

8. PLANOWANIE WYKORZYSTANIA DESKOWAŃ SYSTEMOWYCH W MONOLITYCZNYM BUDOWNICTWIE BETONOWYM Z ZASTOSOWANIEM INTERAKTYWNEJ SYMULACJI DYNAMICZNEJ

Anna Krawczyńska-Piechna¹, Roman Marcinkowski²

8.1. WSTĘP

Technologia monolitycznego budownictwa betonowego (MBB) uległa w ostatnim dziesięcioleciu znacznemu przeobrażeniu poprzez zaangażowanie specjalistycznego sprzętu budowlanego i kompleksową mechanizację prac. Szczególne znaczenie w wykonawstwie robót betonowych, zarówno w aspekcie technologicznym jak i kosztowym, mają tymczasowe systemowe konstrukcje pomocnicze – tzw. deskowania, formujące elementy żelbetowe obiektu. W tym kontekście mamy do czynienia z dwoma problemami: wyborem systemów deskowań do formowania elementów konstrukcji budowanego obiektu i określeniem organizacji ich wykorzystania na budowie.

Problem wyboru systemu deskowania był i jest dość szeroko poruszany przez naukowców na całym świecie, a głównie w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie (Hanna, Willenbrock i Sanvido, 1992; Kamarthi, Sanvido i Kumara, 1992), Wielkiej Brytanii (Proverbs, Holt i Olomolaiye, 1999), krajach Bliskiego (Elbeltagi, 2011; Abdel-Razek, 1999) i Dalekiego Wschodu (Kang i in., 2008; Yip i Wang,

¹Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii,
e-mail: Anna.Krawczynska@pw.edu.pl

²Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii,
e-mail: Roman.Marcinkowski@pw.edu.pl

2008; Shin i in., 2012; Tam i in., 2005), co jest naturalną konsekwencją dynamicznego rozwoju budownictwa wysokościowego w tych krajach.

Wybór właściwego systemu deskowania z analizą ich technologiczności nie jest jedynym celem w planowaniu udanej realizacji robót w technologii MBB. Zagadnieniem znacznie trudniejszym i bardziej pożądanym jest efektywne zorganizowanie procesu budowlanego. Problem ten obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z harmonogramowaniem robót i wykorzystaniem dostępnych zasobów – w szczególności deskowań.

Prowadzenie prac związanych z wykonaniem monolitycznej betonowej konstrukcji obiektu wymaga ustalenia frontów robót, czasu i terminów realizacji procesów roboczych (takich jak przygotowanie deskowań i konstrukcji wsporczych, robót zbrojarskich, betonowania, rozdeskowania itd.) w dążeniu na przykład do zminimalizowania czasu wykonania konstrukcji obiektu lub osiągnięcia akceptowanej sprawności organizacyjnej realizacji robót przy minimalnych kosztach.

Złożoność omawianego zagadnienia wynika z:

- niejednorodności procesów monolitycznego budownictwa betonowego, tj. zróżnicowanego zakresu rzeczowego robót, warunków ich prowadzenia i możliwości zastosowania środków mechanizacji pracy,
- niejednorodności samych elementów deskowań – tj. zróżnicowanego zakresu stosowania poszczególnych elementów deskowania, różnych wymagań technologicznych co do czasów i terminów montażu/demontażu elementów.

Z tego też względu opracowanie modelu organizacyjnego prac monolitycznego budownictwa betonowego, pozwalającego na ocenę efektywności wykorzystania deskowań, wymaga opracowania odrębnej metodyki planowania.

Niestety, problem racjonalizacji wykorzystania deskowań w realizacji obiektów betonowych nie doczekał się satysfakcjonującej metody rozwiązania – nie opracowano uzasadnionych naukowo systemów doradczych ani metod rozwiązywania problemów decyzyjnych, związanych z efektywnym wykorzystaniem środków mechanizacji i konstrukcji pomocniczych. Logicznym następstwem tego faktu była zatem konieczność poszukiwania metod, które pozwoliłyby na co najmniej częściowe zobiektywizowanie analiz i decyzji związanych z analizą pracy deskowań oraz usystematyzowanie i zautomatyzowanie (skomputeryzowanie) procesu planowania robót. Podjęte studia i prace badawcze w tym zakresie pozwoliły na opracowanie modeli i koncepcji narzędzia wspomagającego planistę w projektowaniu organizacji tych robót. Narzędzie to wykorzystuje wiedzę i doświadczenie planisty, „nadzoruje” spełnianie ograniczeń technologicznych i organizacyjnych oraz umożliwia bieżące (w czasie planowania) analizowanie efektywności zaplanowanych prac.

W rozdziale przedstawiono istotę interaktywnej symulacji dynamicznej w planowaniu robót monolitycznego budownictwa betonowego, umożliwiającej eksperymentowanie z przebiegiem robót MBB oraz komputerową analizę dostępności i wykorzystania konstrukcji tymczasowych (deskowań, konstrukcji wsporczych i pomostów) z oceną efektywności wykorzystania dostępnych zasobów.

8.2. MODEL INTERAKTYWNEGO PODEJŚCIA DO PLANOWANIA ROBÓT BETONOWYCH

8.2.1. ISTOTA INTERAKTYWNEGO PODEJŚCIA DO PLANOWANIA ROBÓT MBB

W planowaniu robót monolitycznego budownictwa betonowego, mając na względzie rolę, jaką w procesie budowlanym pełni konstrukcja deskowania, jakość harmonogramu, a zatem i efektywność prowadzenia robót, powinno się rozpatrywać kosztowo – jako stratę ponoszoną z tytułu niepełnego wykorzystania wydzierżawionych deskowań. Istota i zasadność takiego kryterium wartościowania rozwiązań organizacyjnych przedstawiona została w pracy Kaplińskiego (2007).

Każdy wyróżniony rodzajowo element konstrukcji deskowania charakteryzują: jednostkowa pracochłonność montażu i demontażu, jednostkowy koszt dzierżawy, czas normatywnej pracy w poszczególnych elementach konstrukcji obiektu. Na podstawie tych danych można określić pracochłonność i czas potrzebny na przygotowanie i montaż, a także demontaż deskowań z poszczególnych elementów konstrukcji obiektu. Można też ustalić normatywny koszt użycia elementów konstrukcji deskowań do wykonania poszczególnych elementów konstrukcji obiektu. Poniesienie tych kosztów jest niezbędne, aby wykonać betonową konstrukcję obiektu. Jeżeli jednak nie wykorzystuje się w realizacji robót wszystkich dzierżawionych deskowań lub ponadnormatywnie przetrzymuje się je na konstrukcji, ponosi się stratę z tytułu ich niepełnego wykorzystania.

Modelując przebieg i harmonogramując roboty MBB, w których chcemy przeprowadzić analizę efektywności wykorzystania deskowań systemowych, należy postawić sobie pytania: Czy znane z literatury przedmiotu algorytmy szeregowania zadań są użyteczne w rozwiązywaniu problemu, gdzie zamierza się analizować użycie i dostępność konstrukcji tymczasowych w realizacji procesów? Czy jest możliwe, a i potrzebne, wyznaczanie harmonogramu optymalnego? Odpowiedzi na te pytania nie są jednoznaczne, bowiem:

- w realnym procesie budowlanym wygenerowany pierwotnie harmonogram nigdy nie jest harmonogramem ostatecznym, może być jedynie harmonogramem bazowym (porównawczym);
- w wykonawstwie monolitycznych robót betonowych to warunki ich prowadzenia (przede wszystkim warunki pogodowe, opóźnienia w dostawach materiałów, opóźnienia w odbiorach cząstkowych, uwarunkowania lokalne – niezakończenie innych robót, brak przygotowanego frontu) decydują o ich przebiegu – wykonawca zazwyczaj nie jest w stanie dotrzymać terminów opracowanego pierwotnie harmonogramu optymalnego, w trakcie realizacji wielokrotnie go modyfikując;
- uczestnik procesu budowlanego powinien móc na bieżąco modyfikować ilość lub rodzaj dostępnego na budowie deskowania, zależnie od oceny prowa-

dzonych działań, zapotrzebowania, przestojów, konieczności intensyfikacji działań, itp.

