

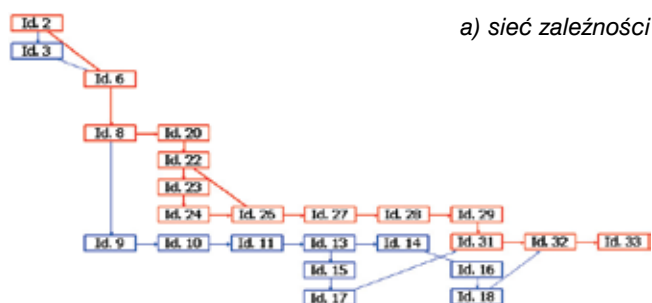
# Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych (cz. II) – praktyczne zastosowanie

Dr hab. inż. Mieczysław Połoński, mgr inż. Kamil Pruszyński,  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa

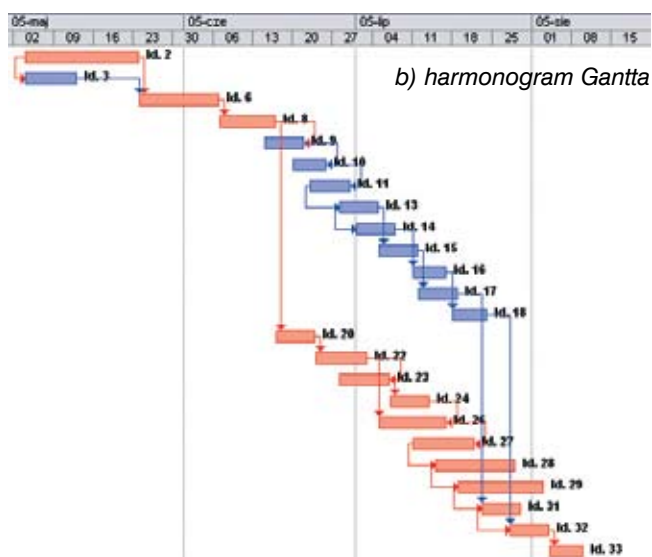
## 1. Wprowadzenie

W części pierwszej niniejszego artykułu przedstawiono podstawy teoretyczne koncepcji przystosowania metody łańcucha krytycznego do przedsięwzięć budowlanych [3]. Obecnie przedstawiony zostanie przykład obliczeniowy stosowania metody łańcucha krytycznego wg Goldratta oraz po autorskiej modyfikacji. Obliczenia dokonano w programie MS Project. Posłużono się w tym celu harmonogramem robót ziemnych stacji metra A19 Marymont, który liczy 169 zadań. Z uwagi jednak na obszerność materiału badawczego, dokonano jego agregacji i skrócenia tylko do pewnego fragmentu sieci, który jednak został tak dobrany, aby reprezentował wszystkie konfiguracje połączeń jakie zostały dostrzeżone w całym przedsięwzięciu. Ograniczono się w ten sposób do 24 czynności (rys. 1). W tabeli 1 zamieszczono zestawienie zadań z powyższej sieci wraz z podstawowymi danymi potrzebnymi do dalszej analizy. Na czerwono zostały zaznaczone zadania leżące na ścieżce krytycznej. Przytoczone dane umożliwiają powtórzenie przeprowadzonych w artykule obliczeń w dowolnym programie do analizy harmonogramów sieciowych.

Należy zwrócić uwagę, że w harmonogramie występują niestandardowe połączenia typu zakończ-zakończ (ZZ), rozpocznij-rozpozcznij (RR) oraz przyspieszenia lub opóźnienia pomiędzy zadaniami. W artykule skupiono się jednak na problematyce lokalizacji buforów, nie zaś nad typami relacji pomiędzy poszczególnymi zadaniami, ich ewentualnymi opóźnieniami bądź przyspieszeniami oraz ich wpływem na dalszy tok obliczeń. Skomplikowany układ niestandardowych połączeń typu ZZ i RR, występujący w analizowanej sieci, został zamieniony na standardowe relacje typu ZR (zakończ-rozpozcznij). Zostało to jednak tak przekształcone, aby dokładnie odwzorować wszystkie powiązania z pierwotnego harmonogramu. Połączenia typu rozpocznij-zakończ (RZ) nie występowały w rozpatrywanym przykładzie harmonogramu.



a) sieć zależności



b) harmonogram Gantta

**Rys. 1.** Wybrany fragment sieci (24 zadania) z harmonogramu robót ziemnych stacji metra A19 Marymont z zaznaczonym na czerwono przebiegiem ciągu głównego  
Źródło: opracowanie własne

Wprowadzone uproszczenia struktury sieci pozwoliły na prostszą interpretację ścieżki krytycznej i lepszą kontrolę całego przedsięwzięcia.

Terminy realizacji robót ziemnych stacji metra A19 Marymont oraz zagregowanego fragmentu sieci zestawiono w tabeli 2.

