

Dane bibliograficzne o artykule: http://mieczyslaw_polonski.users.sggw.pl/mppublikacje

Mieczysław POŁOŃSKI

Aneta ZIÓLKOWSKA

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie

Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Wyznaczenie buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia dla obiektu biurowego „Globis” we Wrocławiu

Setting buffers and completion date for project of office building “Globis” in Wrocław

Słowa kluczowe: łańcuch krytyczny, CCPM, CC/BM, bufory czasu.

Key words: critical chain, CCPM, CC/BM, buffer sizing.

Wprowadzenie

Metody planowania przedsięwzięć budowlanych rozwijają się od kilkudziesięciu lat. Ciągłe powstają nowsze metody, bardziej dokładne, łatwiejsze w użytkowaniu, skomputeryzowane (Kapliński 2008). Z praktyki wiadomo, że harmonogramy przedsięwzięć budowlanych bardzo szybko ulegają dezaktualizacji. W wyniku tego następuje wydłużenie terminu realizacji całej budowy, bądź jej poszczególnych etapów. Przyczyn takiego stanu może być kilka. Związane one są zarówno z występowaniem zjawisk losowych (takich jak np. warunki pogodowe), jak i niedoskonałością metod planowania i szacowania wielkości czasów trwania poszczególnych czynności.

Nowa filozofia planowania i realizacji przedsięwzięcia, zaproponowana przez E. Goldratta cieszy się dużym zainteresowaniem w literaturze fachowej (Leach 2000, Rand 2000, Stayn 2002, Raz i in. 2003, Hejducki i in. 2004, Czarnigowska i in.2004, Rogalska 2005). Jednak w odniesieniu do budownictwa nie jest łatwo zastosować tę metodę. Napotyka się bowiem na szereg problemów, takich jak np. konieczność uwzględnienia nietypowych relacji pomiędzy zadaniami, występowanie kilku czynności początkowych i końcowych czy terminów dyrektywnych poszczególnych zadań. W dalszej części artykułu przedstawione zostaną wyniki analizy harmonogramu sieciowego z zastosowaniem buforów czasu na podstawie Metody Łańcucha Krytycznego i przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa czasu trwania pojedynczego zadania oraz wyznaczony na ich podstawie termin realizacji konkretnego obiektu budowlanego.

Łańcuch krytyczny, bufory czasu – wiadomości teoretyczne

Twórcą Metody Łańcucha Krytycznego (Critical Chain, zwanej też Critical Chain Construction Project – CCPM lub CC/BM) jest E. Goldratt (1997). Służy ona do wspomagania zarządzania projektami, gdy mamy do czynienia z warunkami niepewności czasu realizacji zadań składowych. Metodę uważa się za postęp w stosunku do metod CPM (1956r.) i PERT (1958r.). Najczęściej stosowana jest w informatyce, znacznie rzadziej w budownictwie (Milian 2004).

Metoda CCPM stara się ograniczyć działanie „Prawa Parkinsona”, które głosi, że niezależnie od faktycznej ilości pracy do wykonania, czas wykonania zadania zawsze zajmuje zaplanowaną wartość, a często nawet może go przekroczyć. Restrykcyjne założenia koncepcji Goldratta skracają planowany czas wykonania kolejnych czynności, motywują ludzi do cięższej pracy i dotrzymania ściśle ustalonego terminu. W konsekwencji, planiści podchodzą bardziej optymistycznie do szacowania czasu wykonania każdego zadania. Dodatkowo, ponieważ harmonogram układany jest restrykcyjnie, przyjmując bardzo krótkie planowane okresy wykonania zadań, bez ukrytych rezerw czasowych i nie można zwlekać z rozpoczęciem każdego zadania niweluje się również tzw. „syndrom studenta”, czyli tendencję do odkładania rozpoczęcia prac na ostatnią chwilę. Ewentualne opóźnienia w trakcie wykonywania zadań mogą być nadrabiane poprzez wykorzystanie świadomie zaprojektowanych buforów bezpieczeństwa, co nie wpłynie na opóźnienie całego projektu.