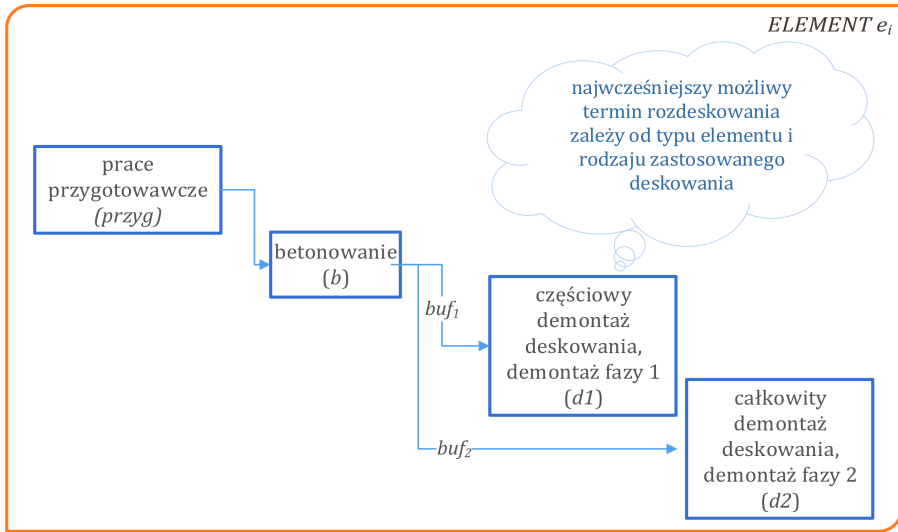
Inspirując się ideą symulacji proponowanej przez Wu, Borrmanna, Biessert, Königa i Ranka (2010) oraz Mikulakovą, Königa, Tauschera i Beucke (2010), w celu rozwiązania powyższych problemów, proponuje się metodę zamiany złożonych modeli sieciowych na harmonogram realizacji robót z analizą ograniczeń zasobowych. Ograniczenia te dotyczą liczebności zbioru dostępnych elementów deskowań oraz czasu ich wykorzystania przy realizacji poszczególnych procesów roboczych. Proponowana metoda pozwala na sekwencyjne symulowanie przebiegu procesów budowlanych z interakcją planującego oraz analizą informacji o wykorzystaniu deskowań w celu racjonalnego szeregowania zadań w planie realizacji przedsięwzięcia. Podczas planowania robót decyduje się o rozpoczęciu lub wstrzymaniu wykonywania kolejnych elementów procesu technologicznego, jak również, dynamicznie definiuje fronty robót i alokuje zasoby, określając tym samym czasy trwania poszczególnych elementów procesu technologicznego oraz wynikające z nich terminy rozpoczęcia innych procesów technologicznych.

8.2.2. MODEL ROBÓT MBB

W proponowanej metodzie planowania robót MBB nośnikiem informacji niezbędnych do zaplanowania robót – czyli informacji o pracochłonności robót i zapotrzebowaniu na deskowanie przy realizacji konstrukcji – jest pojedynczy element konstrukcyjny e_i (konstrukcyjnie kompletny i technologicznie wykonalny element konstrukcji, który może być betonowany w całości bez przerw technologicznych). W realizacji poszczególnych elementów obowiązują relacje kolejnościowe, które określa graf skierowany. Jego wierzchołki reprezentują poszczególne elementy konstrukcyjne, zaś łuki wskazują kolejność wykonania elementów w relacji typu zakończenie–rozpoczęcie.

Model przebiegu robót monolitycznego budownictwa betonowego ma charakter relacyjny i jest spójny dla elementów konstrukcyjnych różnego typu. W modelu tym wyszczególniono takie elementy procesu technologicznego jak: prace przygotowawcze, obejmujące montaż deskowania i wykonanie zbrojenia, betonowanie elementu, częściowe oraz całkowite rozdeskowanie konstrukcji. Pomiedzy elementami procesu technologicznego wprowadzono relacje typu zakończenie–rozpoczęcie z minimalnym wymaganym technologicznie czasem zwłoki (przerwą technologiczną). Schemat modelu prezentuje rys. 1.

Do przeprowadzenia wszystkich elementów procesu technologicznego na elemencie e_i niezbędne jest zapewnienie minimalnego ze względów technologicznych zespołu roboczego oraz zaangażowanie konkretnych elementów deskowania systemowego, co generuje określone koszty dzierżawy deskowania dla tego elementu. Pracochłonność poszczególnych elementów procesu technologicznego kalkulowana jest w oparciu o jednostkowe nakłady pracy, oszacowane na podstawie danych



Rys. 1. Elementy procesu MBB realizowane na elemencie e_i . Źródło: opracowanie własne.

dostarczanych przez producentów deskowań oraz normatywy czasów pracy wydawnictwa Zeit Technik Verlag. Na podstawie jednostkowych nakładów pracy wyznacza się nakłady pracy na wykonanie poszczególnych czynności związanych z wykonaniem elementu żelbetowego.

Zadaniem proponowanego systemu wspomagania planowania monolitycznych robót betonowych jest dynamiczne symulowanie przebiegu procesu realizacji robót na zbiorze wyróżnionych elementów konstrukcji $E = \{e_i\}$ z przypisanymi im systemami i elementami deskowań $\{r, k\}$ oraz generowanie sytuacji decyzyjnych, jakie pojawiają się w trakcie tego procesu.

Elementy konstrukcji grupowane są przez planistę we fronty robót, na których planuje się wykonanie kolejnych elementów procesu technologicznego. Możliwość otwarcia frontu i rozpoczęcia konkretnych operacji i prac budowlanych uwarunkowana jest dostępnością zasobów czynnych (konstrukcji pomocniczych, siły roboczej) i wynika z sieci powiązań technologicznych pomiędzy elementami konstrukcji. Proponowany system pozwala planującemu:

- dynamicznie otwierać nowe fronty robót F_j – tj. wskazywać te elementy konstrukcji, na których można jednocześnie rozpocząć prace,
- podejmować decyzję, na których z istniejących frontów w danym momencie rozpoczęte zostaną kolejne elementy procesu technologicznego,
- dynamicznie alokować zasoby czynne, związane z wykonaniem na frontach konkretnych robót.

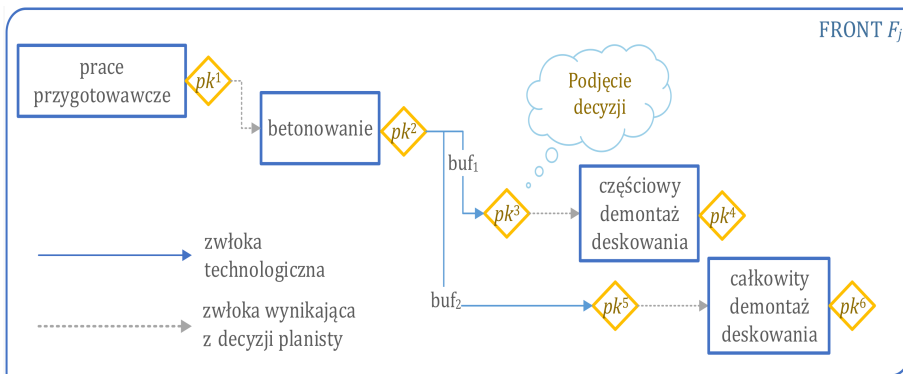
Kolejność następowania prac na froncie, długość wymaganych przerw roboczych oraz nakłady pracy na wykonanie elementów procesu technologicznego są

wyznaczane automatycznie przez program komputerowy, na podstawie charakterystyk, opisujących elementy frontu. Czas trwania robót (związanych z elementami procesu technologicznego na froncie) zostaje wyznaczony również przez aplikację komputerową po dokonaniu przez planującego alokacji zasobów. W tym samym kroku decyzyjnym następuje ocena efektywności wykorzystania deskowań poprzez wyznaczenie kosztu (straty) z tytułu niewykorzystania dostępnej pracy elementów konstrukcji pomocniczych. Jeżeli ocena przyjętego rozwiązania planistycznego jest niezadowolająca, planujący może wycofać się z podjętej decyzji i wygenerować nowe rozwiązanie.

Wymienione wyżej sytuacje decyzyjne symulowane są w tzw. punktach kontrolnych. Punktami tymi są zdarzenia, generowane sekwencyjnie na każdym ze zdefiniowanych przez planistę frontów robót. Wyróżnia się następujące punkty kontrolne:

- pk^1 – w chwili zakończenia robót przygotowawczych na froncie;
- pk^2 – w chwili zakończenia betonowania elementów frontu;
- pk^3 – w chwili osiągnięcia przez beton wytrzymałości pozwalającej na częściowy demontaż deskowania;
- pk^4 – w chwili zakończenia częściowego demontażu elementów deskowania na froncie;
- pk^5 – w chwili osiągnięcia przez beton wytrzymałości pozwalającej na całkowity demontaż deskowania;
- pk^6 – w chwili zakończenia całkowitego demontażu deskowania na froncie.

Schemat usytuowania punktów kontrolnych w procesie technologicznym przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat usytuowania punktów kontrolnych symulacji robót na określonym froncie.
Źródło: opracowanie własne.

Sekwencyjność punktów kontrolnych oznacza, że są one wyznaczone pod warunkiem zaistnienia zdarzenia je poprzedzającego, zgodnie z tabelą 1. Z kolei każdy punkt kontrolny generuje do wiadomości planisty zapytanie, pozwalające

na interaktywne symulowanie przebiegu procesu budowlanego. Rodzaje podejmowanych decyzji w kolejnych punktach kontrolnych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 1.

Kolejność występowania punktów kontrolnych i zdarzeń je poprzedzających.

Źródło: opracowanie własne.

Podjęta decyzja, zdarzenie poprzedzające	Generowany punkt kontrolny wg rys. 2, nr:
rozpoczęcie robót przygotowawczych (co jest tożsame z utworzeniem nowego frontu robót)	1
rozpoczęcie betonowania	2, 3, 5
rozpoczęcie częściowego demontażu deskowania	4
rozpoczęcie całkowitego demontażu deskowania	6

Tabela 2.

