

Harmonogramowanie zintegrowanego systemu transportu i montażu kompozytowych elementów mostowych w systemie Just In Time

Dr hab. Wojciech Bożejko, mgr inż. Mariusz Uchroński, Instytut Informatyki, Automatyki i Robotyki, Politechnika Wrocławska, dr hab. inż. Zdzisław Hejducki, Instytut Budownictwa, Politechnika Wrocławska, dr hab. Mieczysław Wodecki, Instytut Informatyki, Uniwersytet Wrocławski, dr inż. Magdalena Rogalska, Politechnika Lubelska

1. Wprowadzenie

Obecnie zdecydowana większość budów jest realizowana w ściśle określonych ramach czasowych. Ich granice są w znacznym stopniu zdeterminowane przez technologię. Niedotrzymanie ustalonych terminów powoduje naliczenie znacznych kar, które wpływają zarówno na kondycję finansową przedsiębiorstwa, jak i na jego wiarygodność. Wykonanie zadania w przyjętym terminie wymaga ścisłego przestrzegania ustalonych harmonogramów wszelkich prac prowadzonych nie tylko bezpośrednio na budowie, ale także w jej otoczeniu.

Procesy logistyczne odgrywają ważną rolę na każdym etapie realizacji obiektów budowlanych. Obejmują one, między innymi, zagadnienia transportu i magazynowania elementów i materiałów budowlanych. Jest to niewątpliwie ważny element procesu inwestycyjnego szczególnie, gdy jest on realizowany w systemie JIT. Główna idea tej metody polega na maksymalnym zsynchronizowaniu momentów dostawy z zapotrzebowaniem na poszczególne elementy i materiały. Jest to szczególnie istotne, gdy budowy są prowadzone na terenach silnie zurbanizowanych. W przypadku budownictwa mostowego (wiadukty), taki system wykonawstwa jest często wymuszany przez ograniczenia wynikające z konieczności uwzględnienia: wymogów ochrony środowiska, braku miejsc magazynowania, odpowiednich dróg dojazdowych itp.

Organizacja pracy w systemie JIT umożliwia zsynchronizowanie dostaw (transportu prefabrykatów) z montażem, co pozwala na uniknięcie konieczności ich składowania. Wymaga przy tym rozwiązywania wielu bardzo trudnych (silnie NP-trudnych) problemów optymalizacyjnych [6]. Obecnie nie są znane algorytmy optymal-

ne ich rozwiązywania o wielomianowej złożoności obliczeniowej. Dlatego też stosuje się zazwyczaj szybkie algorytmy aproksymacyjne (tj. przybliżone o wielomianowej złożoności obliczeniowej, bez gwarancji optymalności).

Praca dotyczy nowych zagadnień stosowania prefabrykowanych elementów mostowych dla przebudowy sieci transportowej (kolejowej i drogowej) w celu zapewnienia bezkolizyjności ciągów komunikacyjnych. W ostatnich latach zostały opracowane nowe rozwiązania technologiczne, w których zastosowano kompozyty polimerowe (ang. Fibre Reinforced Polymers, w skrócie FRP). Terminem tym określa się materiały kompozytowe z tworzyw sztucznych zbrojone różnego rodzaju włóknami. Najczęściej są to włókna węglowe, szklane lub aramidowe. Ze względu na szereg korzystnych właściwości znajdują one coraz szersze praktyczne zastosowanie, w tym także i w budownictwie mostowym.

Ustanowienie normy europejskiej EN 13706 dotyczącej wytwarzania kompozytów polimerowych metodą pultruzji umożliwiło opracowanie nowych rozwiązań technologicznych, metod projektowania i montażu elementów nośnych konstrukcji mostowych. Proponowane rozwiązania technologiczne zapewniają między innymi:

- niższe koszty budowy związane z prefabrykacją oraz małym ciężarem elementów,
- niższe koszty utrzymania i konserwacji obiektów w czasie eksploatacji (powierzchnie elementów nie korodują i nie wymagają malowania),
- dzięki skróceniu czasu montażu, mniejsze zakłócenia w ruchu transportowym.