W Metodzie Łańcucha Krytycznego skrócenie czasu realizacji przedsięwzięcia uzyskuje się poprzez skrócenie czasu wykonania poszczególnych zadań, czyli likwidując indywidualne rezerwy poszczególnych zadań. Wszystkie te rezerwy przenosi się do bufora czasu, umieszczanego na końcu łańcucha krytycznego, przy czym łańcuch krytyczny definiowany jest jako „najdłuższy zbiór zależnych zadań koniecznych do osiągnięcia celu projektu z optymalnym uwzględnieniem wszelkich ograniczeń” (Milian 2004).

Bufor umieszczany na końcu łańcucha krytycznego nazywany jest buforem projektu (BP). Zmniejszając jego rozmiar można regulować termin zakończenia przedsięwzięcia oraz prawdopodobieństwo dotrzymania jego terminu. Dodatkowo stosuje się bufory zasilające (BZ). Umieszczane są one na końcu ciągów niekrytycznych dochodzących do ścieżki krytycznej. Gdy po wstawieniu buforów zasilających do harmonogramu projektu okaże się, że ścieżka krytyczna zmieni swoje położenie należy zmodyfikować koncepcję Goldratta. W tym celu należy zastosować dodatkowy typ bufora – bufor wspomagający projekt (BWP) oraz zastosować zmodyfikowaną (zmniejszoną) wartość bufora projektu BP'. Bufory

wspomagające BWP lokalizuje się na ciągu krytycznym, w celu zachowania zapasu czasu dla ciągu zasilającego, by ten nie stał się nowym ciągiem krytycznym (Połowski, Pruszyński 2008).

Reasumując: w harmonogramach sporządzanych według metody CCPM lokalizuje się bufory: projektu BP, zasilające BZ oraz wspomagające projekt BWP. Wprowadza się je jako czynności fikcyjne, które nie angażują zasobów, ale o ustalonym czasie trwania. Dzięki takiej strukturze sieci zależności i przyjętych czasach buforów, prawdopodobieństwo dotrzymania terminu końcowego realizacji przedsięwzięcia pozostaje dalej na dosyć wysokim poziomie. Istnienie buforów, poprzez ich obserwację, ułatwia ponad to kontrolę realizacji przedsięwzięcia. Gdy nastąpi zagrożenie opóźnienia zaplanowanych terminów, możliwe jest podjęcie adekwatnych działań zapobiegawczych zwiększających tempo pracy. Działania te nazywane są zarządzaniem buforami (Czarnigowska i in 2004).

Sposób wyznaczania wielkości buforów na podstawie rozkładu normalnego

W celu obliczenia wielkości buforów na podstawie rozkładu normalnego czasu trwania zadań należy założyć, że przyjęte przez wykonawcę czasy trwania czynności w harmonogramie, zostały określone z przyjętym prawdopodobieństwem np. 0,9 ($t_{0,9}$) oraz oszacować czasy trwania zadań z innym prawdopodobieństwem np. 0,5 ($t_{0,5}$). Bazując na przyjętych szacunkach czasu zadań oraz założeniu typu rozkładu czasu pojedynczego zadania, można wykonać dalsze obliczenia. W prowadzonych dalej analizach za typ rozkładu czasu zadania przyjęto rozkład normalny.

W celu dalszego uproszczenia obliczeń wielkości buforów przyjęto, że w sieci zależności analizowanego harmonogramu występują wyłącznie relacje między zadaniami typu zakończ – rozpocznij (ZR) z ewentualnymi dodatnimi lub ujemnymi wartościami zwłoki na tych relacjach.

