	230	259
	149	151	8	159	16	13	13	188	188	200	200	216	216	221	231	259

Na schematach występują następujące oznaczenia literowe:

n – liczba wierszy macierzy T ,

m – liczba kolumn macierzy T ,

T – macierz czasy trwania robót,

t^{wr} – najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty,

t^{wz} – najwcześniejszy termin zakończenia roboty,

t^{pr} – najpóźniejszy termin rozpoczęcia roboty,

t^{pz} – najpóźniejszy termin zakończenia roboty,

t_{ij} – czas wykonania roboty j na froncie i ,

t_{ijq} – czas trwania krytycznej roboty j na froncie i dla diagonału q ,

t'_j – czas rozwinięcia częściowego potoku j ,

tS^{sw} – sprzężenia między środkami realizacji dla wczesnych terminów,

S^{fw} – sprzężenia między frontami roboczymi dla wczesnych terminów,

S^{sp} – sprzężenia między środkami realizacji dla późnych terminów,

S^{sp} – sprzężenia między frontami roboczymi,

H – podzbiór najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót,

P – zbiór terminów rozpoczęcia robót,

h, k – nakłady pracy,

O_i – obiekt i ,

P_j – proces roboczy j ,

R – zbiór terminów rozpoczęcia robót w diagonale macierzy,

GMM – wskaźnik, granicznie możliwe minimum,

N – częściowy potok,

T^{c}_j – wektor zakończenia częściowego potoku,

T^{R}_j – wektor rozwinięcia częściowego potoku,

A – dwukolumnowa macierz,

B – dwukolumnowa macierz zmodyfikowana algorytmem Johnsona.

Oraz wprowadza się następujące oznaczenia (zgodne z publikacjami zagranicznymi):

LT – (least time) najkrótszy czas pomiędzy procesem w toku a kolejnym procesem – najmniejszy dystans czasowy,

LD – (least distance) najmniejsza odległość miejsca pomiędzy procesem w toku a kolejnym procesem,

CPH – (controlling path) – droga krytyczna procesów budowlanych,

CL – (controlling link) ścieżka krytyczna – połączenie graficzne pomiędzy kolejnymi procesami,

CP – (controlling point) punkt krytyczny odpowiadający rozpoczęciu kolejnego procesu,

T – czas trwania procesu,

TT – (time total) całkowity czas wykonania zadania,

PB – (patrial-span blok) proces typu blok o charakterze nieliniowym.

Bibliografia

- Adeli H. and Karim A. (1997). *Scheduling/Cost Optimization and Neural Dynamics Model for Construction*. Journal of Construction Engineering and Management. ASCE, Vol. 123, NO.4, s. 450–458.
- Afanasev V.A., Afanasev A.V. (1988). *Projektirowanie organizacji stroitelstva. Designing of construction works scheduling*. LISI, Leningrad (in Russian).
- Afanasev V.A., Afanasev A.V. (2000). *Stream scheduling of works in civil engineering (Поточная организация работ в строительстве)*. St. Petersburg (in Russian).
- Al. Sarraj, Z. M. (1990). *Formal development of line-of-balance technique*. J. Constr. Eng.
- Arditi D. and Abulak Z. M. (1979). *Comparison of network analysis with line-of-balance in a linear repetitive construction project*. Proc., Sixth INTERNET Congr., Garnish-Partenkirchen, Germany, s. 12–25.
- Arditi D. and Abulak Z. M. (1986). *Line-of-balance scheduling in pavement construction*. J. Constr. Div., ASCE, 112(3), s. 411–424.
- Arditi D., Tokdemir, O.B. & Suh, K. (2001). *Effect of learning on line-of-balance scheduling*. International Journal of Project Management, in press.
- Arditi D., Tokdemir O.B. & Suh K. (2001). *Scheduling system for repetitive unit construction using line-of-balance technology*. Department of Civil and Architectural Engineering, Illinois Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Honan University, Honam, South Korea.
- Barrie D.S. and Paulson, B. C. Jr. (1978). *Professional construction management*. McGraw-Hill Inc., New York. s. 232–233.
- Birrell G.S. (1980). *Construction planning-beyond the critical path*. J. Constr. Div., ASCE, 106(3), s. 389–407.
- Błażewicz J. (1988) *Złożoność obliczeniowa problemów kombinatorycznych*, WNT, Warszawa.
- Borne P. (2004). *Evolutionary algorithms for job-shop scheduling*. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., Vol. 14, No 1, s. 91–103.
- Bożejko W., Hejducki Z. (2007). *Analiza zależności typu czas-koszt w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem algorytmu ewolucyjnego*. Konferencja Krynica 2007, t. Materiały, technologie i organizacja w budownictwie, s. 203–209, Białystok.
- Bożejko W., Wodecki M. (2005). *A hybrid evolutionary algorithm for some discrete optimization problems*. IEEE Computer Society P2286 ISBN 0-7695-2286-6.
- Brown A.P., Łomnicki Z.S. (1966). *Some applications of the branch-and-bound algorithm for the machine scheduling problem*. Operations Research Quarterly, 17, s. 173–189.
- Carr, R.I. and Meyer W.L. (1974). *Planning construction of repetitive building units*. J. Constr. Div., ASCE, 100(3), s. 403–412.