W opracowanym systemie technologiczno-konstrukcyjnym Trans-IND przyjmuje się, że montaż elementów kompozytowych odbywa się na wykonanych podpo-

rach żelbetowych z łożyskami. W systemie tym struktura podziału prac obejmuje:

1. Transport belek z wytwórni na miejsce montażu.
2. Montaż belek.
3. Transport łączników mechanicznych i żywicy przeznaczonej do połączeń na miejsce wbudowania.
4. Transport modułowych pomostów kompozytowych na miejscu wbudowania.
5. Wypoziomowanie i połączenie pomostów.
6. Połączenie pomostów i belek.
7. Wykonanie wylewki betonowej na powierzchni pomostów.
8. Wykonanie nawierzchni z asfaltu twardo lanego.
9. Montaż wyposażenia mostu (bariery).

Na rysunkach 1–3, przedstawiono pewne fazy budowy mostu z wykorzystaniem elementów kompozytowych. W opracowaniach [5] został, między innymi, opisany problem harmonogramowania prac budowlanych obiektu mostowego, w tym i montażu dźwigarów. Przedstawiono opis zagadnienia wraz z uwarunkowaniami organizacyjno-technicznymi, podstawy teoretyczne budowy modelu, konstrukcję algorytmu opartego na metodzie przeszukiwania z tabu oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych. Na podstawie wy-



Rys. 1. Koncepcja mostu kompozytowego (oprac. BSiR Mostostal SA)

znaczanego przez algorytm harmonogramu montażu dźwigarów są wyznaczane okna czasowe, tj. najwcześniejsze i najpóźniejsze żądane terminy dostawy poszczególnych dźwigarów. Na ich bazie jest wyznaczany optymalny (lub prawie optymalny) harmonogram transportu z miejsca prefabrykacji na plac budowy. Poniżej przedstawiamy model tego zagadnienia oraz metodę jego rozwiązania.

2. Problem transportu dźwigarów

Jednym z ważnych zagadnień procesu realizacji obiektu mostowego, z zastosowaniem elementów nośnych wykonanych z kompozytów, jest transport i montaż



Rys. 2. Schemat belek i płyty pomostowej (oprac. BSiR Mostostal SA)



Rys. 3. Schemat montażu belek kompozytowych (oprac. BSiR Mostostal SA)

dźwigarów mostowych. Na podstawie opracowanego i uzgodnionego ze wszystkimi uczestnikami (podwykonawcami) harmonogramu prowadzenia prac budowlanych zostają ustalone terminy oraz kolejność dostawy dźwigarów (zgodnie z porządkiem technologicznym). Podstawowym założeniem w opracowywanej metodologii jest szczególnie warunek logistyczny, tj. montaż i transport w systemie JIT. Nie ma więc możliwości składowania dźwigarów na placu budowy (ewentualnie, jedynie na pojazdach). Wobec tego dźwigary są bezpośrednio z pojazdów umieszczane na podporach. Problem optymalnego transportu dźwigarów (w skrócie problem TD) polega na ustaleniu takich terminów dostawy dźwigarów, aby zminimalizować przyjęte kryterium (np. kosztów niedotrzymania terminów dostawy, liczbę niezbędnych pojazdów itp.). Muszą być przy tym spełnione następujące ograniczenia:

- (a) dźwigary należy dostarczać zgodnie z kolejnością montażu (porządkiem technologicznym),
- (b) jednocześnie pojazd może przewozić tylko jeden dźwigar (lub partię dźwigarów),

(c) po załadunku, dźwigar może być zdjęty jedynie bezpośrednio przed montażem.

W dalszej części przedstawiamy pewne warianty problemu transportu dźwigarów. Obszerny ich opis został zamieszczony w Raportach Politechniki Wrocławskiej [5] oraz częściowo w pracach [2], [3] i [6].