Na podstawie założonych dwóch kwantyli czasu trwania wszystkich zadań oraz wiedząc, że dotyczą one rozkładu normalnego można obliczyć odchylenie standardowe czasów tych czynności (lub opóźnienia na relacji) za pomocą wzoru:

$$\delta = \frac{t_{0,9} - t_{0,5}}{U_{0,9}} \quad (1)$$

gdzie:

$U_{0,9}$ - odwrotność skumulowanego, standardowego rozkładu normalnego

Na podstawie obliczonego odchylenia standardowego oraz przyjętych dwóch kwantyli czasu czynności można następnie obliczyć kwantyl z założonym dowolnie innym

prawdopodobieństwem. Jeśli występują relacje ZR z opóźnieniami bądź przyspieszeniami pomiędzy zadaniami, należy wyznaczyć skrócone czasy trwania tych relacji w identyczny sposób jak dla czynności. Następnie należy wprowadzić wyznaczone czasy trwania czynności oraz relacji do programu MS Project.

Kolejny etap obliczeń to ustalenie położenia, ilości i wielkości buforów. W analizie bez uwzględniania zasobów, łańcuchem krytycznym w harmonogramie jest ścieżka krytyczna. Na jej końcu umieszcza się bufor projektu, którego zadaniem jest ochrona dotrzymania końcowego terminu przedsięwzięcia. Bufory zasilające, umieszcza się na końcach ciągów niekrytycznych, dochodzących do ciągu krytycznego. Chronią one zadania w ciągu krytycznym przed zmianą położenia tego ciągu.

Termin zakończenia całego ciągu czynności z przyjętym z góry prawdopodobieństwem obliczyć należy z dystrybucyj rozkładu normalnego na podstawie

parametrów tego rozkładu :

$$m_T = \sum_{i=1}^k t_{0,5}, \quad (2)$$

$$\delta_T = \sqrt{\sum_{i=1}^k \delta_i^2}, \quad (3)$$

gdzie:

δ_i - odchylenie standardowe czasu czynności i ,

k – liczba zadań analizowanego ciągu

Wielkości buforów oblicza się jako różnicę pomiędzy terminem zakończenia całego ciągu czynności chronionego przez dany bufor na założonym poziomie prawdopodobieństwa a sumą czasów czynności przyjętych dla danego prawdopodobieństwa (Połowski, Pruszyński 2008).

Należy również zauważyć, że jeśli na ścieżce krytycznej występuje oprócz bufora projektu chociaż jeden bufor wspomagający BWP, to obliczona ww. sposób suma czasów tych buforów będzie większa, niż pierwotnego, jednego bufora projektu BP (wynika to ze znanego prawa statystyki, że suma odchyłeń standardowych zmiennych losowych jest większa, niż odchylenie standardowe ich sum). W konsekwencji, właściwość ta powoduje, że termin zakończenia całego przedsięwzięcia jest nieco dłuższy niż pierwotnie obliczono, a poziom prawdopodobieństwa jego dotrzymania nieco wyższy niż pierwotnie zakładano. Chcąc tego uniknąć należy nieco zmniejszyć wartości wyliczonych buforów BWP i zmodyfikowanego bufora projektu BP' w taki sposób, aby ich suma stanowiła oryginalną wielkość niezmodyfikowanego bufora projektu BP.

Wyznaczenie wielkości buforów czasu dla obiektu biurowego „Globis” we Wrocławiu.

Globis¹ Wrocław jest to nowoczesny budynek biurowy usytuowany w centrum Wrocławia, przy ul. Powstańców Śląskich. Obiekt jest własnością Globe Trade Centre. Generalnym wykonawcą była międzynarodowa firma budowlana Hochtief. Budynek oddano do użytku w 2008r. Składa się on z 13 kondygnacji naziemnych i 3 podziemnych.