- Chrzanowski E. M. Jr. and Johnston D.W. (1986). *Application of linear scheduling*. J. Constr. Engrg. And Mgmt., ASCE, 112(4), s. 476–491.
- Cieślak M. (2001). *Prognozowanie gospodarcze: metody i zastosowanie*. Warszawa: Wydaw. Naukowe PWN.
- El-Rayes K. and Moselhi O. (1998). *Resource-driven Scheduling of Repetitive Activities on Construction Projects*. Journal of Construction Management and Economics. Vol. 16, NO. 4, s. 433–446.
- El-Rayes K. and Moselhi O. (2001). *Optimal Resource Utilization for Repetitive Construction Projects*. Journal of Construction Engineering and Management. ASCE, Vol. 127, NO. 1, s. 18–27.
- Fogel L., Owens A., Walsh M. (1966). *Artificial intelligence through simulated evolution*. Chichester. Wiley.
- Glover F. (1989). *Tabu Search, Part I.*, ORSA Journal of Computing, 1, s. 90–206.
- Glover F. (1990). *Tabu Search, Part II.*, ORSA Journal of Computing, 2, s. 4–32.
- Goldberg D. (1995). *Algorytmy genetyczne w zastosowaniach*. Warszawa WNT.
- Goldratt E.M. (1992). *The Goal*. Great Barrington, MA: The North River Press, 1st ed. 1984, 2nd revised ed. 1992.
- Goldratt E.M. (1997). *Critical Chain*. Great Barrington, MA: The North River Press.
- Halpin D. W. and Woodhead R.W. (1976). *Design of construction process operations*. John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., s. 30–36.
- Hamerlink D. J. (1995). *Linear scheduling model: The development of a linear scheduling model with micro computer application for highway construction control*. PhD tezis, Iowa State Univ.
- Hamerlink D. J., Rowings J. E. (1998). *Linear scheduling model: Development of controlling activity path*. Journal of Construction Engineering and Management, 124(4), s. 266–268.
- Handa V.K. and Barcia R. M. (1986). *Linear scheduling using optimal control theory*. J. Constr. Engrg., ASCE, 112(3), s. 387–393.
- Harris R. B. and Ioannou P.G. (1998). *Scheduling Projects with Repeating Activities*. Journal of Construction Engineering and Management. ASCE, Vol. 124, NO. 4, s. 269–278.
- Hartman S. (1997a). *Project scheduling with multiple modes: a genetic algorithm*. Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 435, Germany.
- Hegazy T. (1999b). *Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms*. Canadian Journal of Civil Engineering, 26: s. 685–697.
- Hegazy T., Moselhi O. & Fazio P. (1993). *BAL: an algorithm for scheduling and control of linear projects*. AACE Transactions, C.8, 8.1–8.14.
- Hejducki Z. (2003). *Scheduling Model of Constructions Activity with Time Couplings*. Journal of Civil Engineering and Management vol. IX no. 4, s. 284–291.