Praca przebiegała w systemie jednozmianowym, 6 dni w tygodniu, bez świąt (w czasie realizacji przedsię-

**Tabela 1.** Zestawienie czynności z wybranego fragmentu sieci (24 zadania) z harmonogramu robót ziemnych stacji metra A19 Marymont z zaznaczonymi na czerwono zadaniami ciągu głównego Źródło: opracowanie własne

| Id | Nazwa zadania  | Czas trwania (dni) | Rozpoczęcie         | Zakończenie         | Następniki         | ZC (dni) |
|----|--|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------|
| 2  | MOBILIZACJA I PRZYGOTOWANIE SPRZĘTU  | 17                 | 2005.05.04<br>09:00 | 2005.05.23<br>18:00 | 3RR; 6             | 0        |
| 3  | PRZYGOTOWANIE FRONTU ROBÓT   | 8                  | 2005.05.04<br>09:00 | 2005.05.12<br>18:00 | 6                  | 9        |
| 6  | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 11–18 i 37–44   | 11                 | 2005.05.24<br>09:00 | 2005.06.06<br>18:00 | 8                  | 0        |
| 8  | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 19–26 i 31–36   | 9                  | 2005.06.07<br>09:00 | 2005.06.16<br>18:00 | 9ZZ+4 dni;<br>20   | 0        |
| 9  | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 6                  | 2005.06.15<br>09:00 | 2005.06.21<br>18:00 | 10ZZ+4 dni         | 3        |
| 10 | WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 5A i 5B  | 6                  | 2005.06.20<br>09:00 | 2005.06.25<br>18:00 | 11ZZ+3 dni         | 3        |
| 11 | SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 18–25 i 32–37 | 6                  | 2005.06.23<br>09:00 | 2005.06.29<br>18:00 | 13RR+4 dni         | 3        |
| 13 | SZALOWANIE SEKCJI 5A   | 6                  | 2005.06.28<br>09:00 | 2005.07.04<br>18:00 | 14RR<br>+3 dni; 15 | 3        |
| 14 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5A  | 6                  | 2005.07.01<br>09:00 | 2005.07.07<br>18:00 | 16ZR+2 dni         | 3        |
| 15 | SZALOWANIE SEKCJI 5B   | 6                  | 2005.07.05<br>09:00 | 2005.07.11<br>18:00 | 17                 | 4        |
| 16 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5B  | 6                  | 2005.07.11<br>09:00 | 2005.07.16<br>18:00 | 18                 | 3        |
| 17 | SZALOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A   | 6                  | 2005.07.12<br>09:00 | 2005.07.18<br>18:00 | 31                 | 4        |
| 18 | ZBROJENIE I BETONOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A  | 6                  | 2005.07.18<br>09:00 | 2005.07.23<br>18:00 | 32                 | 3        |
| 20 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 27–30 i 58–59   | 6                  | 2005.06.17<br>09:00 | 2005.06.23<br>18:00 | 22                 | 0        |
| 22 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 8–10 i 45–47  | 8                  | 2005.06.24<br>09:00 | 2005.07.02<br>18:00 | 26;23ZZ<br>+3 dni  | 0        |
| 23 | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 8                  | 2005.06.28<br>09:00 | 2005.07.06<br>18:00 | 24                 | 0        |
| 24 | TYMCZASOWE PRZEŁOŻENIE KABLI ENERGETYCZNYCH I TRAKCYJNYCH – WIĄZKA 2                                   | 6                  | 2005.07.07<br>09:00 | 2005.07.13<br>18:00 | 26ZZ+3 dni         | 0        |
| 26 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 1–7 i 48–57   | 11                 | 2005.07.05<br>09:00 | 2005.07.16<br>18:00 | 27ZZ+4 dni         | 0        |
| 27 | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 10                 | 2005.07.11<br>09:00 | 2005.07.21<br>18:00 | 28RR+4 dni         | 0        |
| 28 | WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 1, 2A, 2B  | 12                 | 2005.07.15<br>09:00 | 2005.07.28<br>18:00 | 29RR+3 dni         | 0        |
| 29 | SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 1–8 i 47–57   | 13                 | 2005.07.19<br>09:00 | 2005.08.02<br>18:00 | 31RR+4 dni         | 0        |
| 31 | SZALOWANIE SEKCJI 1  | 6                  | 2005.07.23<br>09:00 | 2005.07.29<br>18:00 | 32RR+4 dni         | 0        |
| 32 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 1   | 6                  | 2005.07.28<br>09:00 | 2005.08.03<br>18:00 | 33                 | 0        |
| 33 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 2B  | 5                  | 2005.08.04<br>09:00 | 2005.08.09<br>18:00 |                    | 0        |

**Tabela 2.** Zestawienie czasu trwania przedsięwzięcia: roboty ziemne stacji metra A19 Marymont Źródło: opracowanie własne

| Nazwa harmonogramu   | Termin rozpoczęcia | Termin zakończenia | Ilość dni | Uwagi      |
|--|--------------------|--------------------|-----------|------------|
| Roboty ziemne stacji metra A19 Marymont                            | 04.05.2005         | 21.02.2006         | 247       | 169 zadań  |
| Wybrany fragment harmonogramu realizacji stacji metra A19 Marymont | 04.05.2005         | 09.08.2006         | 83        | 24 zadania |

wzięcia przyjęto następujące dni świąteczne: 26.05., 15.08., 01.11., 11.11., 26.12.), w godzinach od 9 do 18 z przerwą (13–14), zgodnie z faktycznym stanem jaki miał miejsce podczas budowy.

W artykule skupiono się na koncepcji lokalizacji buforów, nie zaś nad ich wielkościami. Dlatego też przyjęto do niniejszej analizy 50% wartość skróceń wszystkich zadań i ich opóźnień bądź przyspieszeń zdefiniowanych w relacjach między czynnościami. Analiza wielkości buforów będzie tematem osobnego opracowania.