Harmonogram obiektu biurowego „Globis” we Wrocławiu początkowo zawierał łącznie 75 czynności, a czas realizacji całego przedsięwzięcia wynosił 374dni. Część zadań nie posiadała połączeń między sobą a w harmonogramie występowało wiele początków i końców. W celu przeprowadzenia opisanych wyżej obliczeń harmonogram ten został zmodyfikowany. Czynności zostały uporządkowane, niektóre podzielone na kilka etapów. Zmieniono zależności pomiędzy niektórymi zadaniami. Dodatkowo, w celu eliminacji wielu początków i końców sieci zależności oraz ustalenia jednoznacznego przebiegu ścieżki krytycznej, wprowadzono fikcyjne zadania „początek” i „koniec”. Wiedząc, że w harmonogramie występują połączenia typu zakończ-rozpozcnij (ZR) i rozpoczniej-rozpozcnij (RR), sieć zależności została tak zmodyfikowana, że zachowano pierwotne terminy wykonania zadań, wykorzystując wyłącznie relacje typu ZR wraz z przyspieszeniami bądź opóźnieniami pomiędzy zadaniami. Ostatecznie analizowany harmonogram składa się z 82 czynności, których realizacja łącznie trwa 392 dni.

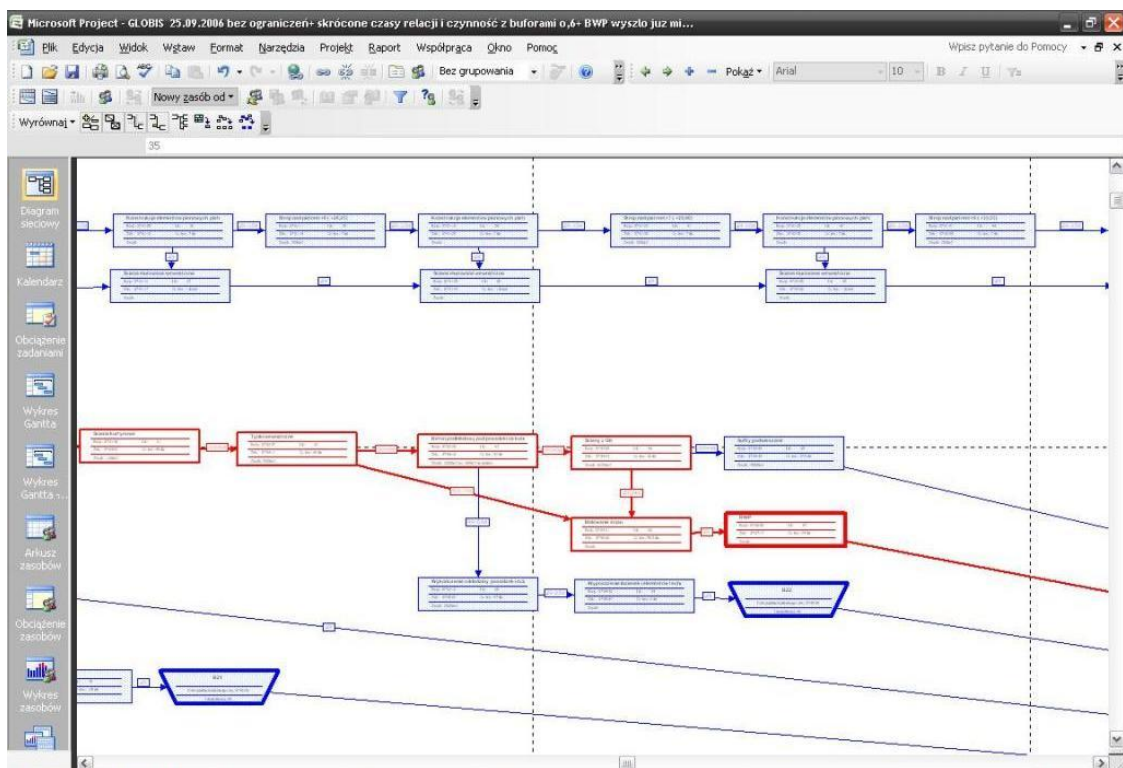
Opierając się na wiadomościach teoretycznych opisanych powyżej zlokalizowano położenie wszystkich niezbędnych buforów, dokonano obliczeń wielkości tych buforów czasu i skrócenia terminu realizacji tego przedsięwzięcia obiektu dla przykładowego prawdopodobieństwa 0,7 czasu wykonania pojedynczego zadania oraz prawdopodobieństwa 0,9 dla terminu zakończenia całego przedsięwzięcia.

