

PROJEKTOWANIE ZESPOŁU MASZYN ZAPEWNIĄCYCH CIĄGŁOŚĆ BETONOWANIA KONSTRUKCJI MONOLITYCZNEJ

Roman MARCINKOWSKI*, Artur KOPER

Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock

Streszczenie: W artykule przedstawiono model zadania projektowego, polegającego na ustaleniu optymalnej liczby maszyn i środków transportu do zapewnienia ciągłości betonowania konstrukcji monolitycznej. Model ten wraz z arkuszem kalkulacyjnym pozwala optymalizować czas i koszty realizacji robót betonowych na wydzielonym froncie robót (przygotowanej do betonowania sekcji). Do rozwiązania zadania optymalizacyjnego proponuje się wykorzystanie algorytmu ewolucyjnego, bądź symulacji komputerowej.

Słowa kluczowe: betonowanie, mechanizacja kompleksowa, optymalizacja procesu betonowania.

1. Wprowadzenie

Projektowanie zespołu maszyn do wykonywania procesów budowlanych jest szczególnie istotne tam, gdzie zachodzi konieczność skorelowania różnych środków pracy. Mamy na myśli systemy organizacyjne kompleksowo zmechanizowane, w których efektywność wykonania przedmiotowego zakresu robót zależy od stopnia wykorzystania maszyn.

W budownictwie występuje wiele procesów kompleksowo zmechanizowanych. Szczególnie są one widoczne w robotach ziemnych realizowanych na wielu frontach robót oraz w dużym zakresie robót betonowych i drogowych. W robotach tych występują problemy doboru maszyn (ich wielkości i liczby) celem zoptymalizowania kosztów realizacji prac. Problemy te były rozwiązywane naukowo na bazie różnych modeli (Orłowski, 2005 i 2010; Koźniewski i in., 2002), jednak ich zastosowanie w praktyce jak dotychczas było incydentalne – głównie z powodu złożonej formy modelu, wymagającego specjalistycznego oprogramowania.

W pracy podjęto problem projektowania organizacji betonowania konstrukcji monolitycznej. Chodzi o ustalenie zestawu maszyn do realizacji procesu betonowania – procesu wykonywanego w jednym cyklu dla danej sekcji czy działki budowlanej. Tempo betonowania takiego frontu robót powinno zapewnić ciągłość betonowania konstrukcji (uzyskanie monolityzacji konstrukcji) oraz racjonalne wykorzystanie środków pracy. Formalizacja takiego problemu jest potrzebna dla praktyki budowlanej, szczególnie wtedy,

gdy zachodzi potrzeba optymalizacji rozwiązań organizacyjnych. W proponowanej w pracy metodzie sformułowano proste zależności, które pozwalają prowadzić kalkulacje w dowolnym arkuszu kalkulacyjnym z poszukiwaniem rozwiązań optymalnych metodą symulacyjną lub programowania matematycznego.

Proces betonowania konstrukcji monolitycznej jest poprzedzony procesami przygotowania deskowań i montażu zbrojenia w deskowaniu. Są to prace, w których wykonaniu wykorzystywane są urządzenia dźwigowe i zespoły przeszkolonych robotników. Trwają one znacznie dłużej, niż sam proces betonowania i nie wymagają korelacji z tym procesem. Uzasadnione jest więc projektowanie organizacji procesu betonowania jako względnie odosobnionego, co ma miejsce w niniejszej pracy.

2. Model sytuacji projektowej

W organizacji betonowania konstrukcji wyróżnić możemy następujące podprocesy:

- przygotowanie mieszanki betonowej w wytwórni,
- transport mieszanki betonowej z wytwórni na budowę (transport zewnętrzny),
- podawanie mieszanki betonowej do przygotowanych form (deskowań),
- układanie i zagęszczanie mieszanki betonowej.

W tych czterech podprocesach wykorzystywane są odmienne specjalistyczne maszyny i urządzenia, o różnych charakterystykach eksploatacyjnych (w tym

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: marcinkowski@pw.plock.pl

wydajnościowych). W projektowaniu organizacji trzeba zapewnić jednolite i pożądane tempo przemieszczania mieszanki betonowej z wytwórni na wykonywaną konstrukcję. Należy do tego zaangażować taki zestaw sprzętu, który będzie generował najniższe koszty wykonania robót. Określmy zależności opisujące decyzję, ograniczenia i cel w takim problemie.