- Hejducki Z. (2004). *Sequencing problems in methods of organizing construction processes*. Engineering, Construction and Architecture Management vol. 11 No. 1, s. 20–32.
- Hejducki Z. (2000). *Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych*, WPWr.
- Hejducki Z. (2003). *Scheduling Model of Construction Activity with Time Couplings*, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. IX, No. 4, s. 284–291.
- Hejducki Z. (2000). *Time couplings in scheduling methods of complex construction processes (Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych)*. Technical University of Wrocław (in Polish).
- Hejducki Z. (2004). *Zarządzanie czasem w procesach budowlanych z zastosowaniem modeli macierzowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Hejducki Z., Mrozowicz J. (2001). *Stream methods of construction work organisation: an introduction to the problem*. Construction and Architecture Management 2001 8|2, s. 80–89.
- Hejducki Z., Podolski M., Uchroński M. (2009). *Zastosowanie algorytmów metaheurystycznych w rozwiązywaniu problemów optymalizacyjnych metod sprzężeń czasowych*. Konferencja Naukowo – Techniczna Inżynieria procesów budowlanych. Wisła.
- Hejducki Z., Rogalska M. (2005). *Metody sprzężeń czasowych TCM*. Przegląd budowlany 2/2005, s. 38–45.
- Hejducki Z., Rogalska M. (2011). *Time coupling methods. Construction scheduling and time/cost optimization*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Herroelen W., Leus R. (2001). *On the merits and pitfalls of critical chain scheduling*. Journal of Operations Management 19, s. 559–577.
- Herroelen, W., De Reyck B. and Demeulemeester E. (1998). *Resource-constrained project scheduling: a survey of recent developments*. Computers and Operations research, 25: s. 279–302.
- Holland J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, University of Michigan Press.
- Jaworski K. M. (1999). *Metodologia projektowania realizacji budowy*. PWN, Warszawa.
- Jaworski K. M. (1995). *Analiza podstawowych kryteriów jakości w projektowaniu organizacji budowy*. Inżynieria i Budownictwo, 11/95, s. 612–615.
- Johnston D.W. (1981). *Linear scheduling methods for highway construction*. J. Constr. Div., ASCE, 107(C02), s. 247–261.
- Johnston, D.W. (1984). *Linear scheduling method for highway construction* J. Constr. Div., Am. Soc. Civ. Eng, 107(2), s. 247–261.
- Kasprowicz T. (2002). *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych*. Warszawa, WAT

- Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P. (1983). *Optimization by simulated annealing*. Science, 220, s. 671–680.
- Kolisch R. and Hartmann S. (1999). *Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis*. In Project scheduling. Edited by J. Węglarz. Kluwer, Bosten, Mass., s. 147–178.
- Leu S. S. and Yang C. H. (1999). *Ga-based multicriteria optimal model for construction scheduling*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127, s. 270–280.
- Leu S. S., Yang, C. H., Huang J. C. (2000). *Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application*. Automation in Construction 10, s. 27–41.
- Lin S., Goodman E., Punch W. (1997). *A genetic algorithm approach to dynamic job-shop scheduling problems*. Proc. Of the Seventh Internat. Conf. On Genetic Algorithms, San Francisco, s. 481–488.
- Lucko G. (2007). *Flexible Modeling of Linear Schedules for Integrated Mathematical Analysis*. Proceedings of the 2007 39th Winter Simulation Conference, eds. Henderson, S. G., Biller, B., Hsieh, M.-H., Shortle, J., Tew, J. D., Barton, R. R., Washington, District of Columbia, December 9-12, 2007, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, New Jersey, s. 2159–2167.
- Lucko G. (2008). *Productivity Scheduling Method Compared to Linear and Repetitive Project Scheduling Methods*. Journal of Construction Engineering and Management 134(9), s. 711–720.
- Lucko G. (2009). *Productivity Scheduling Method: Linear Schedule Analysis with Singularity Functions*. Journal of Construction Engineering and Management 135(4), s. 246–253.
- Lucko G., Peña Orozco A. A. (2009) *Float Types in Linear Schedule Analysis with Singularity Functions*. Journal of Construction Engineering and Management 135(5), s. 368–377.
- Marcinkowski R. (2002). *Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynieryjno-budowlanej* Warszawa, WAT.
- Mattila K.G., Acse A. M., Park A. (2003). *Comparison of Linear Scheduling Model and Repetitive Scheduling Method*. J. Constr. Eng. Manage., 129(1), s. 56–64.
- Mattila K.G. & Abraham D. M. (1998). *Resource leveling of linear schedules using integer linear programming*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120(4), s. 232–244.
- Melin J. W. and Whiteaker B. (1981). *Pencing a bar-chart*. J. Constr. Div., ASCE, 107(C03), s. 497–507.
- Michalewicz Z. (1996). *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*. Warszawa WNT.

