

**Kamil PRUSZYŃSKI**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie  
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

## **Harmonogramowanie robót budowlanych z wykorzystaniem metody CCPM**

### **Construction schedule using CCPM method**

**Słowa kluczowe:** harmonogramowanie robót budowlanych, planowanie budowy, metoda CCPM, metoda łańcucha krytycznego, ryzyko  
**Key words:** construction schedule, CCPM method, construction planning, critical chain method, risk

#### **Nowoczesne planowanie robót budowlanych**

Precyzyjne planowanie przedsięwzięć budowlanych jest obarczone ryzykiem. Związane jest to z brakiem pewności co do jego faktycznego przebiegu. Nie można bowiem do końca przewidzieć przyszłości. Dotyczy to zarówno analizy czasu trwania i kosztów projektu, jak i zapotrzebowania na materiały, ludzi i sprzęt oraz innych elementów, czasem trudnych do zdefiniowania (Połński i Pruszyński 2006). Dlatego też zarządzanie przedsięwzięciami budowlanymi niesie ze sobą dużo niepewności, a tym samym pewne ryzyko niepowodzenia.

W celu lepszego zarządzania projektami powstało wiele metod opartych na metodach analiz sieci zależności. Za pierwszą z nich uważa się metodę CPM (Critical Path Method), która powstała w 1957 roku na potrzeby armii USA. Oparta ona była na sieci krawędziowo definiowanej i dotyczyła tylko analizy czasu w ujęciu deterministycznym. Dlatego w rok później powstała kolejna metoda – PERT (Program Evaluation and Review Technique). Na podstawie tych samych założeń definiowanych krawędziowo pozwalała ona przeprowadzić analizę czasu już w ujęciu probabilistycznym. Metoda ta zapoczątkowała podejście stochastyczne do realizacji projektów (Jaworski 1999).

Obecnie w różnych ośrodkach naukowych świata trwają prace nad możliwością wiarygodnego prognozowania różnego rodzaju przedsięwzięć, tak by faza realizacji znacząco nie odbiegała od fazy planowania, by można było prognozować zmieniającą się cały czas rzeczywistość.

## Podstawy teoretyczne CCPM

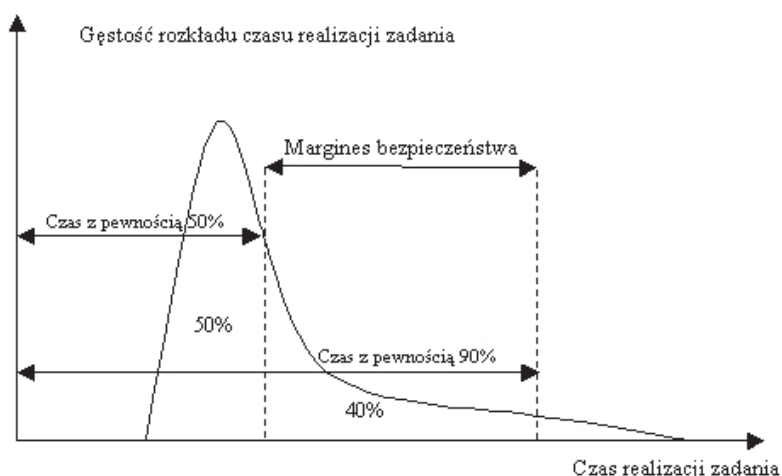
Poza dość złożonymi obliczeniowo metodami do zarządzania przedsięwzięciami powstają i inne, bardziej praktyczne sposoby radzenia sobie z wszechobecnym ryzykiem.

Przykładem takim może być metoda Critical Chain Project Management (CCPM). Podstawowe jej założenia przedstawił dr E.M. Goldratt w 1997 roku (Goldratt 2000). Metoda ta jest częściowo heurystyczna, opiera się w znacznej mierze na metodzie CPM i pewnych własnościach rozkładu sumy zmiennych losowych oraz na niektórych zachowaniach psychologicznych, jakim podlegają ludzie (Milian 2004).