Wykonawca robót najczęściej ma ustalone rodzaje środków technicznych, które może zaangażować w proces betonowania. Są to betonomieszarki samochodowe, pompy do betonu, różnego rodzaju urządzenia do zagęszczania mieszanki betonowej. Znając wydajności tych urządzeń, lub charakterystyki eksploatacyjne, należy jedynie zdecydować o ich liczbie. Ma ona zapewnić osiągnięcie planowanego tempa betonowania konstrukcji W_{rz} w [m³/godz.], spełniającego warunek:

$$W_{dop} \geq W_{rz} \geq \frac{Q_w}{t_{pw} - t_{tr}} \quad (1)$$

gdzie: W_{dop} jest to dopuszczalne tempo betonowania konstrukcji zlokalizowanych na rozpatrywanym froncie robót; Q_w jest objętością warstwy mieszanki betonowej układanej w jednym cyklu roboczym w m³; t_{pw} jest czasem rozpoczęcia wiązania mieszanki betonowej w godzinach; t_{tr} jest czasem transportu gotowej do użycia mieszanki betonowej (strata czasu na dostarczenie gotowej mieszanki betonowej w miejsce jej wbudowania i jej zagęszczenie).

Dopuszczalne tempo betonowania konstrukcji W_{dop} należy określać dla przygotowanej do betonowania sekcji (działki roboczej). Zależy ona od dopuszczalnej szybkości układania mieszanki betonowej w deskowaniach V_b w m/godz. i powierzchni F_s rzutu poziomego ścian i słupów betonowanych na tej sekcji. Dopuszczalne tempo W_{dop} powinno spełniać warunek:

$$W_{dop} \leq F_s \cdot V_b \quad (2)$$

Współcześnie stosowane deskowania umożliwiają układanie w nich mieszanki betonowej z szybkością $V_b = 2-3$ m/godz.

Czas rozpoczęcia wiązania t_{pw} mieszanki betonowej zależy od warunków atmosferycznych i charakterystyki samej mieszanki betonowej. Wynosi on najczęściej od 1,5 do 2 godzin.

Określenie czasu transportu t_{tr} gotowej do użycia mieszanki betonowej wymaga pewnych kalkulacji. Obejmuje on bowiem czas transportu zewnętrznego i wewnętrznego oraz ułożenia w deskowaniu mieszanki betonowej o objętości dowożonej jednym środkiem transportu zewnętrznego (jest nim najczęściej betonomieszarka samochodowa, która może dostarczyć w jednym cyklu do 10 m³ mieszanki betonowej). Oznaczając ładowność środka transportowego zmienną Q_{tr}^1 , czas t_{tr} możemy wyznaczyć z zależności:

$$t_{tr} = t_{tr}^z + t_{tr}^j + t_{tr}^p + \max \left\{ \frac{Q_{tr}^1}{W_{pmb}^1}; \frac{Q_{tr}^1}{W_{rz}} \right\}, \quad (3)$$

gdzie t_{tr}^2 jest czasem załadowania środka transportowego mieszanką betonową; t_{tr}^j jest czasem przejazdu środka transportowego z wytwórni masy betonowej na budowę; t_{tr}^p to czas podstawienia środka transportowego pod wyładunek; zaś W_{pmb}^1 to tempo podawania mieszanki betonowej na konstrukcję (zależne od wydajności pompy lub innego zestawu urządzeń wykorzystywanego do podawania mieszanki betonowej).

Tempo betonowania sekcji, poza spełnieniem warunku (1) i (2) wynika z wydajności i liczby zaangażowanych w proces maszyn i urządzeń. Przyjmując, że znamy wydajność urządzeń do podawania mieszanki betonowej i do jej zagęszczania oraz czasy istotne do określenia cyklu transportowego jednostek transportu zewnętrznego możemy sformułować zależności, za pomocą których można ustalić rzeczywiste tempo betonowania sekcji. Tempo to musi spełniać trzy niżej wymienione warunki.