- Moder J. J., Philips C. R. and Davis E. W. (1983). *Project Management with CPM, PERT and precedence diagramming*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Moselhi O. & El-Rayes K. (1993). *Scheduling of respective projects with cost optimization*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 199, s. 681–697.
- Mrozowicz J. (1997). *Methods of organizing construction activities taking into account time couplings (in Polish)*. Wrocław University of Technology Publishing House.
- Nassar K. (2005). *Evolutionary optimization of resource allocation in repetitive construction schedules*. ITcon Vol. 10, s. 265.
- Nawaz M., Ensore Jr E.E., Ham I. (1983). *A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem*, OMEGA 11/1, s. 91–95.
- Nowicki E. (1999). *Metoda tabu w problemach szeregowania zadań produkcyjnych*. Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej PWr., Wyd. Politechniki Wrocławskiej.
- O'Brien J. J. (1975). *VPM scheduling for high-rise buildings*. J. Constr. Div., ASCE, 101(4), s. 895–905.
- O'Brien J. J. (ed.) (1969). *Scheduling handbook*. McGraw-Hill Inc., New York, N.Y.
- Otterloo van Siuwert. (2002). *Evolutionary algorithms and Scheduling Problems*, Universiteit Utrecht.
- Pawlak M. (1999). *Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji*. PWN Warszawa.
- Podolski M. (2008). *Analiza nowych zastosowań teorii szeregowania zadań w organizacji robót budowlanych*. Praca doktorska, Raporty Inst. Bud. PWroc. Ser. PRE nr 5/08.
- Podolski M. (2008). *Zagadnienie optymalizacji dyskretnej z kryteriami koszt/czas w planowaniu przedsięwzięć wieloobiektowych*. Technologia i zarządzanie w budownictwie, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 91, Seria: Studia i Materiały nr 20, s. 279–288, Wrocław.
- Podolski M. (2006). *Zastosowanie metaheurystycznych algorytmów szeregowania zadań w harmonogramowaniu wieloobiektowych przedsięwzięć budowlanych*. Technologia i zarządzanie w budownictwie. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 87, Seria: Studia i Materiały nr 18, s. 147–156, Wrocław.
- Połośński M. (2015). *Application of the work breakdown structure in determining cost buffers in construction schedules*. Archives of Civil Engineering. Volume LXI, Issue 1/2015, s. 147–161, DOI: 10.1515/ace-2015-0010.
- Połośński M. (2015). *Próba wyznaczenia wielkości buforów czasu przy deterministycznej ocenie czasu zadań*. Wybrane problemy budownictwa. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, s. 143–150. ISBN 978-83-64235-71-9 /61 konferencja

- naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB Krynica, 20-25 września 2015r.
- Połośński M., Pruszyński K. (2015). *Planning the Implementation of Construction Schedules with Consideration of Time Buffers*. in "Project management as a spectrum of scientific problems in engineering and management", s. 9–27. General Tadeusz Kościuszko Military Academy of Land forces in Wrocław. Department of Management, 2015. ISBN: 978-83-63900-63-2.
- Rahbar F. F. and Rowings J. E. (1992). *Respective activity scheduling process*. Trans., Am. Assn. Cost Eng., 2, O.5.1–O.5.8.
- Rechenberg I. (1973). *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Stuttgart, Frohman-Holzboog.
- Reda R. M. (1990). *RPM: respective project modeling*. J. Constr. Eng. Manage., 116(2), s. 316–330.
- Reeves C. (1995). *A genetic algorithm for flowshop sequencing problem*, Computer and Operational Research, 80, s. 397–403.
- Reeves C. R., Yamada T. (1998). *Genetic Algorithms Path Relinking on the Flowshop Sequencing Problem*. Evolutionary Computation Journal MIT press, Vol. 6. No 1, s. 230–234.
- Rogalska M., Hejducki Z. (2011). *Modelowanie przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Ekonomicznej w Katowicach.
- Rogalska M., Bożejko W., Hejducki Z. (2006). *Harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem hybrydowego algorytmu ewolucyjnego*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, NR87, s. 157–164.
- Rogalska M., Bożejko W., Hejducki Z. (2005). *Sterowanie poziomem zatrudnienia z zastosowaniem algorytmów genetycznych*, Pięćdziesiąta Pierwsza Konferencja Naukowa KIL i W PAN i KN PZITB Gdańsk-Krynica, s. 185–192.
- Rogalska M., Bożejko W., Hejducki Z. (2009). *Harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem algorytmu Tabu Search z rozmytymi czasami wykonania zadań*, Przegląd Budowlany. 80, nr 7/8, s. 76–80.
- Rogalska M., Bożejko W., Hejducki Z. (2008). *Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling*. Automation in Construction 18, s. 24–31.
- Rogalska M. (2016). *Wieloczynnikowe modele w prognozowaniu czasu procesów budowlanych*. Monografie, Lublin.
- Rowings J. E. & Rahbar F. (1992). *Use of linear scheduling in transportation projects*. In: Proceedings of the Transportation Research Board 71st Annual Meeting. TRB, Washington, D.C.
- Russel A. D. & Wong W. C. M. (1993). *New generation of planning structures*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 119, s. 196–214.