Przegląd decyzji podejmowanych przez planistę w kolejnych punktach kontrolnych.

Źródło: opracowanie własne.

Nr punktu kontrolnego	Rodzaj podejmowanej decyzji (pytanie kierowane do planisty)
1	czy rozpocząć betonowanie?
2	czy utworzyć nowy front robót?
3	czy rozpocząć częściowy demontaż deskowania?
4	czy utworzyć nowy front robót?
5	czy rozpocząć całkowity demontaż deskowania?
6	czy można utworzyć nowy front robót?

W efekcie działań planistycznych powstaje harmonogram robót betonowych z wykresem narastania kosztów (straty) z tytułu niewykorzystania deskowań systemowych. Harmonogram ten można udoskonalać w kolejnych próbach, jak również istnieje możliwość porzucenia procesu planowania i rozpoczęcie go od nowa, w przypadku nie osiągnięcia zadowalających efektów planowania.

8.2.3. ANALIZA PRACY DESKOWAŃ W REALIZACJI PROCESU TECHNOLOGICZNEGO

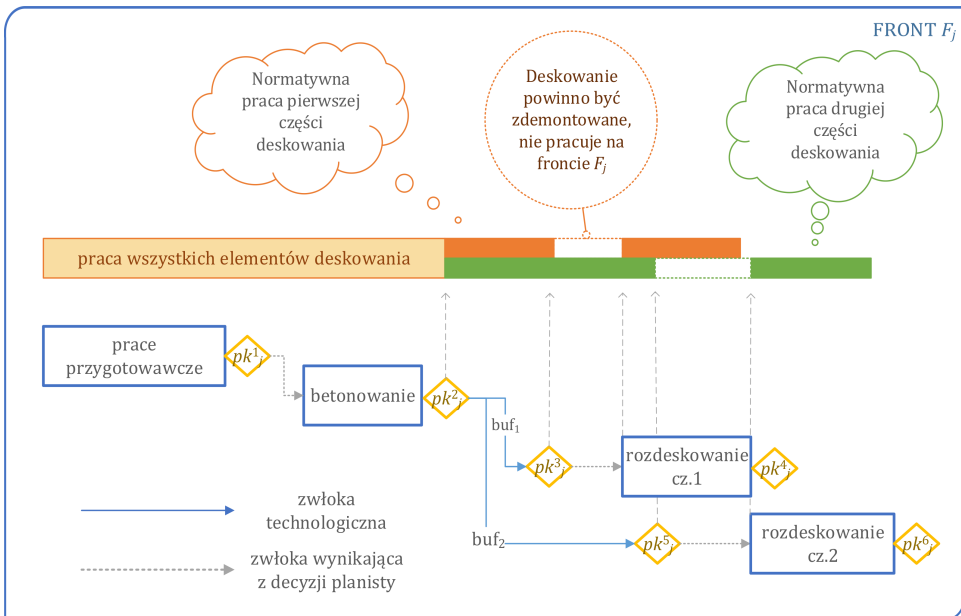
Interaktywne planowanie procesu realizacji monolitycznego budownictwa betonowego opiera się o dynamiczne tworzenie i zamykanie frontów roboczych w oparciu o analizę: dostępności środków pracy (deskowań i siły roboczej) oraz wartości funkcji celu, wyrażającej stratę z tytułu niepełnego wykorzystania deskowań. Na potrzeby analizy tworzone są tablice dostępności, zajętości i obciążenia pracą wszystkich elementów deskowań $\{r, k\}$, oznaczone odpowiednio $[DD_t]_{(r,k)}$, $[ZD_t]_{(r,k)}$ i $[PD_t]_{(r,k)}$.

$[DD_t]_{(r,k)}$ oznacza tablicę ilości wszystkich elementów deskowań dostępnych na budowie w chwili t (w jednym dniu roboczym). Ilości elementów tego samego

rodzaju lub typu mogą być zmienne w czasie i mogą podlegać zmodyfikowaniu w trakcie procesu planowania, co odpowiada potrzebom praktyki budowlanej.

Z kolei $[ZD_t]_{(r,k)}$ oznacza tablicę zajętości elementów deskowania w chwili t – tj. ich wykorzystywania na frontach robót. Zajętość należy rozumieć jako obecność (zarezerwowanie) deskowania na froncie, niezależnie od tego czy elementy deskowania wykonują na froncie normatywną pracę, czy też nie.

Tablica $[PD_t]_{(r,k)}$ obciążenia elementów deskowania pracą – określa ilości elementów formujących pracujących na froncie. Należy tu mieć na uwadze, że poprzez deskowanie „pracujące” na froncie F_j rozumie się deskowanie, które jest normatywnie wykorzystywane w trakcie trwania procesu technologicznego na tym froncie. W przypadku gdy planista rezygnuje z demontażu całości lub części deskowania na froncie F_j w chwili zaproponowanej przez symulator, deskowanie przestaje pracować na ww. froncie do czasu rozpoczęcia prac demontażowych. Oznacza to więc, że przetrzymanie elementów formujących na froncie zwiększa stratę z tytułu niepełnego wykorzystania deskowań i obniża efektywność ich wykorzystania. Sytuację tę obrazuje rys. 3.



Rys. 3. Analiza pracy deskowań względem elementów procesu technologicznego i punktów kontrolnych. Źródło: opracowanie własne.

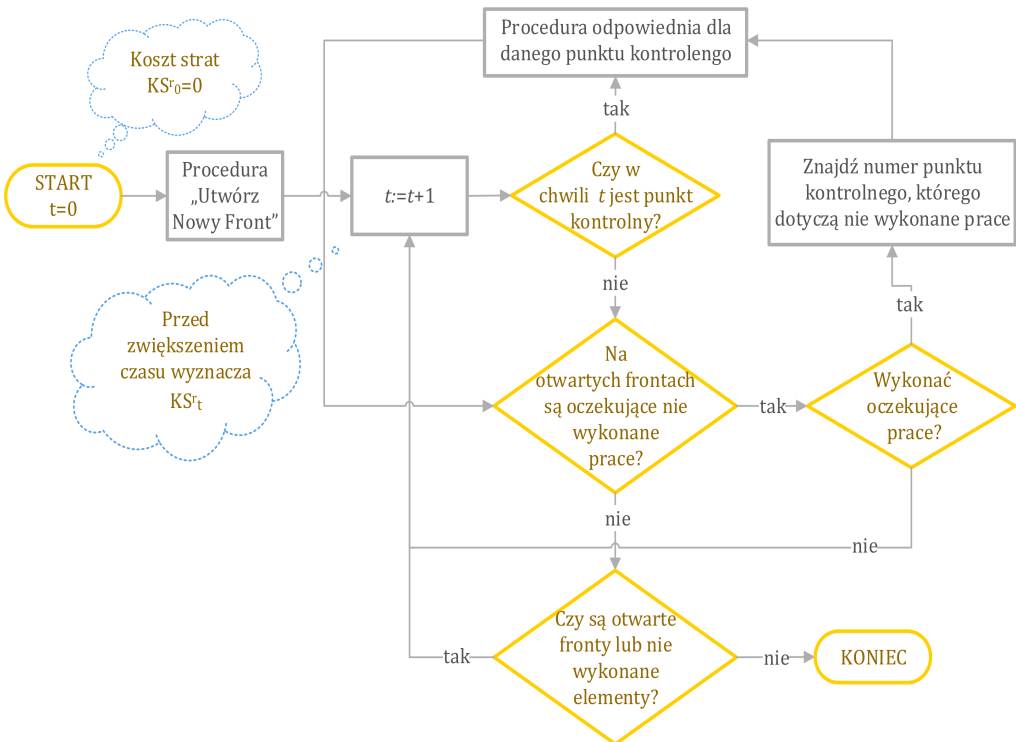
8.2.4. IDEA SYMULACJI DYNAMICZNEJ

Idea symulacji przebiegu robót monolitycznego budownictwa betonowego z interaktywnym podejmowaniem decyzji przez planistę sprowadza się do generowa-

nia przez program główny, tzw. zegar symulacji, sytuacji, w których planista podejmuje decyzje o przeprowadzeniu poszczególnych elementów procesu technologicznego: o utworzeniu nowego frontu robót i rozpoczęciu prac przygotowawczych, betonowaniu konstrukcji, demontażu częściowym lub całkowitym deskowania. Podstawową jednostką operacyjną zegara symulacji jest 1 dzień roboczy.

Planowanie rozpoczyna się od uruchomienia procedury, która pozwala planiście na utworzenie dowolnej ilości frontów robót. W kolejnych krokach zegar przenosi się do chwili $t+1$ i sprawdza, czy chwila ta odpowiada któremuś z punktów kontrolnych. Wówczas albo realizuje procedurę, przypisaną punktowi kontrolnemu, albo tylko weryfikuje, czy są jeszcze fronty, oczekujące na wykonanie zaległego elementu procesu technologicznego (jeżeli taki istnieje). Zegar symulacji pracuje tak długo, aż zostaną zamknięte wszystkie fronty robocze i nie będzie istniał element konstrukcyjny, na którym nie przeprowadzono jeszcze żadnego procesu technologicznego. Front uważa się za zamknięty jeżeli zostaną zrealizowane na nim wszystkie prace technologiczne, od przygotowawczych po całkowity demontaż deskowania.