1. Warunek wydajności urządzeń do podawania mieszanki betonowej:

$$W_{rz} \leq L_{pmb}^S \cdot W_{pmb}^1 \quad (4)$$

gdzie L_{pmb}^S jest liczbą kompletnych urządzeń stosowanych do podawania mieszanki betonowej.

2. Warunek wydajności urządzeń do zagęszczania mieszanki betonowej:

$$W_{rz} \leq L_{zmb}^S \cdot W_{zmb}^1 \quad (5)$$

gdzie L_{zmb}^S jest liczbą urządzeń stosowanych do zagęszczania mieszanki betonowej; W_{zmb}^1 jest wydajnością pojedynczego urządzenia stosowanego do zagęszczania mieszanki betonowej.

3. Warunek wydajności transportu zewnętrznego mieszanki betonowej:

$$W_{rz} \leq L_{tr}^S \cdot \frac{Q_{tr}^1}{t_{tr}^z + 2 \cdot t_{tr}^j + t_{tr}^p + \frac{Q_{tr}^1}{W_{pmb}^1}} \quad (6)$$

gdzie L_{tr}^S jest liczbą środków transportowych użytych do transportu mieszanki betonowej.

Liczby użytych środków L_{pmb}^S , L_{zmb}^S , L_{tr}^S generują koszty realizacji procesu betonowania konstrukcji. Są one związane z czasem pracy maszyn i urządzeń oraz kosztami jednostkowymi. Czas T pracy jednostek sprzętowych możemy ustalić wg zależności:

$$T = \frac{Q}{W_{rz}} \quad (7)$$

gdzie Q jest objętością mieszanki betonowej układanej w rozpatrywanym procesie betonowania.

Znając jednostkowe koszty pracy sprzętu użytego w planowanym przedsięwzięciu k_{pmb}^1 , k_{zmb}^1 , k_{tr}^1 (jednostkowy koszt pracy – odpowiednio: jednostki transportu zewnętrznego, kompletu urządzeń do podawania mieszanki betonowej, urządzenia do zagęszczania mieszanki betonowej) możemy określić

całkowite koszty zatrudnienia maszyn i urządzeń przy realizacji procesu betonowania:

$$K = T \cdot \left[L_{tr}^s \cdot k_{tr}^1 + L_{pmb}^s \cdot k_{pmb}^1 + L_{zmb}^s \cdot k_{zmb}^1 \right] + \left[L_{tr}^s \cdot k_{tr}^{st} + L_{pmb}^s \cdot k_{pmb}^{st} + L_{zmb}^s \cdot k_{zmb}^{st} \right] \quad (8)$$

gdzie: k_{pmb}^{st} , k_{zmb}^{st} , k_{tr}^{st} są kosztami stałymi związanymi z zatrudnieniem maszyn i urządzeń na budowie (niezależne od czasu ich pracy), odpowiednio: urządzenia do podawania mieszanki betonowej, urządzenia do zagęszczania mieszanki betonowej, środki transportu.

3. Model sytuacji decyzyjnej

Analizując powyższe zależności nietrudno sformułować zadanie optymalizacyjne. Zmiennymi decyzyjnymi są tu liczby urządzeń (z wyłączeniem tych, które wykonawca określa jako ustalone) oraz tempo betonowania konstrukcji W_{rz} . Ich ustalenie generuje czas cyklu realizacji procesu betonowania i koszty całkowite, które powinny być minimalizowane w rozwiązaniu problemu.

Formalizując zadanie optymalizacyjne, model zadania ma postać:

- wyznaczyć wartości zmiennych L_{pmb}^s , L_{zmb}^s , L_{tr}^s oraz W_{rz} , tak aby zminimalizować:

$$\min T : T = \frac{Q}{W_{rz}} \quad (9)$$

oraz

$$\min K : K = T \cdot \left[L_{tr}^s \cdot k_{tr}^1 + L_{pmb}^s \cdot k_{pmb}^1 + L_{zmb}^s \cdot k_{zmb}^1 \right] + \left[L_{tr}^s \cdot k_{tr}^{st} + L_{pmb}^s \cdot k_{pmb}^{st} + L_{zmb}^s \cdot k_{zmb}^{st} \right] \quad (10)$$

- przy spełnieniu warunków określonych zależnościami (1), (2), (4), (5), (6).