2.1. Transport z najwcześniejszymi i najpóźniejszymi terminami dostaw

Przyjmujemy, że na podstawie czasów wykonywania prac oraz wymogów technologii został wyznaczony szczegółowy harmonogram prowadzenia robót budowlano-montażowych. Zawiera on między innymi terminy rozpoczęcia oraz zakończenia montażu dźwigarów. Na tej podstawie są wyznaczane najwcześniejsze oraz najpóźniejsze możliwe terminy dostawy poszczególnych dźwigarów (uwzględniające także porządek technologiczny). Przy wyznaczaniu najpóźniejszego terminu dostawy należy uwzględnić czas rozładunku, dzięki czemu rozpoczęcie montażu dźwigara może nastąpić zgodnie z przyjętym harmonogramem. Zaleca się ponadto wprowadzenie niewielkiego buforu czasowego, uwzględniając w ten sposób mogące się ewentualnie pojawić niewielkie komplikacje. Najwcześniejsze terminy dostawy wynikają z przyjętego założenia, że dźwigary nie mogą być składowane na placu budowy. W związku z tym, przybyły wcześniej pojazd nie może być przed tym terminem rozładowany. Najwcześniejszy i najpóźniejszy termin dostawy tworzą tzw. okno czasowe. Jest to przedział czasowy, w którym dostawa nie generuje dodatkowych kosztów. Poniżej przedstawiamy model matematyczny omawianego zagadnienia.

Niech:

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$$

będzie zbiorem dźwigarów przewidzianych do montażu, które należy dostarczyć z miejsca prefabrykacji na plac budowy. Dla dowolnego dźwigara $B_i \in B$ wprowadzamy oznaczenia:

z_i – czas załadunku,

t_i – czas transportu na plac budowy,

r_i – czas rozładunku na placu budowy,

p_i – czas powrotu (czas przejazdu z placu budowy do miejsca prefabrykacji),

e_i – żądany najwcześniejszy termin przywozu na plac budowy,

d_i – żądany najpóźniejszy termin przywozu na plac budowy,

v_i – współczynnik funkcji kary za zbyt wczesne przybycie na plac budowy,

w_i – współczynnik funkcji kary za zbyt późne przybycie na plac budowy.

Na podstawie harmonogramu prowadzenia prac budowlano-montażowych wyznaczono kolejność montażu dźwigarów (dostawy na plac budowy). Dla ustalenia uwagi przyjmujemy, że jest to kolejność (B_1, B_2, \dots, B_m) .

Zakładamy ponadto, że załadunek pierwszego dźwigara rozpoczyna się w chwili 0.

Przez S_i oznaczamy termin dostarczenia dźwigara B_i na plac budowy. Terminy S_1, S_2, \dots, S_m muszą spełniać następujące ograniczenia:

- (i) $S_i \geq z_i + t_i$
- (ii) $S_{i+1} \geq S_i \quad i = 1, 2, \dots, m-1$
- (iii) $\forall B_p, B_j \in B, S_i - r_i - t_i - z_i \geq S_j - r_j - t_j - z_j$ lub $S_j - r_j - t_j - z_j \geq S_i - r_i - t_i - z_i$
- (iv) $S_{i+1} \geq S_i + r_i + p_i + z_{i+1} + t_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, m-1$

W sformułowaniu tym ograniczenie (ii) jest matematycznym zapisem ograniczenia (a), (iii) odpowiada ograniczeniu (b), a (iv) ograniczeniu (c). Natomiast z ograniczenia (i) wynika, że załadunek pierwszego dźwigara B_1 rozpoczyna się w chwili 0.

Gdyby transport i montaż odbywały się w sposób ciągły, wówczas termin dostarczenia dźwigara B_j jest równy

$$S_i = \sum_{j=1}^i (z_j + t_j + r_j + p_j) + z_i + t_i$$

Problem transportu dźwigarów sprowadza się więc do wyznaczenia terminów dostaw S_1, S_2, \dots, S_m spełniających ograniczenia (i)-(iv), które optymalizują pewne przyjęte kryterium optymalizacyjne. W systemie JIT jest to zazwyczaj minimalizacja: liczby nieterminowych dostaw, sumy kar za nieterminowe dostawy, maksymalnej nieterminowości itp.

2.2. Transport dokładnie na czas jednym pojazdem

W tym rozdziale zakładamy, że wszystkie dźwigary są transportowane na plac budowy przez jeden pojazd. Niech (S_1, S_2, \dots, S_m) będzie ciągiem dopuszczalnych terminów dostarczania dźwigarów (tj. spełniającym ograniczenia (i)-(iv)). Wówczas:

$$E_i = \max \{0, e_i - S_i\}$$

jest przyspieszeniem, a

$$T_i = \max \{0, S_i - d_i\}$$

spóźnieniem dostawy dźwigara $B_i \in B$ na plac budowy (gdzie e_i oraz d_i są odpowiednio najwcześniejszym i najpóźniejszym żądanym terminem przywozu). Wielkości $u_i E_i$ oraz $w_i T_i$ są odpowiednio karą za przyspieszenie lub spóźnienie dostawy.