W dalszej części artykułu przedstawiono kolejne kroki obliczeń, w których zastosowano metodę łańcucha

krytycznego wg Goldratta, a następnie jej modyfikację dotyczącą lokalizacji buforów czasu w oparciu o przedstawiony w pierwszej części artykułu schemat blokowy postępowania [3].

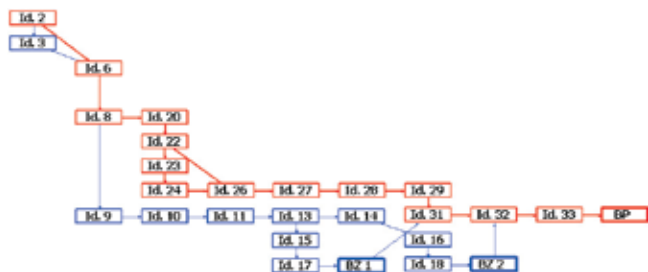
## 2. Praktyczne zastosowanie buforów czasu wg Goldratta

W pierwszym kroku dokonano skrócenia o 50% wszystkich czasów trwania zarówno czynności, jak i istniejących opóźnień lub przyspieszeń zachodzących pomiędzy nimi. Zestawienie tak zmodyfikowanych czynności i ich powiązań ilustruje tabela 3.

**Tabela 3.** Zestawienie skróconych czasów trwania o 50% dla wybranego fragmentu harmonogramu

Źródło: opracowanie własne

| Id | Nazwa zadania  | Czas trwania (dni) | Rozpoczęcie         | Zakończenie         | Następniki         | ZC (dni) |
|----|--|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------|
| 2  | MOBILIZACJA I PRZYGOTOWANIE SPRZĘTU  | 9                  | 2005.05.04<br>09:00 | 2005.05.13<br>18:00 | 3ZR–9 dni; 6       | 0        |
| 3  | PRZYGOTOWANIE FRONTU ROBÓT   | 4                  | 2005.05.04<br>09:00 | 2005.05.07<br>18:00 | 6                  | 5        |
| 6  | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 11–18 i 37–44   | 6                  | 2005.05.14<br>09:00 | 2005.05.20<br>18:00 | 8                  | 0        |
| 8  | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 19–26 i 31–36   | 5                  | 2005.05.21<br>09:00 | 2005.05.27<br>18:00 | 9ZR–1 dzień;<br>20 | 0        |
| 9  | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 3                  | 2005.05.27<br>09:00 | 2005.05.30<br>18:00 | 10ZR–1<br>dzień    | 22       |
| 10 | WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 5A i 5B  | 3                  | 2005.05.30<br>09:00 | 2005.06.01<br>18:00 | 11ZR–2 dni         | 22       |
| 11 | SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 18–25 i 32–37 | 3                  | 2005.05.31<br>09:00 | 2005.06.02<br>18:00 | 13ZR–1<br>dzień    | 22       |
| 13 | SZALOWANIE SEKCJI 5A   | 3                  | 2005.06.02<br>09:00 | 2005.06.04<br>18:00 | 14ZR–2 dni;<br>15  | 22       |
| 14 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5A  | 3                  | 2005.06.03<br>09:00 | 2005.06.06<br>18:00 | 16ZR+1<br>dzień    | 24       |
| 15 | SZALOWANIE SEKCJI 5B   | 3                  | 2005.06.06<br>09:00 | 2005.06.08<br>18:00 | 17                 | 1        |
| 16 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5B  | 3                  | 2005.06.08<br>09:00 | 2005.06.10<br>18:00 | 18                 | 24       |
| 17 | SZALOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A   | 3                  | 2005.06.09<br>09:00 | 2005.06.11<br>18:00 | 31                 | 1        |
| 18 | ZBROJENIE I BETONOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A  | 3                  | 2005.06.11<br>09:00 | 2005.06.14<br>18:00 | 32                 | 24       |
| 20 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 27–30 i 58–59   | 3                  | 2005.05.28<br>09:00 | 2005.05.31<br>18:00 | 22                 | 0        |
| 22 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 8–10 i 45–47  | 4                  | 2005.06.01<br>09:00 | 2005.06.04<br>18:00 | 26;23ZR–3<br>dni   | 0        |
| 23 | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 4                  | 2005.06.02<br>09:00 | 2005.06.06<br>18:00 | 24                 | 0        |
| 24 | TYMCZASOWE PRZEŁOŻENIE KABLI ENERGETYCZNYCH I TRAKCYJNYCH – WIĄZKA 2                                   | 3                  | 2005.06.07<br>09:00 | 2005.06.09<br>18:00 | 26ZR–4 dni         | 0        |
| 26 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 1–7 i 48–57   | 6                  | 2005.06.06<br>09:00 | 2005.06.11<br>18:00 | 27ZR–3 dni         | 0        |
| 27 | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 5                  | 2005.06.09<br>09:00 | 2005.06.14<br>18:00 | 28ZR–3 dni         | 0        |
| 28 | WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 1, 2A, 2B  | 6                  | 2005.06.11<br>09:00 | 2005.06.17<br>18:00 | 29ZR–5 dni         | 0        |
| 29 | SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 1–8 i 47–57   | 7                  | 2005.06.13<br>09:00 | 2005.06.20<br>18:00 | 31ZR–5 dni         | 0        |
| 31 | SZALOWANIE SEKCJI 1  | 3                  | 2005.06.15<br>09:00 | 2005.06.17<br>18:00 | 32ZR–1<br>dzień    | 0        |
| 32 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 1   | 3                  | 2005.06.17<br>09:00 | 2005.06.20<br>18:00 | 33                 | 0        |
| 33 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 2B  | 3                  | 2005.06.21<br>09:00 | 2005.06.23<br>18:00 |                    | 0        |



**Rys. 2.** Fragment sieci ze wstawionymi buforami czasu zgodnie z metodą łańcucha krytycznego wg Goldratta  
Źródło: opracowanie własne

Problem użycia buforów w sieci wymaga określenia lokalizacji poszczególnych buforów (i ich ilości) oraz czasów ich trwania. W tym celu wstawiono do harmonogramu buforów czasu zgodnie z założeniami metody łańcucha krytycznego, tzn. bufor projektu i buforów zasilające [1, 2]. Przedstawiono to na rysunku 2.