Nietrudno zauważyć, że funkcja kryterialna K jest zależna wprost proporcjonalnie od funkcji T (czasu betonowania sekcji). Wystarczy więc minimalizować funkcję K w procesie poszukiwania rozwiązania optymalnego.

Do rozwiązywania przedstawionego zadania opracowano arkusz kalkulacyjny, którego strukturę przedstawia rysunek 1. Arkusz ten wykorzystano do optymalizacji kosztów zatrudnienia sprzętu do wykonania procesu betonowania. Optymalizację tę realizowano za pomocą narzędzia Solver programu EXCEL przy wykorzystaniu metody ewolucyjnej (Golberg, 2008). W modelu optymalizacyjnym dodatkowo deklarowano całkowitoliczbowość zmiennych decyzyjnych i ograniczony przedział ich wartości. Użyteczność proponowanego podejścia do problemu potwierdzają zamieszczone dalej przykłady.

	A	B	C
1	Kalkulacja możliwości betonowania konstrukcji ustalonym (lub optymalnym) zestawem maszyn		
2	Charakterystyka betonowanej sekcji konstrukcji		
3	Powierzchnia rzutu betonowanej konstrukcji	40	[m ²]
4	Objętość mieszanki betonowej do ułożenia	80	[m ³]
5	Dopuszczalne tempo napełniania deskowań	2	[m/godz]
6	Grubość warstwy układanej mieszanki betonowej	30	[cm]
7	Szerokość układanej warstwy mieszanki betonowej	100	[cm]
8	Długość układanej warstwy mieszanki betonowej	20	[m]
9	Charakterystyka środków mechanizacji		
10	Ładowność środka do transportu mieszanki betonowej	10	[m ³]
11	Czas załadunku środka do transportu mieszanki betonowej	5	[min]
12	Czas przejazdu śr. transp. mieszanki betonowej na budowę	30	[min]
13	Czas podstawienia śr. transp. m. bet. pod wyładunek	5	[min]
14	Wydajność pojedynczego urządzenia do podawania mieszanki bet.	30	[m ³ /godz]
15	Wydajność pojedynczego urządzenia do zagęszczania mieszanki bet.	5	[m ³ /godz]
16	Ograniczenia		
17	Czas rozpoczęcia wiązania mieszanki betonowej	120	[min]
18	Czas transportu gotowej mieszanki betonowej	=SUMA(B11/60;B12/60;B13/60;MAX(B10/B14))	[godz]
19	Niezbędna wydajność betonowania sekcji	=(B6/100)*(B7/100)*B8)/(B17/60-B18)	[m ³ /godz]
20	Maksymalna dopuszczalna wydajność betonowania	=B3*B5	[m ³ /godz]
21	Wydajność transportu zewnętrznego	=B34*B10/(B11/60+2*B12/60+B13/60+B10/B14)	[m ³ /godz]
22	Wydajność urządzeń do zagęszczania mieszanki betonowej	=B33*B15	[m ³ /godz]
23	Wydajność urządzeń do podawania mieszanki betonowej	=B32*B14	[m ³ /godz]
24	Koszty	pracy	stałe
25	Koszty urządzeń do podawania mieszanki betonowej [zł]	120	500
26	Koszty urządzeń do zagęszczania mieszanki betonowej [zł]	20	0
27	Koszty środka transportu zewnętrznego mieszanki betonowej [zł]	80	100
28	Koszty pracy sprzętu	=B36*(SUMA.ILOCZYNÓW(B32:B34;B25:B27))	
29	Koszty stałe zatrudnienia sprzętu	=SUMA.ILOCZYNÓW(B32:B34;C25:C27)	
30	Koszt sumaryczne zatrudnienia sprzętu [zł]	=B28+B29	
31	Wyniki		
32	Liczba urządzeń do podawania mieszanki betonowej	1	[kpl]
33	Liczba urządzeń do zagęszczania mieszanki betonowej	4	[kpl]
34	Liczba środków do transportu zewnętrznego mieszanki betonowej	3	[kpl]
35	Rzeczywista wydajność betonowania sekcji	=MIN(B21;B23)	[m ³ /godz]
36	Czas betonowania sekcji	=B4/B35	[godz]
37	* pola z zielonym wypełnieniem zawierają dane wprowadzane przez planującego		