Problem transportu dźwigarów dokładnie na czas jednym pojazdem (w skrócie oznaczany przez TJD) polega na wyznaczeniu dopuszczalnego ciągu terminów dostaw $S = (S_1, S_2, \dots, S_m)$, dla którego funkcja celu (kryterium optymalizacyjne)

$$F(S) = \sum_{i=1}^m (u_i E_i + w_i T_i) \tag{1}$$

osiąga wartość minimalną.

Rozpatrywane zagadnienie polega więc na minimalizacji sumy kar za nieterminowy dowóz dźwigarów, tj. poza ustalonymi oknami czasowymi dla poszczególnych dźwi-

garów. Można pokazać, że w szczególnym przypadku (tj. przy pewnych dodatkowych założeniach) problem TJD jest równoważny silnie *NP-trudnemu* jednomaszynowemu problemowi szeregowania zadań na jednej maszynie z przebrojeniami (oznaczanemu w literaturze przez $1|e_p, d_i|\Sigma (u_i E_i + w_i T_i)$ (zobacz prace [5] i [6]). Wobec tego problem ten należy także do klasy problemów silnie *NP-trudnych*. Dlatego też do jego rozwiązywania stosujemy szybki algorytm przybliżony, o wielomianowej złożoności obliczeniowej, oparty na metodzie przeszukiwania z tabu.

2.3. Transport dokładnie na czas wieloma pojazdami

W tym rozdziale rozpatrujemy problem transportu dźwigarów, w którym mamy do dyspozycji wiele pojazdów. Niech η będzie liczbą pojazdów. Każdy z nich może przewozić dowolny dźwigar (lub partę dźwigarów). W tym przypadku problem optymalnego transportu dźwigarów sprowadza się do na ustaleniu takich terminów dostawy poszczególnych dźwigarów, aby zminimalizować przyjęte kryterium. Oprócz zamieszczonych w Rozdziale 2 ograniczeń (a)-(c) należy dodatkowo przyjąć, że:

(d) każdy dźwigar może być transportowany tylko przez jeden pojazd.

Wprowadzamy zmienne decyzyjne:

$$x_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{gdy } i\text{-ty dźwigar jest transportowany} \\ & \text{przez } j\text{-ty pojazd} \\ 1, & \text{w przeciwnym przypadku,} \end{cases}$$

dla $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, \eta$.

Wówczas, odpowiednikiem ograniczenia (d) w modelu matematycznym (i)-(iv) (przedstawionym w Rozdziale 2) są zależności:

$$(v) \sum_{i=1}^l x_{i,j} = 1 \quad \text{dla każdego } j = 1, 2, \dots, \eta.$$

Problem transportu dźwigarów dokładnie na czas (w skrócie oznaczany przez TDW) przy użyciu η pojazdów polega na wyznaczeniu ciągu terminów dostaw S_1, S_2, \dots, S_m oraz zmiennych $x_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, \eta$) spełniających ograniczenia (i)-(v), dla których funkcja celu osiąga wartość optymalną.

Podobnie jak w Rozdziale 2 będziemy minimalizowali sumę kar za nieterminowość dostaw dźwigarów, czyli funkcję

$$\Phi(S, X) = \sum_{i=1}^n (u_i E_i + w_i T_i) \quad (2)$$

gdzie $X = [x_{i,j}]_{i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,\eta}$

Można pokazać, że problem TDW (podobnie jak TDJ) należy do klasy problemów silnie *NP-trudnych*. Stąd, do jego rozwiązania będą stosowane algorytmy aproksymacyjne.