Dla omawianego harmonogramu łańcuchem krytycznym jest ścieżka krytyczna, która „przebiega przez” roboty przygotowawcze, konstrukcję budynku: podziemną i część nadziemnej, roboty wykończeniowe oraz pozwolenia i odbiory. Na jej końcu umieszczony został bufor projektu. Dodatkowo na końcach ścieżek niekrytycznych, przy połączeniu z łańcuchem krytycznym wstawiono trzy bufory zasilające.

W trakcie przeprowadzania obliczeń okazało się, że po wstawieniu czasów zadań o prawdopodobieństwie 0,7 i buforów BP i BZ łańcuch krytyczny zmienił swój przebieg w stosunku do początkowego położenia. Taka sytuacja jest niedopuszczalna według koncepcji

¹ Informacje o obiekcie „Globis” udostępnione dzięki uprzejmości firmy Bureau Veritas Polska

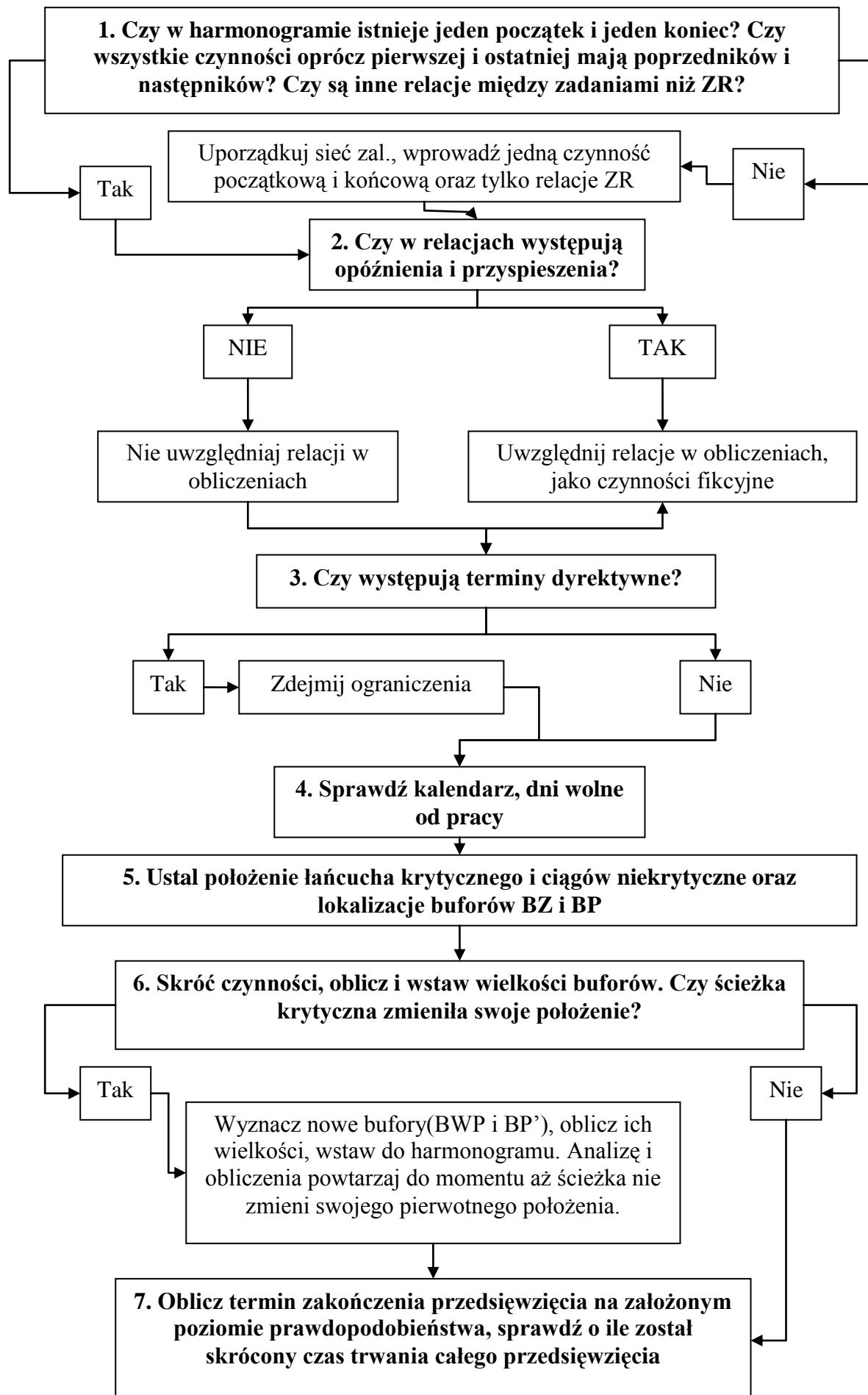
tej metody – stosowanie buforów powinno zwiększać bezpieczeństwo czasowe tego ciągu, a nie wpływać na zmianę ścieżki krytycznej. Należało zmodyfikować obliczenia. Autorzy zaproponowali wstawienie na ciągu krytycznym dodatkowego bufora - bufora wspomagającego projekt (BWP). Zlokalizowany on został na ścieżce krytycznej przed zadaniem, do którego dochodzą wszystkie ciągi niekrytyczne. Wielkość tego bufora obliczono w taki sam sposób jak wielkość bufora projektu, biorąc pod uwagę ciąg czynności, które ten bufor chroni. Na rys. 1 przedstawiono fragment sieci z Programu MS Project; pogrubione ramki w kształcie trapezów to bufory zasilające BZ, a pogrubiony prostokąt to bufor wspomagający projekt BWP.