Rys. 1. Arkusz kalkulacyjny programu EXCEL do rozwiązywania zadania ustalenia optymalnej liczby maszyn i środków transportu do zapewnienia ciągłości betonowania konstrukcji monolitycznej

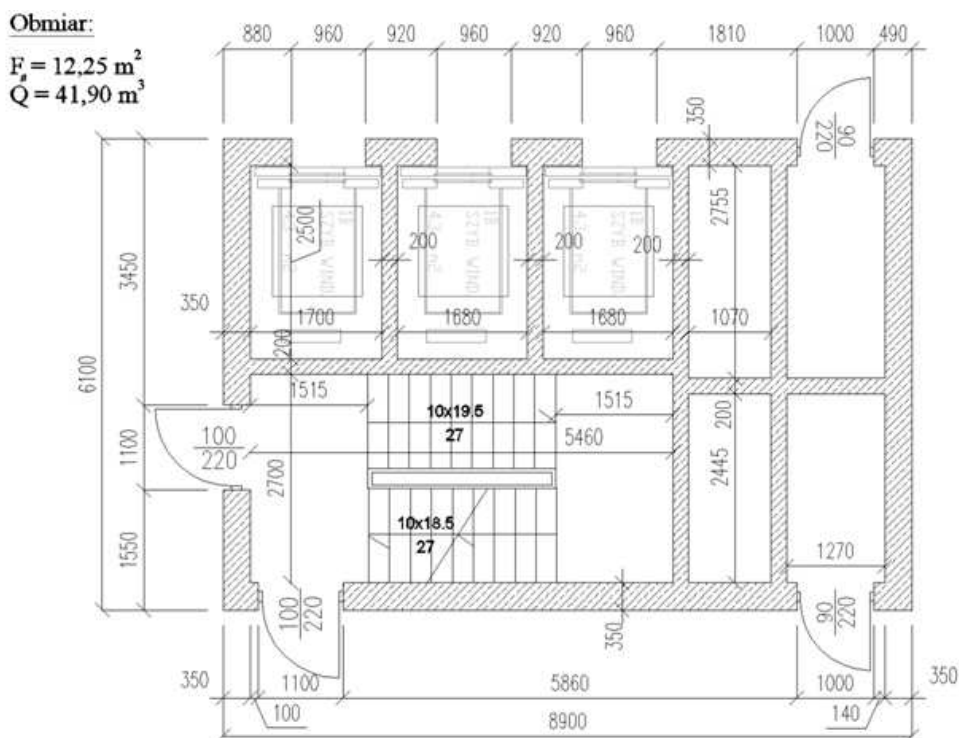
4. Przykłady

4.1. Przykład 1

Przyjmijmy, że mamy ułożyć mieszankę betonową na sekcji ścian trzonu komunikacyjnego budynku przedstawionej na rysunku 2. Objętość mieszanki betonowej do ułożenia wynosi $41,90 \text{ m}^3$. Charakterystykę betonowanej sekcji konstrukcji i użytych środków mechanizacji przedstawiono w tabeli 1. Przyjmując czas rozpoczęcia wiązania mieszanki betonowej równy 2 godzin, ustalając na podstawie zal. (3) czas transportu

gotowej mieszanki betonowej na 1 godz., niezbędna wydajność betonowania sekcji wynosi $2,35 \text{ m}^3/\text{h}$. Z warunku dopuszczalnej prędkości napełniania deskowań wynika maksymalna dopuszczalna wydajność betonowania, która wynosi w naszym przypadku $24,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Optymalny zestaw sprzętu do wykonania procesu betonowania to: 1 pompa do betonu, 4 wibratory pogrążalne i 3 betonomieszarki samochodowe. Betonowanie sekcji można zrealizować w ciągu 2,10 godziny. Minimalny koszt zatrudnienia maszyn wyniesie 2 243 zł.