Rozpatrywane w tym rozdziale funkcje celu ((1) i (2)) są kryteriami nieregularnymi. Obecnie są one trakto-

wane jako podstawowe dla systemów realizowanych w strategii JIT, w której zachodzi potrzeba precyzyjnego dostarczania elementów. Powoduje to jednak, że należą one do klasy najtrudniejszych z rozpatrywanych w literaturze. Stosowanie w tym przypadku, w konstrukcjach algorytmów znanych własności problemów optymalizacji dyskretnej jest zazwyczaj mało efektywne. Skuteczne są jedynie metody dedykowane – silne wykorzystujące specyficzne własności problemu.

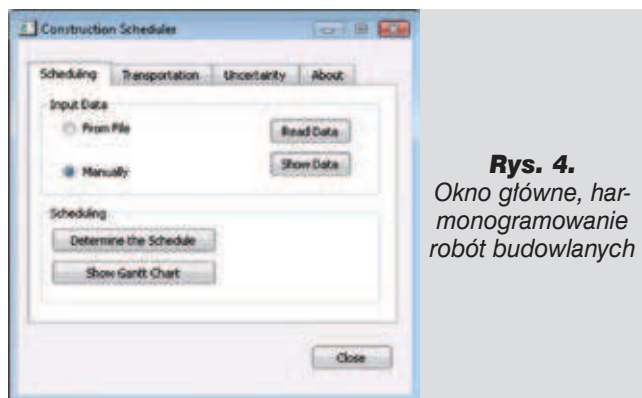
3. System wspomagania harmonogramowania transportu i montażu elementów kompozytowych

System wspomagający harmonogramowanie transportu i montażu prefabrykowanych elementów kompozytowych konstrukcji mostu został napisany w języku C++ na platformie Microsoft Windows. Składa się z trzech zasadniczych modułów harmonogramowania:

1. Prac budowlanych.
2. Transportu.
3. Prac i transportu w warunkach niepewności.

W dalszej części tego rozdziału przedstawiamy jedynie pewne wybrane elementy poszczególnych modułów systemu.

Po uruchomieniu systemu jest wyświetlane na ekranie okno główne zawierające poszczególne opcje systemu: Scheduling, Transportation, Uncertainty oraz About. Na rysunku 4 przedstawiono to okno, po rozwinięciu opcji szeregowanie prac budowlanych (Scheduling).



Rys. 4.
Okno główne, harmonogramowanie robót budowlanych

3.1. Harmonogramowanie prac budowlanych

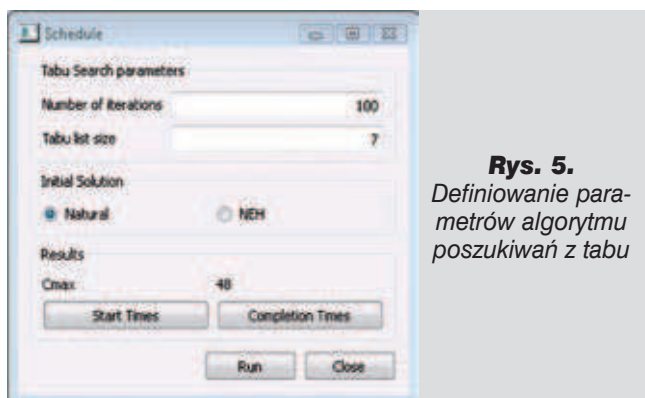
Dane niezbędne do harmonogramowania robót budowlanych (Input Data) mogą być wprowadzone z wcześniej przygotowanego pliku (From File) lub bezpośrednio z klawiatury (Manually). Istnieje także możliwość wielokrotnego poprawiania (modyfikacji) danych i ich zapisu do pliku.

Po wprowadzeniu danych wejściowych można przystąpić do wyznaczenia harmonogramu robót budowlanych (opcja Scheduling). Wyświetlane jest okno (rys. 5) umożliwiające wybór parametrów procedury szeregującej roboty budowlane. W procedurze zastosowano algorytm oparty na metodzie przeszukiwania

z tabu (ang. tabu search), którego krótki opis zamieszczono w pracy [3], a obszerny w [6]. Przed uruchomieniem (RUN) należy ustalić:

1. Tabu Search parameters – parametry algorytmu:
 - a) Number of iterations – liczba iteracji algorytmu,
 - b) Tabu list size – długość listy tabu.
2. Initial Solution – rozwiązanie startowe algorytmu:
 - a) Natural – naturalna kolejność robót (tj. zgodna z kolejnością wprowadzania),
 - b) NEH – kolejność wyznaczona przez algorytm konstrukcyjny NEH, [4].