Ideę pracy symulatora obrazuje schemat na rys. 4. W procesie symulacji przyjmuje się, że jednostką czasu jest 1 dzień roboczy z 10-cio godzinnym czasem pracy.



Rys. 4. Schemat symulacji przebiegu robót MBB. Źródło: opracowanie własne.

8.2.5. GENEROWANIE FRONTÓW ROBÓT

Generowanie frontów robót odbywa się w procedurze „Utwórz nowy front” (rys. 4). Procedura ta jest najbardziej skomplikowaną, a jednocześnie najistotniejszą – następuje tu określenie pracochłonności i potrzeb alokacji elementów deskowań dla wszystkich elementów procesu technologicznego, przewidzianych do realizacji na froncie.

Procedura umożliwia otwarcie nowego frontu robót, a dokładniej – rozpoczęcie poprzedzających betonowanie prac przygotowawczych na wybranych przez planistę elementach konstrukcji. Tworzenie nowych frontów robót możliwe jest:

- na początku procesu planowania,
- w chwili całkowitego zakończenia prac na jakimś froncie (tj. po zdemontowaniu całości deskowania) – w punkcie kontrolnym nr 6,
- podczas trwania przerw technologicznych, związanych z wiązaniem betonu – tj. zaraz po zakończeniu betonowania elementów frontu, ale przed rozpoczęciem demontażu deskowania – tj. w punkcie kontrolnym nr 2,
- w przerwie technologicznej pomiędzy częściowym i całkowitym demontażem deskowania – w punkcie kontrolnym nr 4.

Procedurę rozpoczyna utworzenie tymczasowego zbioru NF_t^{temp} elementów konstrukcji „kandydatów” do nowego frontu robót. Element „kandydat” charakteryzuje się wskaźnikiem stanu elementu $se_i = 0$. Jeżeli NF_t^{temp} jest pusty, procedura kończy się, w przeciwnym przypadku, dla każdego $e_i \in NF_t^{temp}$ procedura wyszukuje jego poprzedniki e_h i utworzony zostaje z nich zbiór NFP_t^i . Jeżeli NFP_t^i jest pusty (brak poprzedników), element e_i zostaje zapisany w zbiorze NF_t elementów, na których można rozpocząć prace przygotowawcze w chwili t . W przeciwnym razie, procedura sprawdza stany zaawansowania robót dla wszystkich poprzedników $e_h \in NFP_t^i$. Możliwe są tu następujące sytuacje:

- $se_h = 0$ lub $se_h = 1$ – czyli albo nie rozpoczęto prac na poprzedniku elementu e_i , albo je rozpoczęto, ale jeszcze nie zabetonowano elementu – wówczas element e_i zostaje usunięty z tymczasowego zbioru NF_t^{temp} ,
- $se_h = 2$ – co oznacza że poprzednik został wykonany (zabetonowany).

Jeżeli bieżący element e_h jest jedynym poprzednikiem dla e_i – element e_i zostaje umieszczony w zbiorze NF_t . W przypadku niespełnienia warunku pierwszego przez którykolwiek poprzednik e_h , element e_i zostaje usunięty z tymczasowego zbioru NF_t^{temp} .

Po dokonaniu przez system komputerowy przeglądu wszystkich elementów oraz ich poprzedników, planista wybiera z utworzonego przez aplikację zbioru NF_t te elementy konstrukcji, na których chciałby w bieżącej chwili t rozpocząć prace przygotowawcze, tworząc tym samym tymczasowy zbiór TNF_t . Zadaniem aplikacji jest weryfikacja tego zamiaru pod kątem dostępności wykorzystywanych zasobów. Warunkiem rozpoczęcia prac na wskazanych przez planistę elementach

konstrukcji jest spełnienie warunku niewystąpienia nadmiernej alokacji deskowań i robotników w chwili tworzenia frontu. W przypadku występowania nadmiernej alokacji deskowań lub robotników, planista dostaje możliwość ponownego wyboru elementów ze zbioru NF_t . Może także przerwać proces tworzenia nowego frontu, jeżeli uzna, że dostępny potencjałprodukcyjny jest za mały by otwierać nowy front robót.

Założeniem przebiegu symulacyjnego planowania robót jest umożliwienie planującemu dokonania oceny jakościowej przyjętych rozwiązań. Miarą oceny, wyznaczaną w chwili podejmowania każdej decyzji, jest szacowany koszt (strata) z tytułu niewykorzystania dostępnych elementów deskowania w trakcie wykonywania prac. W momencie tworzenia nowego frontu robót, koszt ten skalkulowany zostaje w przedziale czasowym równym czasowi wykonania potencjalnie rozpoczętych prac przygotowawczych, i uwzględnia:

- ogólną dostępność wszystkich rodzajów i typów elementów deskowań wyrażoną tablicą $[DD_{\langle t, t+t^{prz} \rangle}]_{(r,k)}$,
- obciążenie pracą elementów deskowań wszystkich rodzajów i typów, wykorzystywanych na już utworzonych frontach – co opisuje tablica $[PD_{\langle t, t+t^{prz} \rangle}]_{(r,k)}$,
- prognozowane obciążenie pracą (normatywną) elementów deskowań wszystkich rodzajów i typów, wykorzystywanych na nowo tworzonym froncie – co opisuje tymczasowa tablica $[TPD_{\langle t, t+t^{prz} \rangle}]_{(r,k)}$, której wartości równe są $[TNF^{d, prz}]_{(r,k)}$.

Tymczasowy koszt (strata) kalkulowany powinien być wg zależności:

$$KS_t^{temp} = ([DD_{\langle t, t+t^{prz} \rangle}]_{(r,k)} - [PD_{\langle t, t+t^{prz} \rangle}]_{(r,k)} - [TPD_{\langle t, t+t^{prz} \rangle}]_{(r,k)}) \times [c]_{(r,k)}, \quad (1)$$

gdzie

t^{prz} oznacza szacowany czas wykonania prac przygotowawczych na rozpatrywanym tymczasowym froncie TNF_t przez brygadę o średniej liczebności wymaganej technologicznie dla wykonania elementów frontu;

$[c]_{(r,k)}$ oznacza koszt zaangażowania (dzierżawy) konkretnego elementu k z systemu deskowania typu r .

Jeżeli poziom kosztów jest akceptowalny, planista tworzy front robót F_j . W przeciwnym wypadku procedura umożliwi ponowny wybór elementów lub zaprzestanie tworzenia frontu i przejście do chwili $t+1$. W przypadku podjęcia przez planistę decyzji o utworzeniu nowego frontu, aplikacja komputerowa, na podstawie informacji o liczebności brygad niezbędnych do wykonania poszczególnych elementów konstrukcji (ozn. b_i^*), wyznacza macierz liczebności brygad, wymaganych technologicznie do zrealizowania poszczególnych robót na froncie:

$$[bf_j] = [bf_j^{prz}, bf_j^b, bf_j^{d1}, bf_j^{d2}], \quad (2)$$

gdzie

$$bf_j^* = \max_{i:e_i \in \{F_j\}} b_i^*. \quad (3)$$

Algorytm, znając pracochłonności p_i^* wykonania poszczególnych elementów procesu technologicznego dla każdego z elementów tworzących front, wyznacza pracochłonności poszczególnych elementów procesu technologicznego na froncie:

$$[pf_j] = [pf_j^{przbyg}, pf_j^b, pf_j^{d1}, pf_j^{d2}], \quad (4)$$

gdzie

$$pf_j^* = \sum_{i:e_i \in \{F_j\}} p_i^*. \quad (5)$$

Ilość pracowników, kierowanych do wykonania prac przygotowawczych planista określa samodzielnie, definiując wartość c_j^{przbyg} . Algorytm sprawdza, czy podana przez planistę liczba zapewnia minimum technologiczne i jednocześnie nie przekracza dostępnej w chwili t liczby robotników. Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie czasu wykonania robót przygotowawczych na froncie wg zależności (6):

$$t_j^{przbyg} = \left[\frac{\sum_{i:e_i \in \{F_j\}} p_{i,r}^{przbyg}}{10 \cdot c_j^{przbyg}} \right]. \quad (6)$$

Ponadto dla każdego i , takiego że $e_i \in \{F_j\}$:

- zmodyfikowane zostają wskaźniki stanu elementu: $se_i = 1$,
- przypisany zostaje planowany termin rozpoczęcia prac przygotowawczych $tr_i^{przbyg} = t$.