Rysunek 1. Fragment harmonogramu budynku biurowego „Globis” z zaznaczoną lokalizacją wybranych buforów.

Picture 1. Part of schedule of „Globis” office building with some buffer sizes location being stressed.

Na rys. 2 przedstawiono schemat, który wytycza metodykę przeprowadzenia obliczeń i wskazuje na problemy, jakie można napotkać podczas ich wykonywania i które należy we wskazany powyżej sposób rozwiązać.



Rysunek 2. Schemat postępowania przy wyznaczaniu wielkości buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia

Picture 2. Diagram how to calculate buffers sizes and the due date.

Zestawienie wyników przeprowadzonych obliczeń i ich analiza

Po wprowadzeniu nowych buforów BWP i BP' oraz obliczeniu ich wielkości okazało się, że zgodnie z założeniami Goldratta ścieżka krytyczna nie ulega zmianie, a termin realizacji przedsięwzięcia został skrócony. Początkowy termin zakończenia przedsięwzięcia wynosił 392 dni. Po zastosowaniu częściowo zmodyfikowanej koncepcji łańcucha krytycznego termin zakończenia przedsięwzięcia został skrócony dla prawdopodobieństwa trwania czynności 0,7 do 304 dni.

Wyniki analiz zamieszczono w tabeli poniżej dla wielkości buforów podanych w dniach roboczych:

Tabela 1. Zestawienie terminów zakończenia całego przedsięwzięcia, prawdopodobieństwo ich dotrzymania oraz ich procentowe skrócenie dla kwantyli czasu czynności z prawdopodobieństwem 0,7 oraz kwantyla 0,9 (bez skrócenia).