Po zakończeniu działania algorytmu w oknie (rys. 5) jest wyświetlana wartość funkcji celu (C_{max}), tj. termin zakończenia wszystkich prac (począwszy od startu w chwili 0).



Rys. 5.
Definiowanie parametrów algorytmu poszukiwań z tabu

Wyniki działania algorytmu wyznaczającego harmonogram dla przedsięwzięcia budowlanego mogą być prezentowane w formie terminów rozpoczęcia (Start Times) lub zakończenia (Completion Times) wykonywania poszczególnych robót budowlanych (przykładowe wyniki są przedstawione na rysunkach 6 i 7).

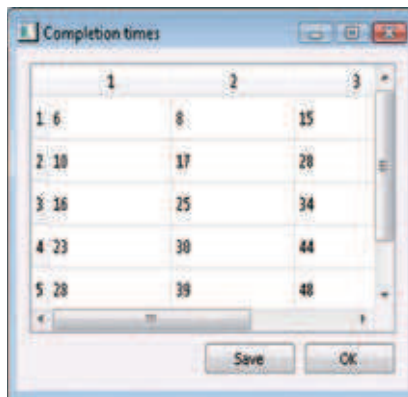
Istnieje także możliwość przedstawienia harmonogramu w postaci wykresu Gantt'a. W oknie głównym (rys. 4) należy wybrać opcję Show Gantt Chart. Przykładowy diagram został przedstawiony na rysunku 8.

3.2. Harmonogramowanie transportu

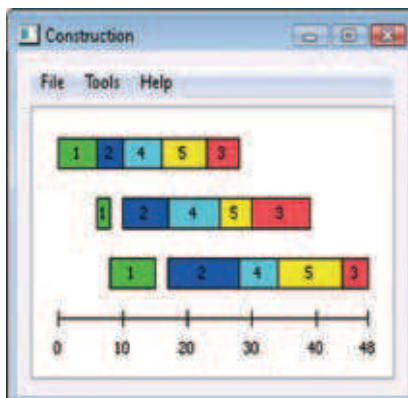
Moduł harmonogramowania transportu umożliwia wyznaczenie terminów dostaw dźwigarów na plac budowy. Terminy te są ustalane na podstawie harmonogramu



Rys. 6.
Przykładowe terminy rozpoczęcia wykonywania poszczególnych robót



Rys. 7.
Przykładowe terminy zakończenia wykonywania poszczególnych robót



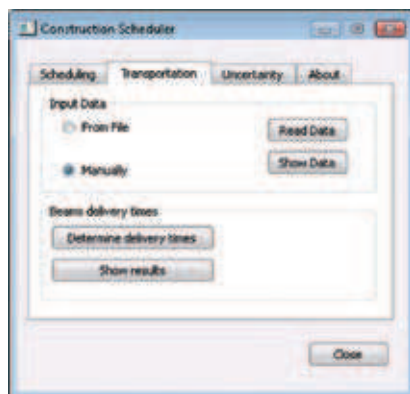
Rys. 8.
Przykładowy harmonogram w formie wykresu Gantt'a

prac budowlanych, wyznaczonego w module Scheduling. Dla każdego dźwigara ustalane jest okno czasowe (najwcześniejszy i najpóźniejszy termin), w którym należy go dostarczyć na budowę. Podstawy teoretyczne problemu transportu przedstawiono w rozdziale 2. Do jego rozwiązania zastosowano algorytm oparty na metodzie przeszukiwania z tabu [3]. Montaż dźwigarów odbywa się w systemie JIT, więc jako kryterium optymalizacyjne przyjęto minimalizację sumy kar za nieterminowość dostaw (1) lub (2).