Na utworzonym froncie F_j będą pracować elementy deskowań, których liczebność wynika z ilości $[e_i^{d,*}]_{(r,k)}$ deskowań przypisanych do poszczególnych elementów konstrukcyjnych e_i . Ilości elementów deskowań alokowanych na froncie F_j podczas realizacji poszczególnych elementów procesu technologicznego opisuje tablica F_j^d :

$$[F_j^d]_{4 \times (r,k)} = [[F_j^{d,przbyg}]_{(r,k)}, [F_j^{d,b}]_{(r,k)}, [F_j^{d,d1}]_{(r,k)}, [F_j^{d,d2}]_{(r,k)}], \quad (7)$$

gdzie

$$[F_j^{d,*}]_{(r,k)} = \sum_{i:e_i \in \{F_j\}} [e_i^{d,*}]_{(r,k)}. \quad (8)$$

Ponadto, otwarcie frontu powoduje przypisanie wartości tzw. wskaźnikom stanu decyzji planisty, które informują o postępie robót i decyzjach podjętych w związku z realizacją prac na poszczególnych frontach. I tak:

- wskaźnik otwarcia w_j^{of} j -tego frontu otrzymuje wartość 1; wartość 0 zostanie mu nadana w chwili zamknięcia prac na froncie, tj. po całkowitym demontażu konstrukcji tymczasowych;
- wskaźnik informujący o niezabetonowaniu frontu w_j^{nb} otrzymuje wartość 1; wartość 0 zostanie mu przypisana w chwili podjęcia decyzji o betonowaniu frontu;
- wskaźniki informujące o niezdemontowaniu części lub całości deskowania z elementów frontu – w_j^{nd1} i w_j^{nd2} otrzymują wartość 1; wartość 0 zostanie im nadana wraz z podjęciem decyzji o częściowym bądź całkowitym demontażu deskowania.

Finalnie, algorytm wyznacza dla otwieranego frontu pierwszy punkt kontrolny:

$$pk_j^1 = t + t_j^{przyg} \quad (9)$$

i w przedziale czasowym $\langle t, pk_j^1 \rangle$ uzupełnia tablice zajętości i obciążenia pracą deskowań ilością elementów deskowania zapisaną w tablicy $[F_j^{d,przyg}]_{(r,k)}$, jak również tablicę zajętości robotników – wartością c_j^{przyg} .

Jako że zaleca się tworzenie frontów z elementów jednotypowych, o zbliżonych wymaganiach co do terminu rozdeskowania, czasy zwłoki dla rozdeskowania części i całości deskowania na utworzonym froncie określone zostają na podstawie zależności (10):

$$buf_j^1 = \max_{i:e_i \in \{F_j\}} buf_i^1 \quad \text{oraz} \quad buf_j^2 = \max_{i:e_i \in \{F_j\}} buf_i^2. \quad (10)$$

8.2.6. PODEJMOWANIE DECYZJI O BETONOWANIU FRONTÓW

Podjęcie decyzji o układaniu mieszanki betonowej na wybranych frontach robót umożliwiła procedura „Betonowanie”. Procedura ta wywoływana jest przez algorytm w punkcie kontrolnym nr 1. Symulator wyszukuje numer frontu, do którego należy bieżący punkt kontrolny, jak również sprawdza, czy są jeszcze inne fronty, oczekujące na wykonanie procesu betonowania. Symulator wyszukuje i podaje planującemu numery niezabetonowanych dotychczas frontów, tworząc zbiór tymczasowy TFB_t „kandydatów do betonowania”. Z tego zbioru planista wybiera numery frontów, na których chce przeprowadzić betonowanie, tworząc tym samym zbiór FB_t . Algorytm weryfikuje dostępną liczbę robotników i informuje planującego o szacowanym koszcie (stracie) z tytułu podjętej decyzji ewentualnego niewykonania betonowania w bieżącej chwili:

$$KS_t^{temp} = ([DD_t]_{(r,k)} - [PD_t]_{(r,k)} - [TPD_t]_{(r,k)}) \times [c]_{(r,k)}, \quad (11)$$

gdzie:

$[PD_t]_{(r,k)}$ oznacza tablicę obciążenia pracą wszystkich rodzajów i typów deskowań, wykorzystywanych w chwili t ;

$[TPD_t]_{(r,k)}$ to tymczasowa tablica obciążenia pracą elementów deskowań, wykorzystywanych na frontach, na których przeprowadzone ma być betonowanie; wartości elementów tablicy stanowią sumy $\sum_{j \in \{FB_t\}} [F_j^{d,b}]_{(r,k)}$.

Planista ma możliwość: zaakceptowania swojego wyboru, ponownego wyboru frontów do betonowania, bądź całkowitej rezygnacji z betonowania frontów w chwili t . Podjęcie decyzji związanej z betonowaniem frontów, wiąże się z koniecznością określenia przez planującego liczebności brygady robotników c_t^b , przy czym algorytm weryfikuje automatycznie występowanie nadmiernej alokacji. Następnie symulator dla każdego $j \in \{FB_t\}$:

- zmienia wartość wskaźnika informującego o niezabetonowaniu frontu w_j^{nb} na 0;
- wyznacza punkty kontrolne nr 2, 3 i 5:

$$pk_j^2 = t + 1, \quad (12)$$

$$pk_j^3 = t + 1 + buf_j^1, \quad (13)$$

$$pk_j^5 = t + 1 + buf_j^2, \quad (14)$$

- wylicza dla każdego elementu $e_i \in \{F_j\}$, takiego że $j \in \{FB_t\}$, planowany termin rozpoczęcia betonowania: $tr_i^b = t$.

Dla wszystkich numerów frontów $j \in \{FB_t\}$ uzupełniona zostaje w przedziale czasowym $\langle t, pk_j^2 \rangle$ tablica zajętości i obciążenia pracą deskowań liczbą elementów zapisaną w tablicy $[F_j^{d,b}]_{(r,k)}$. Dla frontów, które mogłyby, ale nie zostały zabetonowane, tj. dla $j \in \{TFB_t\} \setminus \{FB_t\}$, wypełniona zostaje w chwili t tablica zajętości deskowań wartością $[F_j^{d,prztyg}]_{(r,k)}$, natomiast w tablicy obciążenia pracą – wartością 0. Z kolei tablica zajętości robotników uzupełniona zostaje w chwili t wartością c_t^b .

8.2.7. PODEJMOWANIE DECYZJI O CZĘŚCIOWYM DEMONTAŻU DESKOWANIA

Procedura „Rozdeskowanie 1” umożliwia wskazanie tych frontów robót, na których można przeprowadzić częściowy demontaż deskowania (np. demontaż płyt panelowych deskowań stropowych, pomostów roboczych, części kozłów zastawczych itp.). Jest ona uruchamiana w punkcie kontrolnym nr 3, jak również może być wywołana za pośrednictwem procedury „Rozdeskowanie 2” – w sytuacji, gdy planista nie może całkowicie zdemontować deskowania na wybranych frontach, ponieważ nie przeprowadził na nich częściowego demontażu deskowania.

W zależności od przyczyny uruchomienia procedury:

- aplikacja wyszukuje numer frontu, do którego należy bieżący punkt kontrolny nr 3 oraz weryfikuje istnienie innych frontów, na których nie przeprowadzono jeszcze częściowego demontażu deskowania. Fronty, które nie

zostały jeszcze częściowo rozdeskowane tworzą tymczasowy zbiór TKD_t^1 „kandydatów do rozdeskowania”;

- tymczasowy zbiór TKD_t^1 „kandydatów do rozdeskowania” zostaje utworzony bezpośrednio ze zbioru KD_t^1 wygenerowanego przez procedurę „Rozdeskowanie 2”.

Każdy front należący do zbioru „kandydatów” zostaje zweryfikowany pod kątem dopuszczenia go do częściowego rozdeskowania, tj. dla każdego $j \in \{TKD_t^1\}$ sprawdzona zostaje nierówność $t \geq pk_j^3$. Jeżeli nierówność ta jest spełniona – numer frontu pozostaje w zbiorze TKD_t^1 , w przeciwnym wypadku zostaje z niego usunięty. Następnie planista wskazuje numery frontów, które przewidywane są do częściowego rozdeskowania w chwili t . Numery te tworzą zbiór FD_t^1 . Algorytm dokonuje oceny możliwości wystąpienia nadmiernej alokacji siły roboczej; w przypadku braku dostępnej siły roboczej, aplikacja pozwala planiście ponownie wybrać fronty robocze, bądź opuścić procedurę.

Przed podjęciem decyzji o rozpoczęciu prac demontażowych na wskazanych frontach, wyznaczony zostaje szacowany koszt (strata) z tytułu niepełnego wykorzystania deskowań systemowych w związku z planowaną decyzją:

$$KS_t^{temp} = \left([DD_{\langle t, t+t^{d1} \rangle}(r,k)] - [PD_{\langle t, t+t^{d1} \rangle}(r,k)] - [TPD_{\langle t, t+t^{d1} \rangle}(r,k)] \right) \times [c]_{(r,k)}, \quad (15)$$

gdzie t^{d1} oznacza orientacyjny czas trwania pierwszej fazy demontażu deskowania na wytypowanych frontach roboczych.

Do wyznaczenia czasu t^{d1} przyjmuje się brygadę o średniej liczebności wymaganej technologicznie dla wykonania demontażu fazy 1. Po zaakceptowaniu decyzji o częściowym demontażu, planista definiuje ostateczną liczebność brygady roboczej do wykonania prac – c_t^{d1} , po czym symulator, dla każdego $j \in \{FD_t^1\}$:

- zmienia wartość wskaźnika informującego o niewykonaniu częściowego demontażu na froncie w_j^{nd1} na 0;
- wyznacza punkt kontrolny nr 4:

$$pk_j^4 = t + t_j^{d1}; \quad (16)$$

- wylicza dla każdego elementu $e_i \in \{F_j\}$, takiego że $j \in \{FD_t^1\}$ planowany termin rozpoczęcia demontażu fazy 1: $tr_i^{d1} = t$.