**Tabela 4.** Zestawienie obliczeń buforów projektu zgodnie z metodą łańcucha krytycznego wg Goldratta  
Źródło: opracowanie własne

| Nazwa bufora  | Id ciągu czynności |            | Termin trwania ciągu czynności |            |            |            |              |            |            |            | Obliczony czas trwania bufora |
|---|--------------------|------------|--------------------------------|------------|------------|------------|--------------|------------|------------|------------|-------------------------------|
|   |                    |            | przed skróceniem               |            |            |            | po skróceniu |            |            |            |                               |
|   |                    |            | START                          | STOP       | START      | STOP       | START        | STOP       | START      | STOP       |                               |
| i   | j                  | $T_{pp_i}$ | $T_{pk_j}$                     | $T_{sp_i}$ | $T_{sk_j}$ | $T_{sp_i}$ | $T_{sk_j}$   | $T_{sp_i}$ | $T_{sk_j}$ | $WB_{i-j}$ |                               |
| BP<br>ciąg Id: 2-5-8-20-22-23-24-26-27-28-29-31-32-33 | 2                  | 33         | 04.05                          | 1          | 09.08      | 83         | 04.05        | 1          | 23.06      | 43         | 20                            |
| BZ 1<br>ciąg Id: 9-10-11-13-15-17                     | 9                  | 17         | 15.06                          | 36         | 18.07      | 64         | 27.05        | 20         | 11.06      | 33         | 8                             |
| BZ 2<br>ciąg Id: 9-10-11-13-14-16-18                  | 9                  | 18         | 15.06                          | 36         | 23.07      | 69         | 27.05        | 20         | 14.06      | 35         | 9                             |

Czerwona pogrubiona ramka przedstawia bufor projektu (BP), natomiast pogrubione niebieskie ramki obrazują umiejscowienie buforów zasilających (BZ). Bufory zasilające zostały zlokalizowane na końcach ciągów niekrytycznych łączących się ze ścieżką krytyczną. Początkowo jako wielkość wszystkich buforów czasu przyjęto 0 dni. Posłużyło to sprawdzeniu prawidłowości dokonanej modyfikacji budowy sieci i połączeń między zadaniami. Dopiero po upewnieniu się, że po takiej operacji harmonogram nie uległ żadnym zmianom, wstawiono odpowiednie wielkości buforów.

W celu obliczenia czasu trwania bufora projektu wyznaczono przebieg ścieżki krytycznej w rozpatrywanej sieci. Początkowa i końcowa data trwania tego ciągu została zamieniona na kolejne dni przebiegu przedsięwzięcia. Uzyskano w ten sposób wartości numeryczne rozpoczęcia i zakończenia ciągu krytycznego. Do zamiany dat na wartości numeryczne trwania przedsięwzięcia (z uwzględnieniem obowiązującego kalendarza) można użyć programu MC EXCEL lub MS PROJECT. W tym drugim przypadku

najłatwiej jest zadeklarować sieć jednoczynnościową obliczaną na podstawie kalendarza analizowanego przedsięwzięcia i na podstawie czasu trwania tej czynności oraz daty zakończenia odczytać poszukiwane wartości numeryczne.

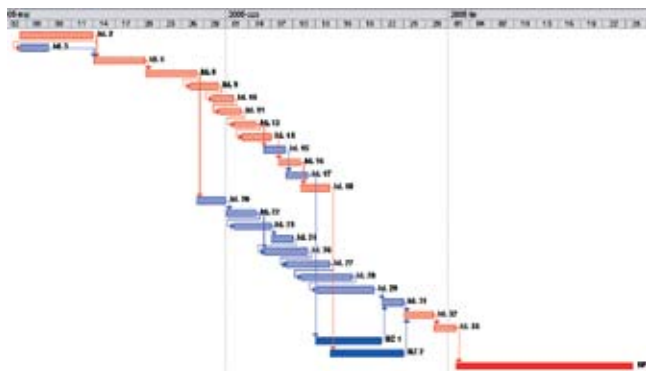
W następnej kolejności obliczono długość czasu trwania ścieżki krytycznej i wyznaczono różnicę pomiędzy końcem a początkiem tego ciągu. Następnie ustalono skrócone czasy czynności, termin zakończenia przedsięwzięcia oraz czas, o jaki można zredukować długość ścieżki krytycznej. W tym celu obliczono różnicę pomiędzy długością trwania pierwotnego a zredukowanego ciągu krytycznego. Na zakończenie dokonano procentowego skrócenia wyliczonego w ten sposób czasu trwania ścieżki krytycznej o 50%.