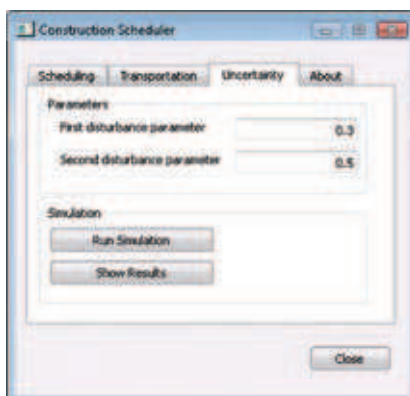
Po wyborze opcji Transportation z okna głównego systemu (rys. 4) są wyświetlane poszczególne opcje tego modułu umożliwiające, między innymi, wprowadzanie i poprawianie danych (dokładnie zostały one opisane w poprzednim rozdziale). Parametry niezbędne przy wyznaczaniu harmonogramu dostaw dźwigarów na plac budowy mogą być wprowadzone ręcznie lub czytane z pliku tekstowego. Okno modułu harmonogramowania transportu belek zostało przedstawione na rysunku 9.

3.3. Harmonogramowanie w warunkach niepewności

Niepewne parametry procesu (np. czasy wykonywania robót, transportu itp.) są modelowane przez trzy punktowe liczby rozmyte. Przykład takiego podejścia, dla pewnego problemu potokowego, przedstawiono w pracy [1], [3] (w pracy [1] przedstawiono także podejście probabilistyczne). Po uruchomieniu opcji Transportation (rys. 4) jest wyświetlane okno przedstawione na rysunku 10. Korzystając z opcji: First di-



Rys. 9.
Okno harmonogramowania transportu belek



Rys. 10.
Okno harmonogramowania w warunkach niepewności

stubance parameter oraz Second disturbance ustala się parametry liczb rozmytych. Harmonogramy (prowadzenia prac budowlanych oraz transportu belek) są wyznaczane przez algorytm przeszukiwania z tabu. Opis parametrów jego uruchamiania oraz prezentację uzyskanych wyników zostały opisane w rozdziale 3.1. i 3.2.

Poszczególne moduły, a szczególnie algorytmy optymalizacyjne, testowano na przykładach wziętych z praktyki budowlanej oraz z literatury. Wyniki eksperymentów były w pełni zadowalające. W krótkim czasie (maksymalnie kilka sekund) otrzymano rozwiązania optymal-

ne lub niewiele różniące się od optymalnych (średni błąd względny, dla dużego zbioru przykładów z literatury, nie przekraczał 3%).

4. Podsumowanie

Przedstawiony w pracy system wspomagający harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych dostarcza prostego w obsłudze graficznego interfejsu użytkownika. Niezbędne dane mogą być wprowadzone ręcznie lub z pliku tekstowego. Pozwala to na szybkie wyznaczanie rozwiązań dla problemów o różnych rozmiarach i parametrach. Otrzymane wyniki są prezentowane w formie graficznej (wykres Gantt'a) lub tekstowej (tabele terminów rozpoczęcia i zakończenia wykonywania poszczególnych robót). Wyniki mogą być także zostać zapisane na dysk, w formie pliku PNG (wykres Gantt'a) lub pliku tekstowego (terminy rozpoczęcia/zakończenia). Zastosowanie szybkiego algorytmu przybliżonego do harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych pozwala na uzyskanie rozwiązań o wysokiej jakości (w sensie wartości funkcji celu), w krótkim czasie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bożejko W., Hajducki Z., Rajba P., Wodecki M., Project management in building process with uncertain tasks Times, Management and Production Engineering Review, vol. 2, 2011, 3–9
- [2] Bożejko W., A new class of parallel scheduling algorithms, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2010, 1–280
- [3] Rogalska M., Bożejko W., Hajducki Z., Wodecki M., Harmonogramowanie robót budowlanych z zastosowaniem algorytmu tabu search z rozmytymi czasami wykonywania zadań, Przegląd Budowlany, Nr 7–8, 2009, 76–80
- [4] Nawaz M., Ensore Jr. E., Ham, I., A heuristic algorithm for the m-machine n-job flow-shop sequencing problem. Omega. The International Journal of Management Science, vol. 11, 1983, 91–95
- [5] Raporty, Serii SPR 1,2,3/2011, Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Projekt badawczy pt. „Koncepcja modelowego zintegrowanego procesu transportu i montażu elementów obiektu mostowego”, zlecenie nr 602565 w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 2011
- [6] Wodecki M., Metody agregacji w problemach optymalizacji dyskretnej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2009

Prenumerata 239,40 zł
ulgowo tylko 119,70 zł

www.przegladbudowlany.pl