Dla wszystkich $j \in \{FD_t^1\}$ uzupełniona zostaje w przedziale czasowym $\langle t, pk_j^4 \rangle$ tablica zajętości i obciążenia pracą deskowań liczbą elementów zapisaną w tablicy $[F_j^{d,d1}]_{(r,k)}$. Z kolei tablica zajętości robotników wypełniona zostaje wartością c_t^{d1} . Dla frontów, które mogłyby, ale nie zostały rozdeskowane, tj. dla $j \in \{TKD_t^1\} \setminus \{FD_t^1\}$, wypełniona zostaje w chwili t tablica zajętości deskowań wartością $[F_j^{d,b}]_{(r,k)}$, natomiast w tablicy obciążenia pracą – wartością 0.

8.2.8. CAŁKOWITY DEMONTAŻ DESKOWANIA

Decyzję o całkowitym demontażu deskowania symuluje procedura „Rozdeskowanie 2”. Procedura ta wywoływana jest w punkcie kontrolnym nr 5. Warunkiem jej przeprowadzenia na wybranym froncie jest wcześniejsze zrealizowanie procedury „Rozdeskowanie 1”.

Podobnie, jak we wszystkich poprzednich procedurach, algorytm wyszukuje najpierw numer frontu, do którego należy bieżący punkt kontrolny nr 5 oraz weryfikuje istnienie innych frontów, na których można przeprowadzić całkowity demontaż deskowania. Numery frontów, które nie zostały jeszcze rozdeskowane, tworzą tymczasowy zbiór TKD_t^2 „kandydatów do całkowitego rozdeskowania”. Każdy front należący do tego zbioru zostaje zweryfikowany dwójako:

- po pierwsze: czy został na nim przeprowadzony częściowy demontaż urządzeń formujących, tj. czy $w_j^{nd1} = 0$; jeżeli nie przeprowadzono demontażu deskowania fazy 1, numer frontu zostaje usunięty ze zbioru TKD_t^2 i zapisany do zbioru KD_t^1 ; po dokonaniu weryfikacji wszystkich frontów, symulator umożliwia wyjście z bieżącej procedury i bezpośrednio przeprowadzenie procedury „Rozdeskowanie 1” na elementach zbioru KD_t^1 . Symulator umożliwia także rezygnację z częściowego rozdeskowania ww. frontów i kontynuację czynności sprawdzających na elementach zbioru TKD_t^2 – o ile TKD_t^2 nie jest pusty;
- po drugie: czy możliwy technologicznie jest całkowity demontaż deskowania, tj. czy dla każdego $j \in \{TKD_t^2\}$ zachodzi nierówność $t \geq pk_j^5$. Jeżeli nierówność ta jest spełniona – numer frontu pozostaje w zbiorze TKD_t^2 , w przeciwnym wypadku zostaje z niego usunięty.

Po dokonaniu przez aplikację powyższej weryfikacji planista wybiera ze zbioru TKD_t^2 numery tych frontów, z których chce całkowicie zdemontować elementy konstrukcji formującej w chwili t , tworząc tym samym zbiór FD_t^2 . Algorytm sprawdza możliwość wystąpienia nadmiernej alokacji robotników, pozwalając planującemu na ponowny wybór frontów, bądź wyjście z procedury.

Tak jak w każdej z prezentowanych procedur, przed podjęciem decyzji o rozpoczęciu prac demontażowych na wskazanych frontach, wyznaczony zostaje szacowany koszt (strata) z tytułu niepełnego wykorzystania deskowań systemowych w związku z planowaną decyzją:

$$KS_t^{temp} = \left([DD_{\langle t, t+t^{d2} \rangle}]_{(r,k)} - [PD_{\langle t, t+t^{d2} \rangle}]_{(r,k)} - [TPD_{\langle t, t+t^{d2} \rangle}]_{(r,k)} \right) \times [c]_{(r,k)}, \quad (17)$$

gdzie t^{d2} oznacza szacowany czas trwania całkowitego demontażu deskowania na wybranych frontach roboczych.

W przypadku zaakceptowania frontów do przeprowadzenia na nich całkowitego demontażu, planista definiuje ostateczną liczebność brygady roboczej do realizacji tych prac – c_t^{d2} , po czym symulator, dla każdego $j \in \{FD_j^2\}$:

- zmienia wartość wskaźnika informującego o niewykonaniu całkowitego rozdeskowania frontu w_j^{nd2} na 0;
- wyznacza punkt kontrolny nr 6:

$$pk_j^6 = t + t_j^{d2}; \quad (18)$$

- wylicza dla każdego elementu $e_i \in \{F_j\}$, takiego że $j \in \{FD_t^2\}$, planowany termin rozpoczęcia demontażu fazy 2: $tr_i^{d2} = t$.

Dla wszystkich $j \in \{FD_t^2\}$ uzupełniona zostaje w przedziale czasowym $\langle t, pk_j^6 \rangle$ tablica zajętości i obciążenia pracą deskowań liczbą elementów zapisaną w tablicy $[F_j^{d,d2}]_{(r,k)}$, zaś tablica zajętości robotników uzupełniona zostaje wartością c_t^{d2} .

Dla frontów, które mogłyby, ale nie zostały rozdeskowane, tj. dla

$$j \in \{TKD_t^2\} \setminus \{FD_t^2\} + \{KD_t^1\},$$

wypełniona zostaje w chwili t tablica zajętości deskowań wartością $[F_j^{d,d1}]_{(r,k)}$, natomiast w tablicy obciążenia pracą – wartością 0.

8.2.9. ZEGAR GŁÓWNY SYMULATORA

Planowanie rozpoczyna się od uruchomienia w chwili $t = 0$ procedury „Utwórz Nowy Front”, która pozwala planiście na utworzenie dowolnej ilości frontów robót. Gdy już nie ma możliwości utworzenia nowego frontu robót lub planista nie chce go tworzyć po przeanalizowaniu wielkości straty z tytułu niewykorzystania deskowań, zegar przesuwa się do chwili $t+1$ i sprawdza, czy chwili tej odpowiada punkt kontrolny:

- w przypadku odpowiedzi pozytywnej, uruchomione zostają procedury odpowiednio dla danych punktów kontrolnych; po ich zakończeniu następuje weryfikacja, czy są dostępne fronty oczekujące na zrealizowanie jakiś procesów technologicznych, co ma miejsce, gdy planujący rezygnował wcześniej z ich realizacji w toku symulacji. Weryfikowane są wyłącznie te elementy procesu technologicznego, dla których procedury nie były uruchamiane w chwili $t+1$, tj. jeżeli w chwili $t+1$ wywołana została procedura „Rozdeskowanie 1”, to po jej zakończeniu następuje wyłącznie sprawdzenie czy są fronty oczekujące na zabetonowanie bądź całkowity demontaż deskowania;
- w przypadku odpowiedzi negatywnej – następuje wyłącznie weryfikacja dostępności frontów oczekujących na wykonanie „zaległego” betonowania, częściowego, bądź całkowitego demontażu deskowania.

Sprawdzenie, czy są fronty oczekujące na wykonanie „zaległych” elementów procesu technologicznego, następuje poprzez weryfikację nierówności:

$$\sum_{j \in J} w_j^* > 0, \quad (19)$$

gdzie w_j^* jest wskaźnikiem informującym o niewykonaniu betonowania (indeks nb), demontażu fazy 1 (indeks $nd1$) lub demontażu fazy 2 (indeks $nd2$) na froncie F_j .

W trakcie symulacji wyznaczony zostaje koszt (strata) z tytułu niewykorzystania deskowania, informujący planistę o efektywności podejmowanych decyzji. Koszt ten jest dwojakiego rodzaju:

- tymczasowy, kalkulowany wg zależności (20) przed podjęciem decyzji o wykonaniu konkretnego elementu procesu technologicznego:

$$KS_t^{temp} = ([DD]_{\langle t, t+t^* \rangle}(r,k) - [PD]_{\langle t, t+t^* \rangle}(r,k) - [TPD]_{\langle t, t+t^* \rangle}(r,k)) \times [c]_{(r,k)}, \quad (20)$$

gdzie t^* – szacowany czas wykonania elementu procesu technologicznego (*przyg*, b , $d1$, $d2$) na rozpatrywanym froncie przez brygadę o średniej liczebności wymaganej technologicznie dla wykonania elementów frontu; $[TPD]_{\langle t, t+t^* \rangle}(r,k)$ – tablica prognozowanego w przedziale czasowym $\langle t, t+t^* \rangle$ obciążenia pracą elementów deskowań wykorzystywanych na rozpatrywanym froncie; $[c]_{(r,k)}$ – tablica kosztów jednostkowych dzierżawy elementów deskowań.

