

METODA ŚCIEŻKI KRYTYCZNEJ – STUDIUM PRZYPADKU

Celina BARTNICKA

Streszczenie: W dzisiejszych czasach przedsiębiorstwa pracują w bardzo szybko zmieniających się warunkach, więc aby osiągnąć sukces, stawia się wysokie wymagania w stosunku do kompetencji osób zarządzających i podejmujących ważne decyzje. Podejmowanie racjonalnych decyzji, które dadzą przedsiębiorstwu przewagę konkurencyjną, wspomaga się graficznymi metodami optymalizacyjnymi. W niniejszej pracy zaprezentowano studium przypadku wykorzystania metody ścieżki krytycznej CPM (Critical Path Method) wraz z jej analizą CPA (Critical Path Analysis). Przedstawiono graficznie proces technologiczny odlewania niskociśnieniowego, a następnie zdefiniowano ścieżkę krytyczną i wyznaczono najkrótszy czas realizacji czynności.

Słowa kluczowe: metoda ścieżki krytycznej, analiza drogi krytycznej, model graficzny

1. Wprowadzenie

Przedsiębiorstwa stale pracują nad postępowaniem i usprawnianiem procesów zarządzania, planowania, analizy i kontroli, a bardzo istotną rolę w funkcjonowaniu i ulepszaniu procesów odgrywa czynnik czasu. Czasowe organizowanie procesów pracy zawsze było interesującym zagadnieniem, czego efektem było tworzenie graficznych metod optymalizacyjnych. Graficzny model pozwala uzyskać dokładne matematyczne rozwiązanie w postaci precyzyjnej oceny, więc w efekcie grafy stanowią narzędzie do wspomaganie decyzji. Przykłady metod graficznych to: wykresy Gantta, metoda PERT (Program Evaluation and Review Technique) i metoda ścieżki krytycznej CPM (Critical Path Method) wraz z jej analizą CPA (Critical Path Analysis) [8]. Metody te mają ze sobą wiele wspólnego, jednak w przypadku wyznaczania drogi krytycznej przedsięwzięcia dokładniejsza jest ta najmniej popularna, czyli metoda CPM. CPM jest na pierwszy rzut oka nieco bardziej skomplikowana i trudniejsza w odczytaniu, gdyż wymaga chociażby znajomości konstrukcji sieci, ale dostarcza istotnych informacji o planowanych rezerwach czasowych pozwalających szybko stwierdzić, czy gdy nastąpi opóźnienie prac, termin zakończenia danego przedsięwzięcia nie będzie zagrożony. Zależności pomiędzy czynnościami są również bardziej klarowne w CPM, niż na wykresie Gantta [1].

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie wykorzystania metody CPM do zbudowania graficznego modelu dla produkcji jednego odlewu według procesu technologicznego odlewania niskociśnieniowego, a następnie zdefiniowanie ścieżki krytycznej i wyznaczenie najkrótszego czasu realizacji czynności.

2. Metoda ścieżki krytycznej

Metoda ścieżki krytycznej (nazywana również metodą drogi krytycznej) miała swój początek w latach 1956-1957 w Stanach Zjednoczonych. Jeden z oddziałów branży chemicznej Du Pont (Integrated Engineering Control Group) przy współpracy z firmą Sperry Rand Corporation opracował z jej pomocą przebieg prac remontowych instalacji aparatury chemicznej [3].

Metoda ścieżki krytycznej skupia się na realizacji tzw. ścieżki krytycznej, czyli przebiegu zadań, które wyznaczają najkrótszy możliwy czas realizacji przedsięwzięcia. Skrócenie czasu realizacji ścieżki krytycznej umożliwia przyspieszenie realizacji całego projektu. Zasadą tej metody jest zobrazowanie czynności składających się na przedsięwzięcie w formie grafów, w których łuki oznaczają czynności, a wierzchołki zdarzenia, czyli punkty początkowe lub końcowe tych czynności [4]. CPM należy do sieci deterministycznych, czyli takich sieci, w których czas trwania czynności lub innej przypisanej wartości skalarnej jest jednoznacznie określony (zdeteminowany) oraz również struktura sieci jest zdeterminowana (jest wyznaczona kolejność czynności zgodnie z ich następstwem w czasie) [8].

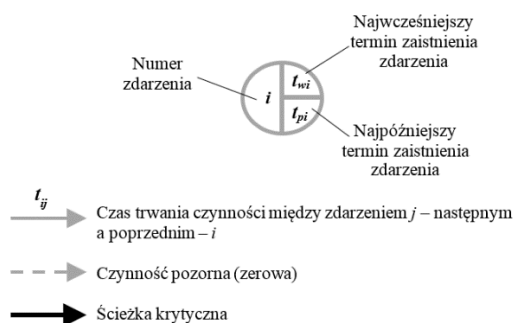
Wspomniana metoda jest bardzo efektywna w projektowaniu i optymalizacji powtarzalnych procesów produkcyjnych. Metoda CPM pozwala na dokonanie analizy wielu wariantów procesu, a następnie wybór takiego wariantu, który jest najlepszy według określonego kryterium [2]. Za kryterium można przyjąć czas lub koszty, ale także metoda może być wykorzystana do optymalizacji wykorzystania zasobów, zarówno zasobów ludzkich, jak i zasobów rzeczowych (np. środki transportu, maszyny) [6].

Metodę ścieżki krytycznej można podzielić na dwa etapy [7]:

- krok do przodu: wyznaczenie najwcześniejszych momentów rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych czynności, oraz znalezienie czasu krytycznego przedsięwzięcia;
- krok do tyłu: wyznaczenie najpóźniejszych momentów rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych czynności, określenie najpóźniejszego harmonogramu optymalnego, znalezienie rezerw czasowych (zapasów czasu) dla poszczególnych czynności oraz zdefiniowanie zbioru czynności krytycznych.

W metodzie ścieżki krytycznej za czynność uważa się jednostkę pracy do wykonania, natomiast warunkujące jej rozpoczęcie lub zakończenie nazywa się zdarzeniem. W siatce współzależnych czynności mogą wystąpić także tzw. czynności pozorne (zerowe), które nie pochłaniają czasu, ale są konieczne z punktu widzenia na powiązania logiczne dwóch zdarzeń.

W siatce czynności stosuje się oznaczenia przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Oznaczenia stosowane w siatkach czynności
Źródło: [5]

Po graficznym zbudowaniu siatki czynności należy dokonać obliczeń terminów, w których najwcześniej i najpóźniej mogą zaistnieć dane zdarzenia [5].

$$t_{pi} = \min\{t_{pj} - t_{ij}\}; i < j \quad (1)$$

gdzie: i - zdarzenie występujące przed zdarzeniem j ,
 j - zdarzenie występujące po zdarzeniu i ,
 t_{pi} - najpóźniejszy termin zaistnienia zdarzenia i ,
 t_{pj} - najpóźniejszy termin zaistnienia zdarzenia j ,
 t_{ij} - czas trwania czynności między zdarzeniem j – następnym a poprzednim – i .

$$t_{wj} = \max\{t_{wi} + t_{ij}\}; i < j \quad (2)$$

gdzie: i - zdarzenie występujące przed zdarzeniem j ,
 j - zdarzenie występujące po zdarzeniu i ,
 t_{wj} - najwcześniejszy termin zaistnienia zdarzenia j ,
 t_{wi} - najwcześniejszy termin zaistnienia zdarzenia i ,
 t_{ij} - czas trwania czynności między zdarzeniem j – następnym a poprzednim – i .

Kolejno można obliczyć różnicę pomiędzy tymi terminami dla każdego zdarzenia, czyli luz czasowy l_i oraz całkowity zapas z_{ij}^c , który stanowi rezerwę czasu do wykorzystania na wykonanie czynności bez wpływu na termin realizacji projektu [5].

$$l_i = t_{pi} - t_{wj}; i < j \quad (3)$$

gdzie: i - zdarzenie występujące przed zdarzeniem j ,
 j - zdarzenie występujące po zdarzeniu i ,
 l_i - luz czasowy zdarzenia i ,
 t_{pi} - najpóźniejszy termin zaistnienia zdarzenia i ,
 t_{wj} - najwcześniejszy termin zaistnienia zdarzenia j .

$$z_{ij}^c = t_{pj} - t_{wi} - t_{ij}; i < j \quad (4)$$

gdzie: i - zdarzenie występujące przed zdarzeniem j ,
 j - zdarzenie występujące po zdarzeniu i ,
 z_{ij}^c - całkowity zapas między zdarzeniem j – następnym a poprzednim – i ,
 t_{pj} - najpóźniejszy termin zaistnienia zdarzenia j ,
 t_{wi} - najwcześniejszy termin zaistnienia zdarzenia i ,
 t_{ij} - czas trwania czynności między zdarzeniem j – następnym a poprzednim – i .

Zdarzenia, dla których luz czasowy jest równy zero nazywamy zdarzeniami krytycznymi, a ścieżka w sieci od zdarzenia początkowego, poprzez zdarzenia krytyczne do zdarzenia końcowego, określana jest ścieżką krytyczną [8].

3. Studium przypadku

Metodę CPM wykorzystano do analizy przebiegu procesu odlewania niskociśnieniowego. Składa się na to szereg czynności, które można pogrupować jako przygotowanie modelu gipsowego, przygotowanie oprzyrządowania i maszyny odlewniczej,

zalanie formy ciekłym metalem oraz obróbkę wykańczającą i kontrolę jakości.

Zasilająca komórka organizacyjna dostarcza modele gipsowe na stanowisko. Model gipsowy należy poddać procesowi suszenia w specjalnym piecu suszarniczym w celu usunięcia z niego wody. Z maszyny odlewniczej demontuje się poprzednio używane oprzyrządowanie i montuje kolejno zdefiniowany układ zalewowy i kokilę, składającą się z czterech stalowych odpowiednio wyprofilowanych płyt z radiatorem. Aby rozpocząć właściwy etap odlewania trzeba wstępnie nagrzać formę. Wygrzewanie przygotowuje kokilę do odlewania, powoduje lepszą przyczepność pokrycia, przyczynia się do uzyskania szczelności i usuwa wilgoć. W opisywanej instalacji do odlewania aluminium zastosowano dwa źródła ciepła - elektryczne i gazowe. Najpierw uruchamia się grzanie elektryczne układu zalewowego i płyty górnej, a następnie za pomocą palników gazowych skierowanych w środek formy dogrzewa się pozostałe oprzyrządowanie. Kolejnym etapem jest załadunek nagrzanego modelu gipsowego we wnęce układu zalewowego. Od zamknięcia formy proces wykonywany jest automatycznie. Następuje wypełnienie kokili ciekłym metalem, krzepnięcie i na koniec chłodzenie, aby utwardzić odlew, żeby był wystarczająco wytrzymały mechanicznie na czynności związane z wyjęciem go z formy. Operator wypełnia raport potwierdzający wykonanie odlewu wraz z informacją o parametrach procesowych. Po rozładunku można przejść do rozcięcia odlewu i wybicia gipsu. Dokonuje się obróbki wykańczającej i kontroli jakości. W ten sposób otrzymuje się na wyjściu odlew aluminiowy.

Tabele 1 i 2 przedstawiają opis zdarzeń i czynności w analizowanym procesie odlewania niskociśnieniowego.

Tabela 1. Opis zdarzeń w procesie odlewania

NR	OPIS ZDARZENIA
1	START: Rozpoczęcie wykonania odlewu
2	Rozpoczęcie załadunku modelu do pieca suszarniczego
3	Rozpoczęcie demontażu układu zalewowego
4	Rozpoczęcie montażu układu zalewowego
5	Rozpoczęcie demontażu kokili
6	Rozpoczęcie montażu kokili
7	Rozpoczęcie grzania układu zalewowego elektrycznie
8	Rozpoczęcie grzania układu zalewowego gazowo
9	Rozpoczęcie załadunku modelu na maszynę odlewniczą
10	Rozpoczęcie zamknięcia kokili i zalewania formy metalem
11	Rozpoczęcie chłodzenia formy
12	Rozpoczęcie wypełnienia raportu elektronicznego
13	Rozpoczęcie rozładunku odlewu na wózek
14	Rozpoczęcie wybicia modelu z odlewu
15	Rozpoczęcie obróbki wykańczającej
16	KONIEC: Odlew po kontroli jakości

Tabela 2. Opis czynności w procesie odlewania

CZYNNOŚĆ	t_{ij} [min]	OPIS CZYNNOŚCI
<1,2>	2	Załadunek modelu do pieca suszarniczego
<2,7>	1050	Suszenie modelu gipsowego w piecu suszarniczym
<1,3>	9	Demontaż układu zalewowego
<3,4>	10	Montaż układu zalewowego
<4,5>	11	Demontaż kokili
<5,6>	36	Montaż kokili
<6,9>	18	Wykonanie ustawień i regulacji maszyny
<6,7>	100	Grzanie układu zalewowego elektrycznie
<6,8>	40	Grzanie układu zalewowego gazowo
<7,9>	3	Załadunek modelu na maszynę odlewniczą
<9,10>	7	Zamknięcie kokili i zalewanie formy metalem
<10,11>	4	Chłodzenie formy
<10,12>	1	Wypełnienie raportu elektronicznego
<11,13>	1	Rozładunek odlewu na wózek
<13,14>	4	Wybicie modelu z odlewu
<14,15>	12	Obróbka wykańczająca
<15,16>	4	Kontrola jakości

Zbudowano siatkę czynności, a następnie obliczono terminy, w których najwcześniej i najpóźniej mogą zaistnieć dane zdarzenia, luz czasowy i całkowity zapas. Poniżej zaprezentowano przykładowe obliczenia dla zdarzenia nr 3, czyli rozpoczęcia demontażu układu zalewowego. Najpóźniejszy termin zaistnienia zdarzenia wynosi w tym przypadku 895 minut, najwcześniejszy termin zaistnienia zdarzenia 9 minut, luz czasowy 886 minut, a całkowity zapas pomiędzy tym zdarzeniem a kolejnym (rozpoczęcie demontażu kokili) 886 minut. W zaprezentowanych obliczeniach wykorzystano wzór 1, 2, 3 i 4.

$$t_{p3} = \min\{t_{p4} - t_{34}\}$$

$$t_{p3} = \min\{905 - 10\} = \min\{895\} = 895$$

$$t_{w3} = \max\{t_{w1} + t_{13}\}$$

$$t_{w3} = \max\{0 + 9\} = \max\{9\} = 9$$

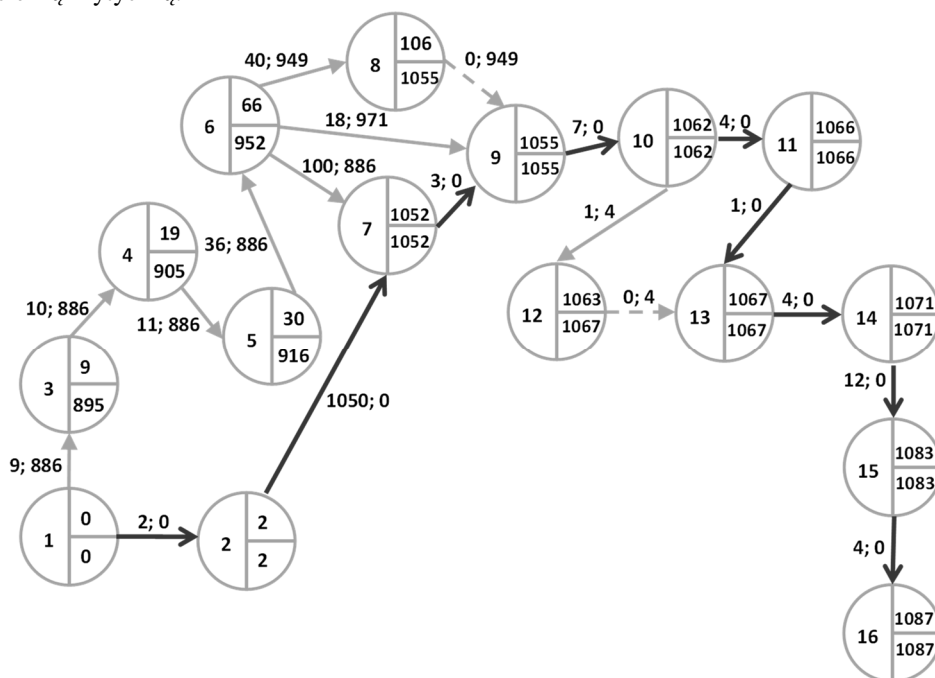
$$l_3 = t_{p3} - t_{w3}$$

$$l_3 = 895 - 9 = 886$$

$$z_{34}^c = t_{p4} - t_{w3} - t_{34}$$

$$z_{34}^c = 905 - 9 - 10 = 886$$

Na rysunku 2 przedstawiono sieć przedsięwzięcia procesu odlewania z wyznaczoną ścieżką krytyczną.



Rys. 2. Sieć przedsięwzięcia z wyznaczoną ścieżką krytyczną

Ścieżka krytyczna przebiega przez czynności, takie jak:

- załadunek modelu do pieca suszarniczego,
- suszenie modelu gipsowego w piecu suszarniczym,
- załadunek modelu na maszynę odlewniczą,
- zamknięcie kokili i zalewanie formy metalem,
- chłodzenie formy,
- rozładunek odlewu na wózek,
- wybicie modelu z odlewu,
- obróbka wykańczająca,
- kontrola jakości.

Najkrótszy czas realizacji przedsięwzięcia to 1087 minut. Zapasy czynności należących do ścieżki krytycznej są równe zero.

4. Podsumowanie i wnioski

Najkrótszy czas realizacji przedsięwzięcia to 1087 minut. Wyznacza go ścieżka krytyczna, która jest trwającym najdłużej ze wszystkich możliwych ciągów chronologicznie ułożonych zadań takich, że każde następne nie może się rozpocząć, dopóki poprzednie się nie skończy (np. nie można rozpocząć załadunku modelu na maszynę odlewniczą, dopóki nie skończono grzania układu zalewowego elektrycznie). Zakończenie ostatniego zadania ścieżki krytycznej oznacza zakończenie przedsięwzięcia.

Zbudowany model graficzny pokazuje, które czynności mogą być wykonywane

równoległe. Dzięki ścieżce krytycznej wiadomo, na których czynnościach należy się skupić by przyspieszyć realizację. Bywa bowiem tak, że przyspiesza się wszystkie zadania bez rozróżnienia czy jest to sensowne. Skrócenie czynności niekrytycznej nie zmienia ścieżki krytycznej. Zmiana ta nie wpływa również na najkrótszy czas realizacji przedsięwzięcia. Przyspieszenie czynności niekrytycznych jest marnotrawstwem, gdyż nie wpływa to na końcowy efekt przedsięwzięcia. Natomiast skrócenie czynności krytycznej wpływa na redukcję czasu całego przedsięwzięcia. Należy pamiętać, że gdy odpowiednio skróci się czas czynności krytycznych może dojść do zmiany przebiegu ścieżki krytycznej. W pokazanym przykładzie można by było się zająć usprawnieniem suszenia modelu gipsowego w piecu. Dodatkowo zapas pomiędzy zdarzeniami pokazuje możliwość wykorzystania czasu pracy operatora na inne czynności lub pracę na innym stanowisku, co zwiększy jego wydajność.

Metoda CPM przedstawia przebieg przedsięwzięcia, a analiza tych sieci graficznych może przyczynić się do skrócenia cyklu realizacji o kilka czy kilkanaście procent oraz do pełnego wykorzystania zasobów do tego przypisanych. Ścieżka krytyczna pokazuje również na jakich czynnościach należy się skupić, gdzie można dodać środki, które skutecznie mogą przyspieszyć realizację, unikając marnotrawstwa.

Literatura

1. Grześ A.: Wykres Gantta a metoda ścieżki krytycznej (CPM). Optimum. Studia Ekonomiczne nr 4 (70), Białystok 2014, 195-216.
2. Pająk E.: Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006, 179.
3. Porębski Z., Jarosławski K.: Metody analizy drogi krytycznej i ich zastosowanie w przedsiębiorstwie. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971, 5-63.
4. Sarnowski J.: Zarządzanie przedsiębiorstwem turystycznym. ALMAMER Wyższa Szkoła Ekonomiczna, Warszawa 2007, 269-270.
5. Sołtysiak J., Rzeczkowski R.: Metody sieciowe w organizowaniu produkcji budowlano-montażowej. Wydawnictwo ART., Olsztyn 1984, 6, 23-40.
6. Trocki M.: Zarządzanie Projektami. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2003, 244.
7. Trzaskalik T. (red.): Wybrane zagadnienia zarządzania projektami. Informatyka w badaniach operacyjnych. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, Katowice 2005, 18-19.
8. Woźniak A.: Grafy i sieci w technikach decyzyjnych. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi PAN w Krakowie, Kraków 2010, 7-9, 32-41.

Mgr inż. Celina BARTNICKA
Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
10-719 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 11
tel./fax: (0-89) 524 61 25
e-mail: c.bartnicka@interia.pl