Zgodnie z wytycznymi Goldratta, do tej metody należy w pierwszej kolejności zredukować długość trwania poszczególnych zadań. Przy założeniu, że przebieg ich w czasie ma charakter losowy i niezależny, oraz z faktu, że takie oszacowania są pewne z prawdopodobieństwem 90%, metoda ta zakłada skró-

cenie o połowę długości trwania zadań, czyli do pewności na poziomie 50% (rys. 1). Wynika to z faktu podawania dużego marginesu bezpieczeństwa. W ten sposób człowiek zabezpiecza się przed niepewnymi sytuacjami. Prowadzi to do znacznego wydłużenia – nie zawsze zasadnego, czasu trwania całego projektu. Przekłada się to jednak na zwiększenie pewności dotrzymania ustalonego z góry terminu realizacji przedsięwzięcia.

Stosowanie marginesów bezpieczeństwa (buforów) dla całego przedsięwzięcia, bez wliczania ich w każde z osobna zadanie cząstkowe, ma przeciwstawić się, według metody Goldratta, m.in. prawu Parkinsona (praca wypełnia cały dostępny czas, a zadania rzadko kończą się wcześniej, nawet przy zastosowaniu estymat bezpiecznych) oraz syndromowi studenta (świadome opóźnianie rozpoczęcia zadania i „szturmowanie” terminu końcowego). W tej metodzie dla harmonogramu projektu ustala się czas ich trwania na podstawie najpóźniejszych terminów.



RYSUNEK 1. Rozkład prawdopodobieństwa czasu trwania realizacji zadania (Milian 2004)  
FIGURE 1. Task's duration probability distribution (Milian 2004)

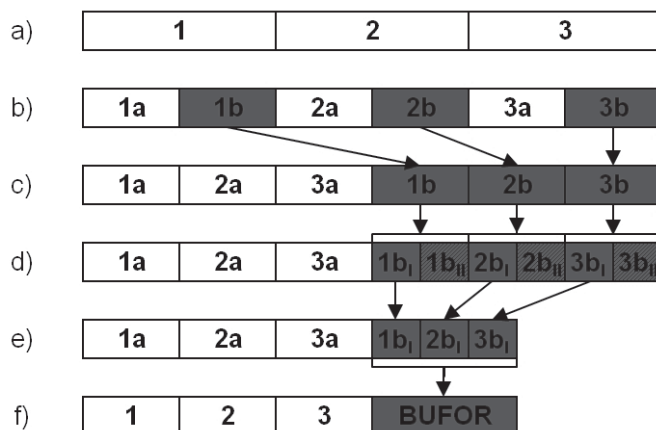
Na rysunku 2 przedstawiona została koncepcja powstawania bufora czasu w metodzie CCPM. Rysunek 2a zawiera przykładowy ciąg zadań z 90-procentową pewnością dotrzymania ich terminu. W następnej części rysunku (rys. 2b) przedstawiono możliwą redukcję trwania tych zadań. Do końca nie jest sprecyzowane, do jakiej wartości należy skrócić zadania, by ich czas był optymalny, zależne jest to bowiem od charakteru przedsięwzięcia. Na cele artykułu zastosowano skrócenie o 50%, tzn. do wartości, w której szansa dotrzymania tego terminu wynosi 50%. Zredukowany w ten sposób czas z zadań tworzących rozpatrywany ciąg czynności został przeniesiony do powstałego w ten sposób bufora (rys. 2c). Jego wielkość w myśl założeń metody CCPM także podlega skróceniu (rys. 2d). Tutaj także wielkość redukcji nie jest dokładnie sprecyzowana. W związku z powyższym i tutaj również następuje skrócenie o 50% – rezultat tego działania przedstawiono na rysunku 2e. Całość

zredukowanego ciągu zadań przedstawia rysunek 2f.

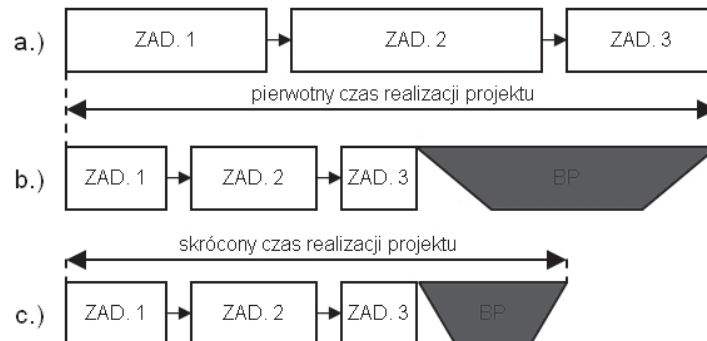
W toku realizacji projektu, przy probabilistycznym charakterze przedsięwzięcia, zmianie położenia łańcucha krytycznego mają zapobiegać wcześniej uwzględnione i wyliczone bufory:

- bufor projektu (BP), umieszczany na końcu harmonogramu (ścieżki krytycznej), element mający na celu zapewnienie bezpieczeństwa dotrzymania końcowego terminu przedsięwzięcia oraz umożliwienie jego kontrolowania (rys. 3) – Połoński i Pruszyński (2008),
- bufor zasilający (BZ), mający na celu utrzymanie niezmienności łańcucha krytycznego oraz umożliwienie kontrolowania jego stabilności (rys. 4) – Połoński i Pruszyński (2008).

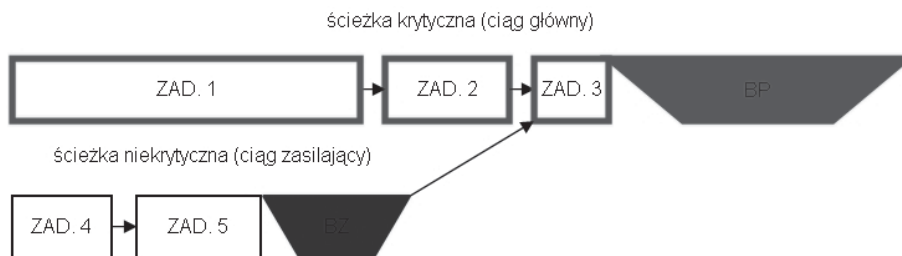
Zatem według założeń metody CCPM, do obliczenia końcowego terminu przedsięwzięcia należy uwzględnić skrócony harmonogram projektu oraz uwzględnić odpowiednie bufory projektu.



RYSUNEK 2. Schemat powstawania bufora czasu w metodzie CCPM  
 FIGURE 2. Scheme of buffer of time origination in CCPM method



RYSUNEK 3. Schemat lokalizacji bufora projektu (Milian 2004)  
 FIGURE 3. Project buffer localization scheme (Milian 2004)



RYSUNEK 4. Schemat lokalizacja bufora zasilającego (Milian 2004)  
 FIGURE 4. Feeding buffer localization scheme (Milian 2004)