- bieżący, kalkulowany wg zależności (21) po podjęciu decyzji; należy go rozumieć jako dzienny koszt (dzienna strata):

$$KS_t^r = \begin{cases} ([DD]_{(r,k)} - [PD]_{(r,k)}) \times [c]_{(r,k)} & \text{dla } t = 1, \\ KS_{t-1}^r + ([DD]_{(r,k)} - [PD]_{(r,k)}) \times [c]_{(r,k)} & \text{dla } t > 1. \end{cases} \quad (21)$$

Przed wykonaniem przez symulator przejścia do następnej chwili t , następuje także sprawdzenie warunku (22) istnienia kolejnych punktów kontrolnych:

$$t + 1 > \max_{\substack{j \in J \\ v \in \{1,2,\dots,6\}}} \{pk_j^v\}. \quad (22)$$

Brak kolejnych punktów kontrolnych oznaczać może koniec procesu symulacji, bądź istnienie frontów oczekujących na wykonanie elementów procesu budowlanego. Warunkiem zakończenia pracy symulatora jest jednocześnie:

- zrealizowanie wszystkich elementów procesu monolitycznego budownictwa betonowego na wszystkich utworzonych w procesie symulacji frontach, co sprawdza warunek:

$$\sum_{j \in J} w_j^{of} = 0; \quad (23)$$

- brak elementów konstrukcyjnych e_i obiektu, których nie przydzielono do żadnego frontu i nie zrealizowano na nich robót budowlanych, co z kolei określa warunek:

$$\sum_{i \in E} s e_i = 2\overline{E}. \quad (24)$$

8.3. APLIKACJA KOMPUTEROWA DO PLANOWANIA ROBÓT BETONOWYCH

W celu prezentacji oraz weryfikacji sposobu działania interaktywnej metody planowania monolitycznych robót betonowych, opracowano uproszczoną aplikację komputerową, pozwalającą przeprowadzać dynamiczną symulację przebiegu robót MBB. Symulację prowadzi się w oknie symulacji (rys. 5), w którym planista jest informowany w na bieżąco o możliwych do podjęcia decyzjach, tj.:

- o możliwości utworzenia nowego frontu robót – co wiąże się z wyborem z zaproponowanej przez symulator listy elementów konstrukcji,
- o możliwości betonowania, częściowego lub całkowitego rozdeskowania otwartych wcześniej frontów robót – wiąże się to ze wskazaniem numerów frontów, na których planujący chce przeprowadzić ww. elementy procesu technologicznego.

Każdej z tych decyzji towarzyszy analiza dostępności zasobów oraz ocena szacowanego kosztu (straty) z tytułu niewykorzystania deskowań. Ponadto planista jest informowany o bieżącym koszcie (stracie) dnia i koszcie narastającym od chwili rozpoczęcia budowy. W przypadku, gdy są one niesatysfakcjonujące, planujący ma możliwość zmodyfikowania liczby pracowników, bądź ponownego wyboru elementów lub frontów. Ponadto, korzystając z symulatora, planista informowany jest zarówno o liczebności dostępnych robotników i elementów deskowań, jak również o ilości elementów deskowań zajętych oraz obciążonych pracą. Aktualizacja dostępności elementów deskowań odbywa się raz w tygodniu, co umożliwi zwrot lub pozyskanie większej liczby elementów formujących, a co za tym idzie – dopasowanie ilości dzierżawionych deskowań do realnych potrzeb planującego. Pozwala to urealnić proces planowania, jak również ograniczyć koszty (stratę) z tytułu niepełnego wykorzystania deskowań.

W każdym kroku symulacji, aplikacja informuje planistę o nadmiernej alokacji zasobów przy danej decyzji. Liczba ujemna oznacza poziom nadmiernej alokacji, będącej skutkiem podjętej decyzji przez planistę. Przykład takiej sytuacji obrazuje rys. 6.

Aplikacja pozwala planującemu na „przewijanie” zegara symulacji wyłącznie pomiędzy generowanymi przez aplikację decyzjami, bądź analizowanie przebiegu robót dzień po dniu lub tydzień po tygodniu. Jeżeli w interwale tygodniowym pojawia się punkt kontrolny, oznaczający konieczność podjęcia przez planującego decyzji – symulator przenosi planującego do punktu kontrolnego. Ponadto

Simulacja

Dzień: 1 Skumulowany koszt straty: 4714,6 zł Koszt straty dnia: 4714,6 zł

Stan Magazynu

Pracownicy

Dostępni	Zajęci
8	4

Do następnej decyzji >>
Następny tydzień >>
Następny dzień >>

Wybór elementów

Podajemy decyzji: 12868,8

Id: 2, typ: schody, typ deskowania: 19
 Id: 9, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 10, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 15, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 19, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 20, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 21, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 22, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 23, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 24, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 25, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 26, typ: ściana, typ deskowania: 4
 Id: 33, typ: ściana, typ deskowania: 4

Sprawdź Koszt
Zatwierdź wybór

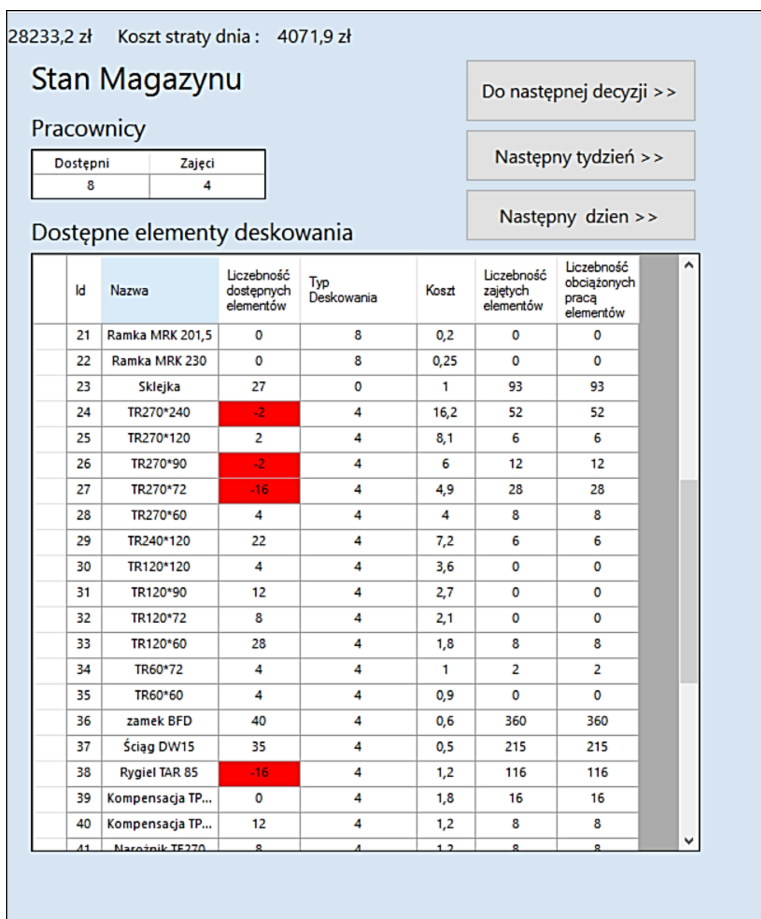
Przydziel robotników: 4

Status frontów

Dostępne elementy deskowania

Id	Nazwa	Liczebność dostępnych elementów	Typ Deskowania	Koszt	Liczebność zajętych elementów	Liczebność dostępnych pracujących elementów
23	Sklejka	46	0	1	74	74
24	TR270*240	38	4	16,2	12	12
25	TR270*120	4	4	8,1	4	4
26	TR270*90	6	4	6	4	4
27	TR270*72	0	4	4,9	12	12
28	TR270*60	8	4	4	4	4
29	TR240*120	28	4	7,2	0	0
30	TR120*120	4	4	3,6	0	0
31	TR120*90	12	4	2,7	0	0
32	TR120*72	8	4	2,1	0	0
33	TR120*60	28	4	1,8	8	8
34	TR60*72	4	4	1	2	2
35	TR60*60	4	4	0,9	0	0
36	zamek BFD	238	4	0,6	162	162
37	Ściąg DW15	183	4	0,5	67	67
38	Rygiel TAR 85	74	4	1,2	26	26
39	Kompensacja TP...	8	4	1,8	8	8
40	Kompensacja TP...	12	4	1,2	8	8
41	Naroznik TE270	12	4	1,2	4	4
42	Naroznik TE120	4	4	0,8	0	0
43	Budulek SCL1147	50	4	0,5	0	0

Rys. 5. Widok okna symulacji – podejmowanie decyzji w chwili tworzenia nowego frontu robót. Źródło: opracowanie własne.