Table 1. Due dates listing, probability to meet them and reduction given in percentage for quantile activity time with 0.7 probability and quantile 0,9 (without reduction)

Czas czynności	Rodzaj bufora					Termin zakończenia przedsięwzięcia wg. MS Project	Skrócenie całego przedsięwzięcia w %	Prawdopodobieństwo dotrzymania terminu końcowego przedsięwzięcia
	BWP	BZ1	BZ2	BZ3	BP'			
$t_{0,9}$	0	0	0	0	0	392	0	0,998
$t_{0,7}$	17	17	27	13	7	304	22	0,943

Podsumowanie i wnioski

Analizie poddano harmonogram sieciowy obiektu biurowego „ Globis” we Wrocławiu. Wyznaczono w nim lokalizacje i wielkości buforów czasu oraz termin zakończenia całego przedsięwzięcia. Wykazano konieczność zastosowania bufora wspomagającego projekt BWP w celu utrzymania stałego przebiegu łańcucha krytycznego. Wszystkie obliczenia realizowane były w dwóch programach: arkusza kalkulacyjnym Microsoft Excel oraz programie Microsoft Project. Analizę wykonano na podstawie rozkładu normalnego czasu trwania zadań i dla kwantyla prawdopodobieństwa czasu trwania każdego zadania równego 0,7. Początkowo założono występowanie dwóch typów buforów: zasilających (BZ) i projektu (BP). Po skróceniu czasów trwania czynności i przesunięć czasowych na relacjach oraz wprowadzeniu oszacowanych buforów okazało się jednak, że

ścieżka krytyczna zmieniła swoje położenie w stosunku do harmonogramu początkowego. W celu skrócenia terminu całego przedsięwzięcia i wprowadzenia buforów czasu bez zmiany ścieżki krytycznej, metodę Goldratta trzeba było zmodyfikować wprowadzając dodatkowy bufor wspomagający BWP. Dzięki temu rozwiązaniu metoda Goldratta znalazła zastosowanie w omawianym przykładzie obliczeniowym.

Przeprowadzone obliczenia pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- założenie rozkładu normalnego czasu trwania pojedynczego zadania oraz przyjęcie oszacowań czasu na podstawie dwóch kwantyli, pozwala na szybkie obliczenie dowolnego kwantyla czasu trwania czynności a także wielkości wszystkich buforów czasu,
- wyznaczenie czasów zadań z prawdopodobieństwem mniejszym niż 0,9 pozwala stworzyć rezerwę czasu wykorzystywaną w buforach zasilających, wspomagających i projektu,
- wielkość buforów zależy od skrócenia czasu zadań oraz przyjętego prawdopodobieństwa zakończenia całego przedsięwzięcia,
- w analizowanym harmonogramie prawdopodobieństwo dotrzymania terminu realizacji całego przedsięwzięcia dla czasów trwania zadań równych $t_{0,7}$ i obliczonych wartości buforów wynosi 0,943,
- możliwość dobierania wariantowych harmonogramów zakładających wolniejsze lub szybsze tempo prac (mniej lub bardziej agresywnych) przy realizacji planowanego obiektu można regulować rozłożeniem proporcji pomiędzy sumą czasów zadań (przyjętym prawdopodobieństwem czasu ich trwania) a wielkością buforów,
- przyjęcie czasów czynności o wartościach kwantyli z mniejszym prawdopodobieństwem (np. 0,6) prowadzi do zbudowania harmonogramu zakładającego szybsze tempo prac (bardziej agresywnych rozwiązań) z większymi buforami i odwrotnie,
- podwyższenie prawdopodobieństwa dotrzymania całego przedsięwzięcia można osiągnąć przez zwiększenie bufora końcowego projektu,

- w analizowanym obiekcie skrócone czasy czynności i przesunięć czasowych na relacjach, jak również wyznaczone buforów czasu pozwoliły na skrócenie terminu całego przedsięwzięcia o 22% w przypadku kwantyla czasu wszystkich zadań równego 0,7,
- dalszych badań wymaga opracowanie metodyki wyznaczania wielkości buforów przy relacjach między zadaniami typu rozpocznij – rozpocznij (RR) i zakończ – zakończ (ZZ).