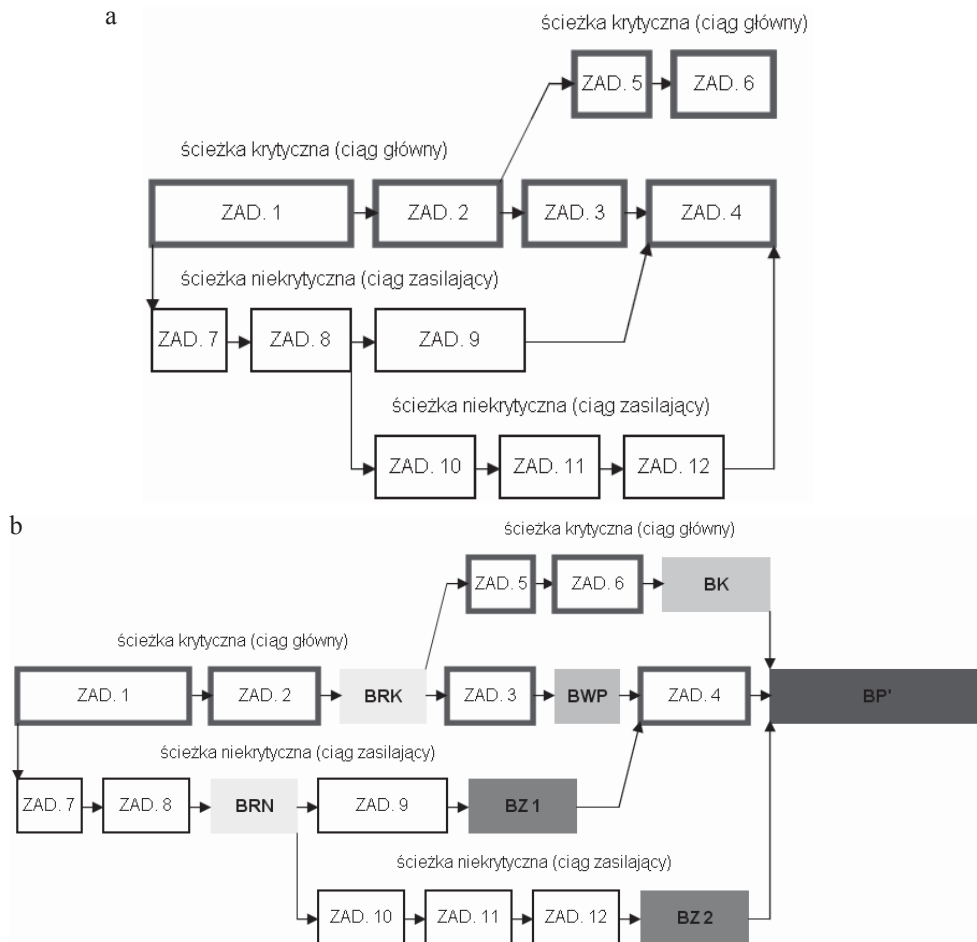
### CCPM w praktyce inżynierskiej

W przypadku harmonogramów o złożonej strukturze nie wystarczą tylko wymienione wyżej bufory. Jak dowodzą badania autora, muszą być stosowane także inne bufory (BP<sup>7</sup> – nowy bufor projektu, BWP – bufor wspomagający projekt, BRK – bufor reagujący na ścieżce krytycznej, BRN – bufor reagujący na ścieżce niekrytycznej, BK – bufor kończący), tak by w pełni móc zabezpieczyć projekt przed zmianą lokalizacji ścieżki krytycznej oraz by wyliczony końcowy termin przedsięwzięcia nie uległ zmianie (Połośki i Pruszyński 2008). Na rysun-

ku 5 przedstawiono schemat lokalizacji zastosowania buforów czasu. Dokładny opis ich stosowania oraz sposób ich wyliczenia można znaleźć w wymienionej uprzednio literaturze.

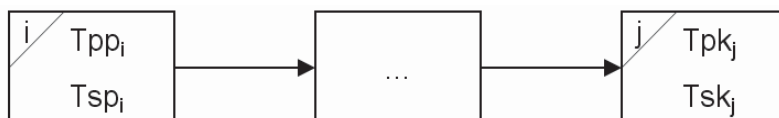
Do praktycznego zastosowania metody CCPM posłużył harmonogram robót ziemnych stacji metra A19 Marymont w Warszawie. Z uwagi jednak na jego obszerność (liczy blisko 200 zadań) nie został on zamieszczony w niniejszym opracowaniu. Obliczeń dokonano w programie MS Project.

Wielkość buforów dla sieci jednopunktowej, jaka jest używana w MS Project, określono na podstawie poniższego wzoru (Połośki i Pruszyński 2008):



RYSUNEK 5. Przykładowe schematy: a – sieci zależności, b – lokalizacji buforów czasu (Połowski i Pruszyński 2008)  
 FIGURE 5. Exemplary scheme of: a – dependence network, b – time localization (Połowski and Pruszyński 2008)

$WB_{i-j} = P \cdot [(Tpk_j - Tpp_i) - (Tsk_j - Tsp_i)]$   
 gdzie:  
 $WB_{i-j}$  – wielkość bufora czasu chroniącego ciąg pomiędzy zadaniami  $i-j$ ,  
 $i$  – numer zadania rozpoczynającego ciąg,  
 $j$  – numer zadania kończącego ciąg,  
 $P$  – procentowa redukcja czasu trwania ciągu,  
 $Tpp_i$  – termin najpóźniejszego początku zadania  $i$  przed skróceniem,  
 $Tpk_j$  – termin najpóźniejszego końca zadania  $j$  przed skróceniem,  
 $Tsp_i$  – termin najpóźniejszego początku zadania  $i$  po skróceniu,  
 $Tsk_j$  – termin najpóźniejszego końca zadania  $j$  po skróceniu.



RYSUNEK 6. Schemat obliczeniowy długości trwania ciągu dla sieci jednopunktowej (Połoński i Pruszyński 2008)

FIGURE 6. Calculation scheme of sequence for one point network duration (Połoński and Pruszyński 2008)

Dla pełniejszego zrozumienia powyższego wzoru przedstawiono schemat obliczeniowy długości trwania ciągu dla sieci jednopunktowej (rys. 6).