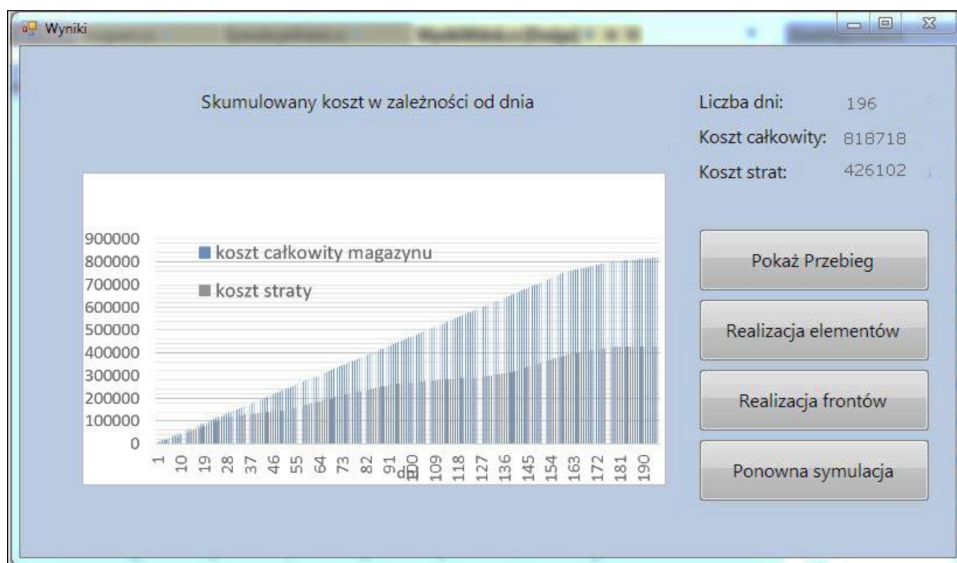


Rys. 6. Widok funkcjonalności okna symulacji – stan magazynu z nadmierną alokacją.
Źródło: opracowanie własne.

planista jest informowany o możliwości modyfikacji stanu magazynu (określającej dostępność zasobów) w odstępach tygodniowych, niezależnie od wybranego interwału zegara symulacji.

Przeprowadzenie symulacji przebiegu monolitycznych robót betonowych na obiekcie kubaturowym kończy wygenerowane przez aplikację okno wyniku (rys. 7), w którym planujący jest informowany o:

- czasie trwania robót,
- koszcie (stracie) z tytułu ponadnormatywnego utrzymywania deskowań systemowych na budowie,
- całkowitym koszcie dzierżawy deskowań, oznaczonym jako „koszt magazynu”.



Rys. 7. Widok okna wyniku – planu wykorzystania deskowań.
 Źródło: opracowanie własne.

Dodatkowo, w oknie wyniku generowane są wykresy, obrazujące tempo przyrastania strat z tytułu niewykorzystania deskowań i całkowitego kosztu magazynu. Zadaniem użytkownika programu jest takie zaplanowanie robót, by je ograniczyć. Ocenę jakości tego rozwiązania wyraża przede wszystkim wielkość straty, jednak nie bez znaczenia jest jej stosunek do kosztów całkowitych. Im mniejszy rozstęp pomiędzy wykresami, tym gorzej należy ocenić rozwiązania organizacyjne.

Aplikacja pozwala także szczegółowo prześledzić (w wygenerowanym pliku tekstowym) przebieg zmiany kosztów wykorzystywania deskowań w czasie. Możliwe jest także zapisanie przebiegu planowanych robót – generując arkusze kalkulacyjne, zawierające odpowiednio terminy rozpoczęcia elementów procesu technologicznego (dla każdego elementu konstrukcyjnego) oraz terminy wystąpienia kolejnych punktów kontrolnych na frontach robót.

Opracowana metoda i narzędzie w postaci aplikacji komputerowej pozwalają na możliwie realne odzwierciedlenie faktycznego przebiegu robót MBB. Jednak to planujący, interaktywnie współpracując z symulatorem, jest ostatecznym decyzyjnym w kwestii przebiegu ich realizacji. To on tworzy nowe fronty robót i to on decyduje o przeprowadzeniu bądź opóźnieniu realizacji procesów technologicznych na frontach. Zadaniem aplikacji jest z kolei symulowanie przebiegu robót poprzez generowanie sytuacji decyzyjnych, będących wynikiem decyzji wcześniej podjętych przez planującego. Symulator „pilnuje” przy tym porządku technologicznego robót, dostępności i nadmiernej alokacji zasobów i analizuje

koszty podejmowanych decyzji. Z pewnością znaczącym udoskonaleniem byłoby opracowanie systemu, który sam, lub przy niewielkim udziale planującego, podejmowałby decyzje „w przód”. Wymaga to jednak dalszych prac i badań w obszarze modelowania i akwizycji wiedzy eksperckiej oraz programowania inteligentnych systemów doradczych.

8.4. PODSUMOWANIE

Problem modelowania realizacji robót monolitycznego budownictwa betonowego jest złożonym problemem planistycznym, który powinien być rozpatrywany kompleksowo – począwszy od wyboru najkorzystniejszego do zastosowania systemu deskowania, poprzez modelowanie przedsięwzięcia, symulowanie jego przebiegu, kończąc na ocenie jakości uzyskanego rozwiązania, m.in. pod kątem wykorzystania zastosowanych deskowań. Wobec różnorodności ograniczeń i niejednorodności modeli decyzyjnych nieoceniona w rozwiązywaniu powyższych problemów jest interakcja planisty z aplikacją komputerową. Planista znając specyfikę problemu planowania monolitycznych robót betonowych i realne potrzeby w zakresie optymalizacji harmonogramu przy danej inwestycji, bierze udział w podejmowaniu decyzji, generowanych przez komputer kolejnych momentach w przebiegu procesu planistycznego.

Zaproponowana metoda planowania przedsięwzięć monolitycznego budownictwa betonowego czynnie włącza planistę w proces szeregowania zadań. Uczestnik procesu planistycznego może nie tylko na bieżąco modyfikować ilość lub rodzaj dostępnych i wykorzystywanych zasobów, ale także ma wpływ na przebieg robót, których rozpoczęcie uwarunkowane jest podjęciem przez niego decyzji. Decyzja ta jest oceniana poprzez analizę informacji o wykorzystaniu używanych deskowań. Tego typu podejście do planowania realizacji budpwy i opracowany system planistyczno-doradczy stanowi, zdaniem autorów, udaną próbę odwzorowania rzeczywistego przebiegu procesu realizacji monolitycznych robót betonowych, w których to warunki pogodowe, opóźnienia w dostawach materiałów, opóźnienia w odbiorach cząstkowych, uwarunkowania lokalne (niezakończenie innych robót, brak przygotowanego frontu) i przedsiębiorstwa wykonujące roboty decydują o przebiegu całego procesu budowlanego. Przedstawiona metodyka i metody analiz planistycznych powinny wspomóc zarządzającego produkcją budowlaną w prognozowaniu efektów rzeczowych, czasowych i kosztowych realizacji zamierzenia budowlanego, co było celem badań. Podejście interaktywne może być zastosowane w dowolnym etapie realizacji przedsięwzięcia.

8.5. BIBLIOGRAFIA

ABDEL-RAZEK, M.E. (1999). Formwork selection systems in building construction. *Journal of Engineering and Applied Science*, Vol. 46, No 4.

- ELBELTAGI, E. i in. (2011). Selection of slab formwork system using fuzzy logic. *Construction Management and Economics*, 29, 659–670.
- HANNA, A.S., WILLENBROCK, J.H., SANVIDO, V.E. (1992). Knowledge acquisition and development for formwork selection system. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 118, No 1, 179–198.
- KAMARTHI, S.V., SANVIDO, V.E., KUMARA, S.R. (1992). Neuroform – neural network system for vertical formwork selection. *Computing in Civil Engineering*, Vol. 6, No 2, 178–193.
- KANG, K.I. i in. (2008). Decision support model using the AdaBoost algorithm to select formwork systems in high-rise building construction. W: *25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction Proceedings, ISARC 2008*. Vilnius, Lithuania: 26.06-29.06.2008 (strony 644–649).
- KAPLIŃSKI, O. (red.) (2007). *Metody i modele badań w inżynierii przedsięwzięć budowlanych*. Warszawa, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej.
- KRAWCZYŃSKA-PIECHNA, A. (2015). *Interaktywna metoda planowania robót betonowych z analizą efektywności wykorzystania deskowań systemowych* (rozprawa doktorska). Płock, Politechnika Warszawska.
- MIKULAKOVA, E., KÖNIG, M., TAUSCHER, E., BEUCKE, K. (2010). Knowledge-based schedule generation and evaluation. *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 24, No 4, 389–403.
- PROVERBS, D.G., HOLT, G.D., OLOMOLAIYE, P.O. (1999). Construction resource/ method factors influencing productivity for high rise concrete construction. *Construction Management and Economics*, No 17, 577–587.
- SHIN Y. i in. (2012). A formwork method selection model based on boosted decision trees in tall building construction. *Automation in Construction*, No 23, 47–54.
- TAM C.M. i in. (2005). Selection of vertical formwork system by probabilistic neural networks model. *Management and Economics*, No 23, 245–254.
- WU, I-C., BORRMANN, A., BIESSERT, U., KÖNIG, M., RANK, E. (2010). Bridge construction schedule generation with pattern-based construction methods and constraint-based simulation. *Advanced Engineering Informatics*, No 24, 379–388.
- YIP, P.-Y., WANG, J.-Y. (2008). Optimal multi-objective resource allocation using hybrid particle swarm optimization and adaptive resource bounds technique. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, No 216, 73–86