Celem artykułu było przedstawienie zastosowania koncepcji łańcucha krytycznego dla typowego przedsięwzięcia budowlanego. W praktyce okazuje się jednak, że harmonogramy budowlane posiadają złożoną sieć zależności, która utrudnia proste zastosowanie tej koncepcji. Kwestia wykorzystania buforów czasu analizowana jest przez badaczy od ponad 10 lat. Wiadomo, że wpływają one pozytywnie na dotrzymanie terminu końcowego realizacji przedsięwzięcia, jednak dla potrzeb budownictwa koncepcja ta wymaga dalszych badań i udoskonaleń.

LITEATURA:

- CZARNIGOWSKA A., JAŚKOWSKI P., SOBOTKA A.: *Zastosowanie Metody Łańcucha krytycznego w Harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych*; Przegląd Organizacji 11/2004
- GOLDRATT E. M.: *Critical chain*. Great Barrerinton, MA: The North River Press, 1997
- HAJDUCKI Z., ROGALSKA., Shortening the realisation time of building projects with application of theory of constraints and critical chain scheduling, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004, Vol. X, Suppl. 2,
- KAPLIŃSKI O.: Development and usefulness of planning techniques and decision making foundations on the example of construction enterprises in Poland. *Technological and Economic Development of Economy*, 2008, Vol. XIV, No. 4, 492-502.
- LEACH L.P. 2000: *Critical Chain Project Management*, Artech House, Boston, London
- MILIAN Z.: *Łańcuch krytyczny w budownictwie*; Czasopismo techniczne 11-B/2004
- POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K. 2008: *Wyznaczanie wielkości buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia w harmonogramach budowlanych*. *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej* Nr 90. Seria Studia i materiały Nr 20, s. 289-297,
- RAND G. K.: Critical chain: the theory of constraints applied to project management. *International Journal of Project Management* 18 (2000),
- RAZ T., BARNES R., DVIR D., A critical look at Critical Chain Project Management, *Project Management Journal*, 2003, Vol. 34, No. 4,

ROGALSKA M.: *Zastosowanie buforów czasu w harmonogramowaniu procesów budowlanych*; Przegląd budowlany 6/2005

STEYN H.: *Project management applications of the theory of constraints beyond critical chain scheduling*, International Journal of Project Management 20 (2002), pp. 75-80.

Summary

This article describes basics of Critical Chain concept and Buffer Management, as well as an approach to project management that comes from the Theory of Constraints. CCPM is a method with based on this particular concept. The article points out how to define place and the size of buffers to protect the due date and the critical chain of building object while preserving their specificity. This information were presented in concrete computational example of “Globis” office building in Wrocław.

Streszczenie

W artykule została omówiona koncepcja Łącucha Krytycznego i Zarządzania Buforami, która wywodzi się z Teorii Ograniczeń oraz możliwości jej zastosowania do harmonogramów budowlanych. CCPM to metoda, która powstała na bazie tej koncepcji. W artykule omówiono metodykę lokalizowania i wyznaczania wielkości buforów czasu tak, aby chronić łańcuch krytyczny w harmonogramach obiektów budowlanych oraz wyznaczać termin zakończenia całego przedsięwzięcia na określonym poziomie prawdopodobieństwa. Zaproponowana metodyka została zastosowana w konkretnym przykładzie obliczeniowym dotyczącym budynku biurowego „Globis” we Wrocławiu.

Author’s address:

Faculty of Engineering and Environmental Sciences
Department of Geotechnical Engineering
The Warsaw School of Life Sciences
ul. Nowoursynowska 159
02-776 Warszawa
mieczyslaw_polonski@sggw.pl
aneta_ziolkowska@sggw.pl