Rys. 2. Rzut ścian żelbetowych trzonu komunikacyjnego budynku

Tab. 1. Charakterystyka betonowanej konstrukcji i środków mechanizacji do przykładu 1

Charakterystyka betonowanej sekcji konstrukcji	
Powierzchnia rzutu betonowanej konstrukcji	12,25 m ²
Objętość mieszanki betonowej do ułożenia	41,90 m ³
Dopuszczalne tempo napełniania deskowań	2,00 m ³ /godz.
Grubość warstwy układanej mieszanki betonowej	30,00 cm
Szerokość układanej warstwy mieszanki betonowej	35,00 cm
Długość układanej warstwy mieszanki betonowej	24,00 m
Charakterystyka środków mechanizacji	
Ładowność środka do transportu mieszanki betonowej	10,00 m ³
Czas załadunku środka do transportu mieszanki betonowej	5,00 min.
Czas przejazdu środków transportu mieszanki betonowej na budowę	30,00 min.
Czas podstawienia środków transportu mieszanki bet. pod wyładunek	5,00 min.
Wydajność pojedynczego urządzenia do podawania mieszanki bet.	30,00 m ³ /godz.
Wydajność pojedynczego urządzenia do zagęszczania mieszanki bet.	5,00 m ³ /godz.

4.2 Przykład 2

Przyjmijmy, że mamy ułożyć mieszankę betonową na stropie wielokondygnacyjnego budynku. Objętość mieszanki betonowej do ułożenia wynosi 427 m^3 . Powierzchnia betonowanego stropu wynosi 1524 m^2 . Załóżmy, że wykonawca dysponuje betonomieszarkami samochodowymi o pojemności 10 m^3 oraz pompami do podawania mieszanki betonowej o wydajności eksploatacyjnej równej $30 \text{ m}^3/\text{godzinę}$. Zagęszczanie mieszanki betonowej będzie realizowane listwami wibracyjnymi, których wydajność w rozpatrywanej sytuacji wyniesie $15 \text{ m}^3/\text{godzinę}$. Przyjmując czas rozpoczęcia wiązania mieszanki betonowej równy 2 godziny, ustalając na podstawie zależności (3) czas transportu gotowej mieszanki betonowej na 1 godz., niezbędną wydajność betonowania stropu (ze względu na potrzebę zachowania ciągłości betonowania) wynosi $16,80 \text{ m}^3/\text{h}$.

Optymalny zestaw sprzętu do wykonania procesu betonowania to: 2 pompy do betonu, 4 listwy wibracyjne i 8 betonomieszarek samochodowych. Betonowanie stropu można zrealizować w ciągu 8,01 godziny. Minimalny koszt zatrudnienia maszyn wyniesie 15314,55 zł.

Literatura

- Golberg D.E. (2008). Genetic algorithms – in Search, Optimization and Machine Learning, *WPC Addison* 2008.
- Koźniewski E., Orłowski Z., Orłowski M. (2002). Dobór zestawu maszyn do transportu mieszanki. W: materiały *XLVIII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB*, Krynica 2002.
- Orłowski Z. (2005). Ryzyko w wykonawstwie robót betonowych. W: Materiały *Konferencji Naukowo-Technicznej „Budownictwo polskie w rok po wstąpieniu do Unii Europejskiej. Wybrane problemy technologiczno-organizacyjne”*. Politechnika Gdańska 2005, 193-197.
- Orłowski Z. (2010). Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.

**PLANNING GROUP OF MACHINES
TO PROVIDE CONTINUITY CONCRETING
OF MONOLITH STRUCTURES**

Abstract: The article presents a model of project task that can rule an optimal quantity of machines and transports to provide continuity concreting of monolith construction. This model with a spreadsheet program allows optimizing time and cost of concrete works realization on single out front works (section prepares to concrete). For the solution of task we suggest to take an evolutionary algorithm or computer simulation.