- Russell A. D. and Caselton W. F. (1988). *Extensions to Linear Scheduling Optimization*. Journal of Construction Engineering and Management. ASCE, Vol. 114, NO.1, s. 36–52.
- Schwefel H. P. (1981). *Numerical optimization of computer models*. Chichester, Wiley.
- Sellinger S. (1980). *Construction planning for linear projects*. J.Constr. Div.,ASCE, 106(2), s. 195–205.
- Senouci A. B. and Eldin N. N. (1996). *Dynamic Programming Approach to Scheduling of Nonserial Linear Project*. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 10, NO.2, s. 106–114.
- Skorupka D. (2008). *Identification and Initial Risk Assessment of Construction Projects in Poland*. Journal of Management in Engineering, July 2008, Volume 24, Number 3, American Society of Civil Engineers 2008, s. 120–127.
- Skorupka D. (2004). *Neural Networks in Risk Management of a Project*. AACE International Transaction, (CSC.1.51–CSC.1.57), The Association for the Advancement of Cost Engineering, USA, Washington.
- Skorupka D. (2003). *Risk Management in Building Projects*. AACE International Transaction, (CSC.1.91–CSC.1.96), The Association for the Advancement of Cost Engineering, USA, Orlando.
- Skorupka D., Kuchta D, Połowski M. (2015). *Fuzzy Time Buffers in Project Scheduling*. (abstract) International Conference On Recent Advances In Pure And Applied Mathematics (ICRAPAM 2015), 3-6 June 2015, Faculty Of Arts And Science Istanbul Commerce University, Istanbul Turkey, Abstract Book, ISBN: 978-975-00211-2-1, s. 336.
- Smutnicki C. (2002). *Algorytmy szeregowania*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- Stella P. and Glavinich T. (1994). *Construction planning and scheduling*. 2nd Ed., Associated General Contractors of America, Alexandria, Va.
- Stradal O. and Cacha J. (1982). *Time space scheduling method*. J. Constr. Div., ASCE, 108(3), s. 445–457.
- Suhail S. A. and Neale R. H. (1994). *CPM/LOB: New methodology to integrate CPM and line of balance* J. Constr. Eng. Manage., 120(3), s. 667–684.
- Thabet W. Y. & Beliveau Y. J. (1994). *HVLS: horizontal and vertical logic scheduling for multistory projects*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120(4), s. 875–892.
- Toklu Y. C. (2002). *Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constraints*, Can. J. Civ. Eng. 29, s. 421–429.
- Ugwu O. O., Tah J. H. M. (2002). *Development and application of a hybrid genetic algorithm for resource optimization and management* ECAM 9/4 s. 304–317.
- Vorster M. C. and Parvin C. M. (1990). *Linear scheduling for highway contractors and state DOT's*. Videotapes, P&W Publications, Richmond, Va.

- Vorster M.C. and Bafna T. (1992). *Discussion of 'Formal development of line-of-balance technique'* by Z. M. Al Sarraj. *J. Constr. Eng. Manage.*, 118(1), s. 210–211.
- Vorster M.C. Beliveau Y.J. and Bafna T. (1992). *Linear scheduling and visualization*. *Transp. Res. Rec.* 1351, s. 32–39.
- Wang C. & Huang Y. (1998). *Controlling activity interval times in LOB scheduling*. *Construction Management and Economics*, 16, s. 5–16.
- Whiteman W. E. and Irwig H. G. (1988). *Distribuanca scheduling technique for managing renovation work*. *J. Constr. Engrg. and Mgmt.*, ASCE, 114(2), s. 191–213.
- Yamada T. (1999). *Solving the Csum Permutation Flowshop Scheduling Problem by Genetic Local Search ICEC98* (International Conference on Evolutionary Computation), s. 230–234.
- Zavadskas E. K. (2000). *Mehrkriterielle Entscheidungen im Bauwesen*, Vilnius, Technika.