W analogiczny sposób postąpiono przy wyznaczaniu wielkości pozostałych buforów czasu dla opisywanego harmonogramu. Na ciągach niekrytycznych podstawą obliczeń były terminy najpóźniejsze wykonania rozpatrywanych czynności. Posłużono się przy

tym wzorem dla sieci jednopunktowych, który został opisany w pierwszej części artykułu:

$$WB_{i-j} = P \cdot [(T_{pk_j} - T_{pp_i}) - (T_{sk_j} - T_{sp_i})]$$

Po wstawieniu danych otrzymano wielkości poszczególnych buforów:



**Rys. 3.** Fragment sieci po zastosowaniu metody łańcucha krytycznego wg Goldratta  
Źródło: opracowanie własne

$$BP: WB_{2-33} = 50\% \times [(83 - 1) - (43 - 1)] = 20$$

$$BZ 1: WB_{9-17} = 50\% \times [(64 - 36) - (33 - 20)] = 7,5 \approx 8$$

$$BZ 2: WB_{9-18} = 50\% \times [(69 - 36) - (35 - 20)] = 9$$

Dane i wyniki do obliczeń zestawiono w tabeli 4. Po wstawieniu do opisywanej sieci czasów trwania buforów obliczonych zgodnie z podaną metodyką uzyskano termin zakończenia przedsięwzięcia 70 dni (25.07.2006). Przebieg ścieżki krytycznej przedstawiono na rysunku 3, a tabelaryczne zestawienie wyników w tabeli 5.

**Tabela 5.** Zestawienie terminów zadań z harmonogramu po zastosowaniu metody łańcucha krytycznego wg Goldrat'a  
Źródło: opracowanie własne

| Id | Nazwa zadania  | Czas trwania (dni) | Rozpoczęcie         | Zakończenie         | Następniki         | ZC (dni) |
|----|--|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------|
| 2  | MOBILIZACJA I PRZYGOTOWANIE SPRZĘTU  | 9                  | 2005.05.04<br>09:00 | 2005.05.13<br>18:00 | 3ZR-9; 6           | 0        |
| 3  | PRZYGOTOWANIE FRONTU ROBÓT   | 4                  | 2005.05.04<br>09:00 | 2005.05.07<br>18:00 | 6                  | 5        |
| 6  | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 11–18 i 37–44   | 6                  | 2005.05.14<br>09:00 | 2005.05.20<br>18:00 | 8                  | 0        |
| 8  | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 19–26 i 31–36   | 5                  | 2005.05.21<br>09:00 | 2005.05.27<br>18:00 | 9ZR-1<br>dzień; 20 | 0        |
| 9  | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 3                  | 2005.05.27<br>09:00 | 2005.05.30<br>18:00 | 10ZR-1<br>dzień    | 0        |
| 10 | WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 5A i 5B  | 3                  | 2005.05.30<br>09:00 | 2005.06.01<br>18:00 | 11ZR-2 dni         | 0        |
| 11 | SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 18–25 i 32–37 | 3                  | 2005.05.31<br>09:00 | 2005.06.02<br>18:00 | 13ZR-1<br>dzień    | 0        |
| 13 | SZALOWANIE SEKCJI 5A   | 3                  | 2005.06.02<br>09:00 | 2005.06.04<br>18:00 | 14ZR-2 dni;<br>15  | 0        |
| 14 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5A  | 3                  | 2005.06.03<br>09:00 | 2005.06.06<br>18:00 | 16ZR+1<br>dzień    | 0        |
| 15 | SZALOWANIE SEKCJI 5B   | 3                  | 2005.06.06<br>09:00 | 2005.06.08<br>18:00 | 17                 | 1        |
| 16 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5B  | 3                  | 2005.06.08<br>09:00 | 2005.06.10<br>18:00 | 18                 | 0        |
| 17 | SZALOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A   | 3                  | 2005.06.09<br>09:00 | 2005.06.11<br>18:00 | 34                 | 1        |
| 18 | ZBROJENIE I BETONOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A  | 3                  | 2005.06.11<br>09:00 | 2005.06.14<br>18:00 | 35                 | 0        |
| 20 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 27–30 i 58–59   | 3                  | 2005.05.28<br>09:00 | 2005.05.31<br>18:00 | 22                 | 7        |
| 22 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 8–10 i 45–47  | 4                  | 2005.06.01<br>09:00 | 2005.06.04<br>18:00 | 26;23ZR<br>-3 dni  | 7        |
| 23 | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 4                  | 2005.06.02<br>09:00 | 2005.06.06<br>18:00 | 24                 | 7        |
| 24 | TYMCZASOWE PRZEŁOŻENIE KABLI ENERGETYCZNYCH I TRAKCYJNYCH – WIĄZKA 2                                   | 3                  | 2005.06.07<br>09:00 | 2005.06.09<br>18:00 | 26ZR-4 dni         | 7        |
| 26 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 1–7 i 48–57   | 6                  | 2005.06.06<br>09:00 | 2005.06.11<br>18:00 | 27ZR-3 dni         | 7        |
| 27 | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 5                  | 2005.06.09<br>09:00 | 2005.06.14<br>18:00 | 28ZR-3 dni         | 7        |
| 28 | WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 1, 2A, 2B  | 6                  | 2005.06.11<br>09:00 | 2005.06.17<br>18:00 | 29ZR-5 dni         | 7        |
| 29 | SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 1–8 i 47–57   | 7                  | 2005.06.13<br>09:00 | 2005.06.20<br>18:00 | 31ZR-5 dni         | 7        |
| 31 | SZALOWANIE SEKCJI 1  | 3                  | 2005.06.22<br>09:00 | 2005.06.24<br>18:00 | 32ZR<br>-1 dzień   | 1        |
| 32 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 1   | 3                  | 2005.06.25<br>09:00 | 2005.06.28<br>18:00 | 33                 | 0        |
| 33 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 2B  | 3                  | 2005.06.29<br>09:00 | 2005.07.01<br>18:00 | 36                 | 0        |
| 34 | BUFOR BZ 1   | 8                  | 2005.06.13<br>09:00 | 2005.06.21<br>18:00 | 31                 | 1        |
| 35 | BUFOR BZ 2   | 9                  | 2005.06.15<br>09:00 | 2005.06.24<br>18:00 | 32                 | 0        |
| 36 | BUFOR BP   | 20                 | 2005.07.02<br>09:00 | 2005.07.25<br>18:00 |                    | 0        |

**Tabela 6.** Zestawienie obliczeń buforów czasu w zmodyfikowanej metodzie łańcucha krytycznego

Źródło: opracowanie własne

| Nazwa bufora                                       | Id ciągu czynności |    | Termin trwania ciągu czynności |                             |                             |                             |              |      |                   |    | Obliczony czas trwania bufora |
|--|--------------------|----|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|------|-------------------|----|-------------------------------|
|  |                    |    | przed skróceniem               |                             |                             |                             | po skróceniu |      |                   |    |                               |
|  | i                  | j  | START                          | STOP                        | START                       | STOP                        | START        | STOP | WB <sub>i-j</sub> |    |                               |
|  |                    |    | T <sub>pp<sub>i</sub></sub>    | T <sub>pk<sub>j</sub></sub> | T <sub>sp<sub>j</sub></sub> | T <sub>sk<sub>j</sub></sub> |              |      |                   |    |                               |
| BRN<br>ciąg Id: 9-10-11-13                         | 9                  | 13 | 15.06                          | 36                          | 04.07                       | 52                          | 27.05        | 20   | 04.06             | 27 | 5                             |
| BZ 1<br>ciąg Id: 15-17                             | 15                 | 17 | 05.07                          | 53                          | 18.07                       | 64                          | 06.06        | 28   | 11.06             | 33 | 3                             |
| BZ 2<br>ciąg Id: 14-16-18                          | 14                 | 18 | 01.07                          | 50                          | 23.07                       | 69                          | 03.06        | 26   | 14.06             | 35 | 5                             |
| BWP 1<br>ciąg Id:<br>2-5-8-20-22-23-24-26-27-28-29 | 2                  | 29 | 04.05                          | 1                           | 02.08                       | 77                          | 04.05        | 1    | 20.06             | 40 | 15                            |
| BWP 2<br>ciąg Id: 31                               | 31                 | 31 | 23.07                          | 69                          | 29.07                       | 74                          | 15.06        | 36   | 17.06             | 38 | 2                             |
| BP'<br>ciąg Id: 32-33                              | 32                 | 33 | 28.07                          | 73                          | 09.08                       | 83                          | 17.06        | 38   | 23.06             | 43 | 3                             |

Jak można zauważyć, ciąg krytyczny zmienił swój przebieg w stosunku do początkowego położenia (patrz rys. 1). Wynika to ze zmiany czasów poszczególnych zadań i ich zapasów czasu. Taka sytuacja jest niedopuszczalna w metodzie łańcucha krytycznego, gdyż stosowanie buforów nie może naruszyć przebiegu ścieżki krytycznej, a wręcz przeciwnie: powinno podnieść bezpieczeństwo czasowe ciągu głównego, tak aby nie został on zagrożony, a lokalizacja przebiegu ścieżki krytycznej była zgodna z pierwotnym harmonogramem.

### 3. Zmodyfikowana koncepcja lokalizacji buforów czasu

Jak wynika z dotychczasowych obliczeń, zastosowane w przykładzie bufor czasu wg wymagań metody Goldratta zmieniają przebieg ścieżki krytycznej. W toku badań jakie przeprowadzili autorzy, dokonano modyfikacji koncepcji lokalizacji buforów czasu wraz z wylączeniami czasu ich trwania.

Do badanego fragmentu harmonogramu wprowadzono bufor: bufor wspomagający projekt (BWP) oraz bufor reagujący na ścieżce niekrytycznej (BRN), zgodnie z zasadami przedstawionymi w części pierwszej artykułu [3]. Obliczenia czasów trwania tych buforów dokonano analogicznie jak w tabeli 3 i zestawiono w tabeli 6.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki obliczeń (po zastosowaniu rozwiązań) w postaci harmonogramu sieciowego. Do wymienionych wcześniej oznaczeń buforów (BP – czerwony i BZ – niebieski) dołączono bufor: BWP (zielony) oraz BRN (żółty).

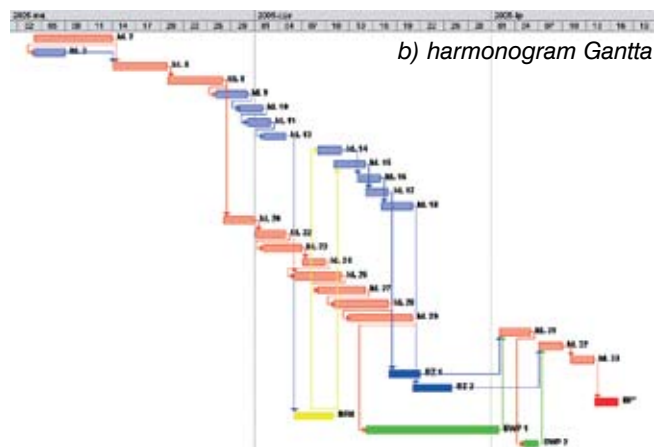
Tabelaryczne zestawienie czasów i terminów poszczególnych zadań zastosowanych buforów oraz zazna-

czonych na czerwono czynności krytycznych, przedstawiono w tabeli 7.

Przy tak zastosowanej lokalizacji i rozmiarach buforów uzyskuje się efekt skrócenia całego przedsięwzięcia zgodnie z założeniami łańcucha krytycznego, przy niezmienionym położeniu ścieżki krytycznej.



a) sieć zależności



b) harmonogram Gantta

**Rys. 4.** Praktyczne zastosowanie buforów czasu w zmodyfikowanej metodzie łańcucha krytycznego

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 7.** Zestawienie terminów zadań po zastosowaniu buforów czasu w zmodyfikowanej metodzie łańcucha krytycznego  
 Źródło: opracowanie własne

| Id | Nazwa zadania  | Czas trwania (dni) | Rozpoczęcie         | Zakończenie         | Następniki         | ZC (dni) |
|----|--|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------|
| 2  | MOBILIZACJA I PRZYGOTOWANIE SPRZĘTU  | 9                  | 2005.05.04<br>09:00 | 2005.05.13<br>18:00 | 3ZR–9; 6           | 0        |
| 3  | PRZYGOTOWANIE FRONTU ROBÓT   | 4                  | 2005.05.04<br>09:00 | 2005.05.07<br>18:00 | 6                  | 5        |
| 6  | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 11–18 i 37–44   | 6                  | 2005.05.14<br>09:00 | 2005.05.20<br>18:00 | 8                  | 0        |
| 8  | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 19–26 i 31–36   | 5                  | 2005.05.21<br>09:00 | 2005.05.27<br>18:00 | 9ZR–1<br>dzień; 20 | 0        |
| 9  | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 3                  | 2005.05.27<br>09:00 | 2005.05.30<br>18:00 | 10ZR–1<br>dzień    | 9        |
| 10 | WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 5A i 5B  | 3                  | 2005.05.30<br>09:00 | 2005.06.01<br>18:00 | 11ZR–2 dni         | 9        |
| 11 | SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 18–25 i 32–37 | 3                  | 2005.05.31<br>09:00 | 2005.06.02<br>18:00 | 13ZR–1<br>dzień    | 9        |
| 13 | SZALOWANIE SEKCJI 5A   | 3                  | 2005.06.02<br>09:00 | 2005.06.04<br>18:00 | 37                 | 9        |
| 14 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5A  | 3                  | 2005.06.09<br>09:00 | 2005.06.11<br>18:00 | 16ZR+1<br>dzień    | 9        |
| 15 | SZALOWANIE SEKCJI 5B   | 3                  | 2005.06.11<br>09:00 | 2005.06.14<br>18:00 | 17                 | 9        |
| 16 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5B  | 3                  | 2005.06.14<br>09:00 | 2005.06.16<br>18:00 | 18                 | 9        |
| 17 | SZALOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A   | 3                  | 2005.06.15<br>09:00 | 2005.06.17<br>18:00 | 34                 | 9        |
| 18 | ZBROJENIE I BETONOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A  | 3                  | 2005.06.17<br>09:00 | 2005.06.20<br>18:00 | 35                 | 9        |
| 20 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 27–30 i 58–59   | 3                  | 2005.05.28<br>09:00 | 2005.05.31<br>18:00 | 22                 | 0        |
| 22 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 8–10 i 45–47  | 4                  | 2005.06.01<br>09:00 | 2005.06.04<br>18:00 | 26; 23ZR<br>–3 dni | 0        |
| 23 | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 4                  | 2005.06.02<br>09:00 | 2005.06.06<br>18:00 | 24                 | 0        |
| 24 | TYMCZASOWE PRZEŁOŻENIE KABLI ENERGETYCZNYCH I TRAKCYJNYCH – WIĄZKA 2                                   | 3                  | 2005.06.07<br>09:00 | 2005.06.09<br>18:00 | 26ZR–4 dni         | 0        |
| 26 | WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 1–7 i 48–57   | 6                  | 2005.06.06<br>09:00 | 2005.06.11<br>18:00 | 27ZR–3 dni         | 0        |
| 27 | WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ   | 5                  | 2005.06.09<br>09:00 | 2005.06.14<br>18:00 | 28ZR–3 dni         | 0        |
| 28 | WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 1, 2A, 2B  | 6                  | 2005.06.11<br>09:00 | 2005.06.17<br>18:00 | 29ZR–5 dni         | 0        |
| 29 | SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 1–8 i 47–57   | 7                  | 2005.06.13<br>09:00 | 2005.06.20<br>18:00 | 38ZR–5 dni         | 0        |
| 31 | SZALOWANIE SEKCJI 1  | 3                  | 2005.07.02<br>09:00 | 2005.07.05<br>18:00 | 39ZR<br>–1 dzień   | 0        |
| 32 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 1   | 3                  | 2005.07.07<br>09:00 | 2005.07.09<br>18:00 | 33                 | 0        |
| 33 | ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 2B  | 3                  | 2005.07.11<br>09:00 | 2005.07.13<br>18:00 | 36                 | 0        |
| 34 | BUFOR BZ 1   | 3                  | 2005.06.18<br>09:00 | 2005.06.21<br>18:00 | 31                 | 9        |
| 35 | BUFOR BZ 2   | 5                  | 2005.06.21<br>09:00 | 2005.06.25<br>18:00 | 32                 | 9        |
| 36 | BUFOR BP'  | 3                  | 2005.07.14<br>09:00 | 2005.07.16<br>18:00 |                    | 0        |
| 37 | BUFOR BRN  | 5                  | 2005.06.06<br>09:00 | 2005.06.10<br>18:00 | 15; 14ZR<br>–2 dni | 9        |
| 38 | BUFOR BWP 1  | 15                 | 2005.06.15<br>09:00 | 2005.07.01<br>18:00 | 31                 | 0        |
| 39 | BUFOR BWP 2  | 2                  | 2005.07.05<br>09:00 | 2005.07.06<br>18:00 | 32                 | 0        |