Zastosowanie metody CCPM bez wprowadzenia przedstawionych wcześniej dodatkowych buforów w przedsięwzięciach, w których jest kilka zakończeń oraz ścieżek podkrytycznych, które ze sobą czasem wzajemnie się krzyżują, prowadzi do zmiany lokalizacji ciągu głównego oraz przyjętego wcześniej końca projektu. Świadczyć o tym może eksperyment przeprowadzony na wyjściowym harmonogramie. Jego wyniki zostały przedstawione w tabeli 1.

W związku z powyższym wprowadzono do harmonogramu zaproponowane bufory czasu. Jak dowodzą wspomniane badania, zastosowanie takiego rozwiązania prowadzi do dotrzymania końcowego terminu zakończenia przedsięwzięcia zgodnie z założeniami CCPM oraz na niezmienniu położenia ścieżki

krytycznej. W poniższej tabeli zestawiono otrzymane w ten sposób wyniki obliczeń (tab. 2).

### Wnioski i podsumowanie

Przedstawiona metoda CCPM stanowi istotną propozycję w zarządzaniu przedsięwzięciami, w tym budowlanymi. Umożliwia ona w prosty sposób skrócenie ich realizacji dzięki redukcji pierwotnego czasu trwania projektu i zastosowaniu odpowiednich buforów czasu. Z uwagi jednak na jej możliwe aspekty zastosowań wymaga dodatkowych założeń dla poszczególnych branż.

Wydaje się, że kwestia redukcji czasu trwania poszczególnych zadań w harmonogramie oraz wielkości buforów czasu zależna jest od specyfiki poszczególnych przedsięwzięć. W artykule zastosowano w obu tych przypadkach 50-procentową redukcję ich czasów ce-

TABELA 1. Czas trwania pierwotnego harmonogramu oraz wyliczonego według metody CCPM dla robót ziemnych stacji metra A19 Marymont

TABLE 1. Initial schedule duration and duration of schedule estimated according to CCPM method for groundwork of metro station A19 Marymont

Wyszczególnienie Specification	Termin rozpoczęcia	Termin zakończenia	Liczba dni	Uwagi
Harmonogram pierwotny	04.05.2005	21.02.2006	247	–
Harmonogram według metody CCPM	04.05.2005	05.01.2006	207	ciąg główny zmienił swoje położenie

TABELA 2. Wyniki praktycznego zastosowania metody CCPM dla robót ziemnych stacji metra A19 Marymont

TABLE 2. Practical usage of CCPM method for groundwork of metro station A19 Marymont results

Wyszczególnienie Specification	Termin rozpoczęcia	Termin zakończenia	Liczba dni	Uwagi
Harmonogram pierwotny	04.05.2005	21.02.2006	247	–
Harmonogram według metody CCPM	04.05.2005	05.01.2006	207	ciąg główny zmienił swoje położenie
Harmonogram po autor- skich modyfikacjach	04.05.2006	12.12.2005	187	ciąg główny po- został na swoim miejscu

lem przedstawienia w praktyce zastosowania metody CCPM do przedsięwzięć budowlanych – nie poddając pod ocenę słuszności takiej redukcji.

Powyżej wymienione zastrzeżenia są polem dociekań wielu naukowców z całego świata, którzy pracują nad lepszym sposobem zarządzania projektami, wykorzystując w tym celu m.in. metodę Critical Chain Project Management.

## Literatura

- GOLDRATT E.M. 2000: Łańcuch krytyczny. Wydawnictwo WERBEL, Warszawa.
- JAWORSKI K.M. 1999: Metodologia projektowania realizacji budowy. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- MILIAN Z. 2004: Łańcuch krytyczny w budownictwie. *Czasopismo Techniczne* 11-B.
- POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K. 2006: Problematyka ryzyka w projektowaniu realizacji robót budowlanych. Część 1. *Przegląd Budowlany* 11: 46–50.

POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K. 2008: Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych. Część 1. Podstawy teoretyczne. *Przegląd Budowlany* 2: 45–49.

## Summary

**Construction schedule using CCPM method.** Modern construction planning requires taking into account some elements of probabilistics. In this work the element of time risk is treated carefully. Moreover some aspects of theoretical bases of CCMP method, which is a continuation of critical chain method are discussed in this article. The practical side of this method is presented on example of construction schedule of Metro station A19 Marymont in Warsaw.

### Author's address:

Kamil Pruszyński  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland