

mgr inż. Łukasz Rzepecki¹⁾
ORCID: 0000-0002-1444-9007

Metoda redukcji przestoju w pracy brygad realizujących przedsięwzięcia budowlane

Method for reducing gaps in the crews' work executing construction projects

DOI: 10.15199/33.2022.12.19

Streszczenie. W artykule rozważany jest problem harmonizacji pracy brygad, realizujących niejednorodny proces budowlany w warunkach deterministycznych. Opracowano model matematyczny problemu minimalizacji przestoju w pracy brygad, uwzględniając różne warianty działań, których celem jest redukcja czasu realizacji procesów budowlanych i całego przedsięwzięcia. Dzięki zastosowaniu opracowanego modelu możliwe jest zapewnienie ciągłości pracy brygad, a tym samym redukcja strat czasu oraz znacznie lepsza organizacja pracy na budowie.

Słowa kluczowe: harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych; ciągłość pracy brygad; metody intensyfikacji pracy; modele sieciowe; zarządzanie w budownictwie.

Abstract. This paper analyses scheduling work of crews executing non-uniform construction processes in deterministic conditions. A mathematical model to minimizing work gaps was formulated, taking into account different variants of actions aimed at reducing the duration of project execution. The application of the developed model made it possible to increase the continuity of crews' work and reduction of time loss as well as better organization of work on the construction site.

Keywords: construction project scheduling; continuity of crews' work; project acceleration methods; network models; construction project management.

W ykonawcy często są zmuszeni przyspieszyć realizację projektów budowlanych, co wynika zwykle z możliwości skorzystania z premii umownej, uniknięcia kar lub niekorzystnych warunków atmosferycznych oraz nadrobienia opóźnień. Z drugiej strony, inwestorzy mogą wymagać przyspieszenia terminu zakończenia inwestycji w celu wykorzystania dotacji celowej lub funduszy unijnych [1 ÷ 3].

Zachowanie ciągłości pracy w przedsięwzięciach budowlanych pozwala na redukcję czasu realizacji budowy i kosztów dzięki utrzymaniu stałej podaży pracy, przez ograniczenie zwalniania i zatrudniania pracowników, zatrzymanie wykwalifikowanych brygad roboczych, maksymalne wykorzystanie efektu krzywej uczenia się oraz minimalizację czasu bezczynności maszyn [4 ÷ 9]. Stanowi jednak dodatkowe ograniczenie podczas planowania i zarządzania projektami budowlanymi, które często powoduje wydłużenie czasu realizacji przedsięwzięcia.

Krótko po wprowadzeniu metody ścieżki krytycznej (CPM) jako techniki harmonogramowania projektów niejednorodnych, naukowcy zaczęli badać ulepszenia metody CPM. Dwoma najbardziej znanymi i najbardziej praktycznymi rezultatami wysiłków badaczy było opracowanie metody wyrównywania zasobów i kompresji harmonogramu [10 ÷ 13], która polega na znalezieniu równowagi między wzrostem kosztów bezpośrednich, wynikającym z przydzielenia dodatkowych zasobów, a spadkiem kosztów pośrednich, wynikającym ze skrócenia czasu trwania projektu. **Metody kompresji harmonogramu można podzielić na dwie główne grupy: heurystyczne i optymalizacyjne. Metody heurystyczne** wymagają mniejszego nakładu pracy obliczeniowej, ale prezentują rozwiązania, które niekoniecznie są optymalne. Z drugiej strony, **metody optymalizacyjne** pozwalają na uzyskanie rozwiązań optymalnych, ale są trudniejsze do opracowania, wymagają znacznego nakładu pracy obliczeniowej i nie są efektywne w przypadku projektów o dużej skali.

Wybór właściwych procesów, których realizację należy przyspieszyć

w projekcie budowlanym, jest kluczowym krokiem w kierunku skutecznej kompresji harmonogramu. Przyspieszenie niewłaściwego procesu prowadzi do zwiększenia nakładów finansowych bez żadnego wpływu na czas trwania przedsięwzięcia. Podjęcie właściwej decyzji ułatwia zidentyfikowanie procesów na ścieżce krytycznej. W metodzie CPM każdy harmonogram zawiera ścieżkę lub ścieżki krytyczne, czyli grupę sekwencyjnych działań o łącznym czasie trwania dłuższym niż pozostałe ścieżki, co decyduje o całkowitym czasie trwania przedsięwzięcia. Kompresja jakiegokolwiek czynności na tej ścieżce spowoduje skrócenie czasu trwania realizacji budowy. Zasada ta obowiązuje do czasu, gdy ścieżka krytyczna przestanie być najdłuższą ścieżką w sieci [11].

Istnieje wiele metod intensyfikacji pracy, które kierownicy projektów często stosują w celu przyspieszenia przedsięwzięć budowlanych [14, 15]. Są to: praca w nadgodzinach; praca w weekendy lub zatrudnianie bardziej wydajnych brygad roboczych. Każdej z wymienionych metod towarzyszą dodatkowe nakłady finansowe, m.in. zwiększone koszty bezpo-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury; l.rzepecki@pollub.pl

średnie, obejmujące robocizną i eksploatację maszyn. Z drugiej strony, wraz ze skróceniem całkowitego czasu trwania realizacji budowy maleją również koszty pośrednie. W literaturze prezentowane są także metody intensyfikacji pracy związane z wprowadzaniem działań relaksacyjnych oraz celowych przerw w pracy [16].

Stosując metody intensyfikacji pracy, można uzyskać dwie główne korzyści. Po pierwsze, potrzebne skrócenie czasu trwania przedsięwzięcia osiąga się przez przydzielenie mniejszej liczby dodatkowych zasobów, ponieważ nadmiarowe zasoby w przypadku czynności niekrytycznych nie wpływają na całkowity czas trwania realizacji budowy [17]. Po drugie, można uniknąć spadku wydajności spowodowanego przydzieleniem zbyt wielu godzin nadliczbowych. Badania wykazują, że utrzymywanie 1 godziny nadliczbowej dziennie przez 4 tygodnie powoduje, że brygada pracuje z mniejszą o 16% wydajnością niż przy regularnych godzinach pracy przez 4 tygodnie [18].

W artykule rozważano problem doboru optymalnych działań z uwzględnieniem ich kosztów i efektów w postaci skrócenia czasu realizacji budowy. Opracowano model programowania liniowego przedsięwzięcia budowlanego typu kompleks operacji, zapewniający minimalizację przerw w pracy brygad. Dotychczas opracowane metody iteracyjne rozwiązania tego problemu, prezentowane w literaturze, nie gwarantują uzyskania optymalnych wyników.

Formalizacja matematyczna problemu

Przedsięwzięcie budowlane modelowano za pomocą sieci sporządzonej techniką jednopunktową. Jego zakres oraz zależności kolejnościowe między realizowanymi procesami modelowano za pomocą grafu $G = (V, E)$, gdzie: $V = \{1, 2, \dots, n\}$ – zbiór procesów, $E \subset V \times V$ – zbiór relacji między procesami (typu rozpoczęcie po zakończeniu). Terminy rozpoczęcia realizacji procesów $i \in V$ oznaczono jako tr_i , natomiast terminy zakończenia jako tz_i . Do wykonania procesu $i \in V$ przydzielono brygadę j ($j = 1, 2, \dots, m$). W przy-

padku każdego procesu i można określić zbiór W_i wariantów działań, których celem jest skrócenie realizacji przedsięwzięcia. Zbiory te ujmują również bazywe (ustalone pierwotnie) sposoby wykonania procesów. Wybór wariantów modelowano za pomocą zmiennej binarnej $x_{i,w} \in \{0, 1\}$. Zmienna $x_{i,w}$ przyjmuje wartość 1, jeżeli proces i jest realizowany zgodnie z wariantem $w \in W_i$, a wartość 0 – w przeciwnym przypadku. Na podstawie danych o pracochłonności robót, wydajnościach brygad i maszyn, nakładach rzeczowych oraz cenach czynników produkcji, określono czas $t_{i,w}$ oraz koszt $k_{i,w}$ wykonania procesu i w przypadku każdego wariantu $w \in W_i$. Zależności między procesami o charakterze organizacyjnym, wynikające z ustalonej kolejności realizacji procesów przez poszczególne brygady, uwzględniono przy budowie grafu G . Dla każdej brygady j można wskazać zbiór realizowanych przez nią procesów V_j oraz numer procesu realizowanego w pierwszej i ostatniej kolejności. Termin dyrektywny zakończenia przedsięwzięcia wynosi T , a maksymalny koszt realizacji K .

Dążono do ustalenia takich terminów realizacji procesów oraz wariantów organizacji pracy brygad, aby łączny czas przerw w pracy brygad był minimalny:

$$\min z: z = \sum_{j=1}^m (tz_j^{\max} - tr_j^{\min} - \sum_{i \in V_j} t_i)$$

Terminy zakończenia realizacji procesów obliczono wg wzoru:

$$tz_i = tr_i + t_p, \forall i \in V$$

a czas wykonania procesów wg zależności:

$$t_i = \sum_{w \in W_i} t_{i,w} \cdot x_{i,w}$$

Dane do przykładu

Example datasets

Proces	Objekt	Bezpośredni poprzednik	Czas realizacji [dni]				Koszt realizacji [tys. PLN]			
			w1	w2	w3	w4	w1	w2	w3	w4
1	A	–	28	20	19	14	90	99	97	126
2	A	1	25	18	17	13	100	110	108	140
3	A	2	20	14	13	10	150	165	162	210
4	B	1, 3	25	18	17	13	50	55	54	70
5	B	4	15	11	10	8	49	54	53	69
6	B	5	22	16	15	11	70	77	76	98
7	C	4, 6	30	21	20	15	35	39	38	49
8	C	7	5	4	3	3	33	36	36	46
9	–	3, 6, 8	0	0	0	0	0	0	0	0

przy czym może być wybrany tylko jeden wariant organizacji pracy brygady:

$$\sum_{w \in W_i} x_{i,w} = 1$$

Termin rozpoczęcia realizacji przedsięwzięcia tr_1 (procesu nr 1) wynosi: $tr_1 = 0$, a terminy rozpoczęcia pozostałych procesów ustala się wg wzoru:

$$tz_k \leq tr_l, \forall (k, l) \in E$$

Czas realizacji przedsięwzięcia nie może przekroczyć wielkości zadeklarowanej w umowie, a koszty realizacji nie mogą przekroczyć ustalonego kosztu granicznego:

$$tr_n + t_n \leq T$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{w \in W_i} k_{i,w} \cdot x_{i,w} \leq K$$

Przykład i analiza wyników

W celu weryfikacji poprawności modelu opracowane podejście harmonogramowania pracy brygad zastosowano do wyznaczenia wariantów organizacyjnych (działań redukujących czas realizacji procesów) przykładowego przedsięwzięcia budowlanego, które obejmuje budowę trzech obiektów i jest realizowane w systemie generalnego wykonawstwa. Wariant pierwszy (bazowy) przewiduje ośmiogodzinną pracę jednej zmiany przez 5 dni w tygodniu. W wariantcie drugim tydzień roboczy trwa 7 dni po 8 godzin. Organizacja pracy w wariantcie trzecim przewiduje pracę w nadgodzinach przez 5 dni w tygodniu. W wariantcie czwartym praca odbywa się na dwie zmiany. Zależności kolejnościowe między poszczególnymi procesami oraz czas i koszt wykonania poszczególnych procesów zamieszczono w tabeli.

Model matematyczny minimalizacji przestoju w pracy brygad rozwiązano za pomocą programu LPSolve (*Open source Mixed-IntegerLinear Programming system, version 5.5.2.0*).

W rozwiązaniu optymalnym (rysunek) zredukowano łączny czas przerwy w pracy brygad do 45 dni (42 dni mniej niż w wariantie bazowym). Koszt robót zwiększył się o 7,6% w stosunku do wariantu bazowego. Procesy 1, 4 i 8 powinny być realizowane z zastosowaniem wariantu pierwszego – praca przez 5 dni w tygodniu przy ośmiogodzinnej zmianie roboczej, procesy 2, 3, 5 i 6 wg wariantu trzeciego – praca z nadgodzinami, natomiast proces 7 zgodnie z wariantem 4, który przewiduje pracę na dwie zmiany.

nich wynikającym z przydzielenia dodatkowych zasobów, wydłużenia czasu trwania zmiany roboczej lub czasu pracy w tygodniu.

Opracowany model matematyczny pozwolił na uzyskanie optymalnego wariantu organizacji pracy brygad realizujących niejednorodne procesy budowlane. W analizowanym przykładzie udało się zredukować czas trwania przedsięwzięcia o ok. 19%. Efekt ten uzyskano przy zmniejszeniu łącznego czasu przestoju brygad roboczych o ok. 48% i zwiększeniu kosztów realizacji o ok. 7,6%. Kierunkiem dalszych badań jest rozbudowa modelu o dodatkowe opcje umożliwiające uwzględnienie losowych warunków realizacji przedsięwzięcia.

[7] A. Mahmoudi and M. R. Feylizadeh. A grey mathematical model for crashing of projects by considering time, cost, quality, risk and law of diminishing returns. *Grey Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 272–294, 2018, doi: 10.1108/GS-12-2017-0042.

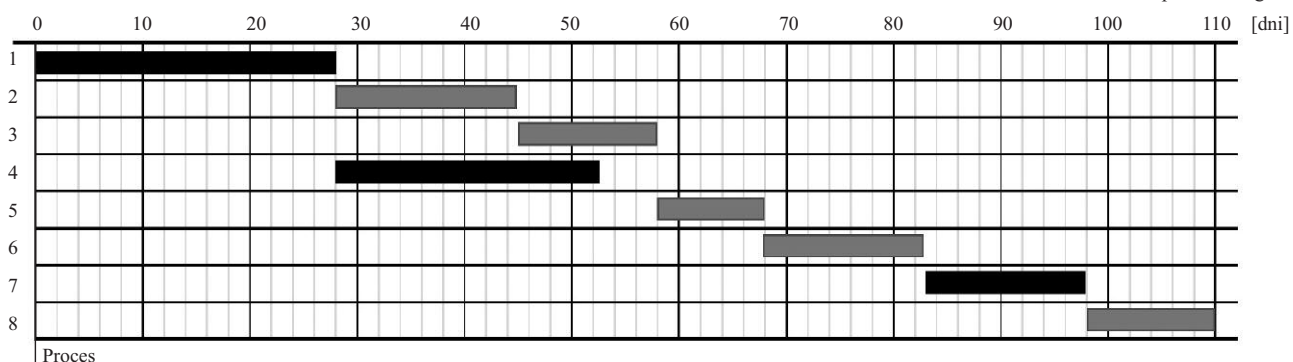
[8] S. Biruk and L. Rzepecki. Scheduling Repetitive Construction Processes Using the Learning-Forgetting Theory. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 471, no. 11, p. 112039, Feb. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/471/11/112039.

[9] Biruk S, and Jaśkowski P. Selection of subcontractors using ordinal ranking methods based on Condorcet approach. *Bud. Archit.* 2016, doi: 10.24358/Bud-Arch_16_154_04.

[10] Chang C-K, Hanna AS, Woo S, Cho C-S. Logistic Regression Modeling to Determine Projects impacted by Schedule Compression. *KSCSE J. Civ. Eng.* 2019, doi: 10.1007/s12205-019-2056-0.

[11] Moselhi O. Schedule compression using the direct stiffness method. *Can. J. Civ. Eng.*, Feb. 2011, doi: 10.1139/193-007.

[12] Hazini K, Dehghan R, J. Ruwanpura J. A heuristic method to determine optimum degree



Harmonogram realizacji przedsięwzięcia – rozwiązanie optymalne
Construction project schedule – optimal solution

Podsumowanie

Jednym z wielu elementów umowy zawieranej na wykonanie robót budowlanych jest czas, jaki ma wykonawca na realizację całego zakresu zleconych prac. Zarówno inwestor, jak i wykonawca, w wyniku przedłużania się czasu trwania budowy ponad planowany termin, nie osiągają założonych celów. Brak realizacji zakładanej części inwestycji budowlanej w planowanym czasie może mieć poważne skutki w postaci ograniczenia lub cofnięcia dotacji celowej lub funduszy unijnych.

Istnieje wiele działań, które można wykorzystać w celu skrócenia czasu trwania przedsięwzięcia przy założeniu realizacji wymaganego zakresu robót. Stosowanie metod intensyfikacji pracy pozwala na ograniczenie kosztów pośrednich dzięki redukcji czasu realizacji przedsięwzięcia, przy relatywnie niewielkim wzroście kosztów bezpośred-

Literatura

[1] Turkoglu H, Polat G, Akin FD. Crashing construction projects considering schedule flexibility: an illustrative example. *Int. J. Constr. Manag.*, 2021, doi: 10.1080/15623599.2021.1901559.

[2] Radziszewska-Zielina E, Sroka B. Planning repetitive construction projects considering technological constraint. *Open Eng.* 2018; doi: 10.1515/eng-2018-0058.

[3] Elazouni AM, Metwally FG. Expanding Finance-Based Scheduling to Devise Overall-Optimized Project Schedules. *J. Constr. Eng. Manag.* 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:1(86).

[4] Plebankiewicz E, Leśniak A, Karcińska P. Assumptions of a planned number of man-hours verification model for construction works. *Sci. Rev. Eng. Environ. Sci.* 2018, doi: 10.22630/PNIKS. 2018.27.3.29.

[5] J. Malara, E. Plebankiewicz, and M. Juszczyk, Formula for Determining the Construction Workers Productivity Including Environmental Factors. *Buildings*, vol. 9, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2019, doi: 10.3390/buildings9120240.

[6] P. Kostrzewa-Demczuk and M. Rogalska, Anticipating the Length of Employees' Working Time. *Symmetry*, vol. 12, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/sym12030413.

of activity accelerating and overlapping in schedule compression. *Can. J. Civ. Eng.* 2013, doi: 10.1139/cjee-2012-0380.

[13] Biruk S, Rzepecki Ł. Simulation model for resource-constrained construction project. *Open Eng.* 2019, doi: 10.1515/eng-2019-0037.

[14] Bakry I, Moselhi O, Zayed T. Optimized acceleration of repetitive construction projects. *Autom. Constr.* 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2013.07.003.

[15] Moselhi O, Roofigari-Esfahan N. Project schedule compression: a multi-objective methodology. *Constr. Innov.* 2013, doi: 10.1108/CI-03-2011-0010.

[16] El-Rayes K, and Moselhi O. Resource-driven scheduling of repetitive activities. *Constr. Manag. Econ.* 1998, doi: 10.1080/014461998372213.

[17] Tomczak M, Jaśkowski P. Crashing Construction Project Schedules by Relocating Resources. *IEEE Access*, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044645.

[18] Arditi D, Tokdemir OB, Suh K. Challenges in line-of-balance scheduling. *J. Constr. Eng. Manag.* 2002, doi: 10.1061/(ASCE) 0733-9364(2002)128:6(545).

Praca była finansowana w ramach dotacji „Subwencja na Naukę” (MEiN) projekt nr FN-10/2021.

Przyjęto do druku: 20.10.2022 r.