**Tabela 8.** Zestawienie otrzymanych wyników zastosowania metody łańcucha krytycznego Źródło: opracowanie własne

| Wyszczególnienie   | Termin rozpoczęcia | Termin zakończenia | Ilość dni | Uwagi                                 |
|--|--------------------|--------------------|-----------|---------------------------------------|
| Harmonogram pierwotny  | 04.05.2005         | 09.08.2005         | 83        | (patrz tabela 2)                      |
| Harmonogram z zastosowaniem metody łańcucha krytycznego wg Goldratta | 04.05.2005         | 25.07.2005         | 70        | ciąg główny zmienił swoje położenie   |
| Harmonogram wg zmodyfikowanej metody łańcucha krytycznego            | 04.05.2006         | 16.07.2005         | 63        | ciąg główny pozostał na swoim miejscu |

#### 4. Podsumowanie

Z przedstawionych badań wynika, że stosowanie metody łańcucha krytycznego dla złożonych sieci zależności wielu przedsięwzięć budowlanych bez żadnych modyfikacji nie przynosi spodziewanych efektów.

Świadczyć o tym może zmieniający swoje położenie łańcuch krytyczny, jak również fakt, że termin końcowy przedsięwzięcia uzyskany z obliczeń nie jest zgodny z założeniami metody.

Rezerwa czasu, jaka została osiągnięta w analizowanym przykładzie (50% z 83, tzn. około 42), skrócona o procentową redukcję trwania ciągu (50% z 42, tzn. 21), dodana do skróconego czasu całego przedsięwzięcia (42+21=63) nie równa się wyliczeniom opartym na metodzie łańcucha krytycznego (70) – tabela 7. Zaproponowana w artykule modyfikacja pozwala na skrócenie przewidywanego terminu realizacji przedsięwzięcia z wykorzystaniem buforów czasu, bez zmiany przebiegu ścieżki krytycznej.

Mając już określoną lokalizację buforów czasu, tak że spełnia ona wytyczne Goldratta [1], należy się zastanowić nad prawidłowym doбором skrócenia czasu trwania zadań. Autorzy w niniejszym artykule przyjęli redukcję o 50%, celem przedstawienia problemu lokalizacji buforów w metodzie łańcucha krytycznego, nie analizując jednak poprawności takiego rozwiązania. W przyszłości należy rozważyć kilka innych wariantów skróceń czasu trwania poszczególnych zadań i ich wpływu na rozmiary buforów w sieci zależności. Temu zagadnieniu jednak będzie poświęcony osobny artykuł.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Goldratt E. M., Łańcuch krytyczny, Wyd. WERBEL, Warszawa 2000  
 [2] Milian Z., Łańcuch krytyczny w budownictwie. Czasopismo Techniczne z. 11-B/2004  
 [3] Połoński M., Pruszyński K., Lokalizacja buforów czasu w metodzie Łańcucha Krytycznego w harmonogramach robót budowlanych (cz. 1) – podstawy teoretyczne, Przegląd Budowlany 2/2008, s. 45–49

## FORUM ZARZĄDZANIA nieruchomościami

*bezpłatny serwis branżowy*

**Obowiązkowe przeglądy** budynków, nawet kilka razy w roku, czy zmienione zasady eksploatacji i dokumentowania stanu technicznego – to tylko **niektóre z rygorystycznie kontrolowanych przez Nadzór Budowlany** elementów.

Aby mogli Państwo zgodnie z prawem dbać o bezpieczeństwo budynków, zgromadzić kompletną dokumentację oraz zachować obowiązujące terminy przeglądów, przygotowaliśmy prosty w obsłudze program:

### Przeгляд i kontrola budynku na CD

Gotowe do wykorzystania dokumenty, instrukcje i protokoły zgodne z wytycznymi Nadzoru Budowlanego i PSP

Program umożliwia m.in.:

- **kontrolowanie wszystkich warunków bezpieczeństwa** w budynkach i obiektach zgodnie z wymogami obowiązującymi od dnia 19 września 2007 r.,
- **sporządzenie protokołów i formularzy przeglądów różnych części budynków** oraz wzorów wniosków i raportów wymaganych przez PSP i INB,
- **przygotowanie wszystkich dokumentów, zgodnie z Dz. U. z 2007 r. Nr 99, poz. 665**, w tym m.in.: instrukcji bezpieczeństwa, planów ratowniczych i pożarowych.

Zapraszamy do zapoznania się z darmową wersją demonstracyjną, dostępną na [www.e-forum.pl](http://www.e-forum.pl).