

Optimalizacja procesu transportu w dystrybucji mieszanki betonowej

Sławomir Biruk¹, Michał Tomczak²

^{1,2} *Katedra Inżynierii Procesów Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Lubelska, e-mail: ¹s.biruk@pollub.pl, ²m.tomczak@pollub.pl*

Streszczenie: Wiele wytwórni mieszanek betonowych często posiada nowoczesne węzły betoniarskie o wysokiej wydajności, które zapewniają dobrą jakość produkcji. Przedsiębiorstwa te dysponują także flotami nowoczesnych betonowozów. Pomimo tego, niezwykle rzadko zdarza się, aby wytwórnie posiadały programy wspomagające podejmowanie decyzji przy planowaniu tras przejazdowych betonowozów oraz harmonogramowaniu produkcji mieszanki. Najczęściej decyzje te podejmują dyspozytorzy polegając jedynie na swoim doświadczeniu. W artykule scharakteryzowano problem zintegrowanego harmonogramowania produkcji mieszanki betonowej i marszrutyzacji betonowozów oraz opracowano model matematyczny mający na celu optymalizację procesu transportu mieszanki betonowej. Implementacja komputerowa modelu i jego wdrożenie może prowadzić do obsługi większej liczby zleceń, zwiększenia stopnia wykorzystania posiadanego potencjału produkcyjnego oraz stopnia zadowolenia zamawiających, a w konsekwencji do osiągnięcia przewagi konkurencyjnej na trudnym rynku produkcji mieszanek betonowych.

Słowa kluczowe: dystrybucja mieszanki betonowej, marszrutyzacja, modelowanie matematyczne, programowanie liniowe

1. Wprowadzenie

Beton towarowy jest podstawowym materiałem wykorzystywanym do wznoszenia konstrukcji budowlanych. Jest stosowany we wszystkich elementach konstrukcyjnych obiektu budowlanego, od fundamentów aż po przykrycia dachowe. Współcześnie 60-70% wznoszonych obiektów budowlanych to konstrukcje betonowe [1], a według szacunków Stowarzyszenia Producentów Betonu Towarowego produkcja tego materiału w Polsce w roku 2012 wyniosła 20,10 mln m³ [2], co świadczy o znaczeniu i popularności tego materiału.

Ze względu na rosnące wymagania odnośnie jakości oraz dążenie do uzyskania specjalnych właściwości betonu, mieszanki betonowe są wytwarzane w wyspecjalizowanych zakładach, w warunkach o charakterze przemysłowym. Mieszanka betonowa jest dostarczana z betonowni na budowy specjalnie przystosowanymi do tego środkami transportu dalekiego – mieszalnikami na podwoziach samochodowych, nazywanych także betonowozami. Pomimo wielu zalet takiego rozwiązania, istnieje problem dystrybucji mieszanki wynikający z ograniczonego czasu transportu. Czas ten w zależności od składu, użytych domieszek wynosi od kilkudziesięciu minut do paru godzin. Dodatkowo jest wymagana ciągłość procesu betonowania elementów konstrukcji, aby w dojrzałym betonie nie pojawiły się niekontrolowane przerwy robocze, obniżające jakość i wytrzymałość elementów betonowych. Wymagania te niosą za sobą konieczność sprawnego planowania produkcji mieszanki betonowej oraz związanej z nią obsługi placu budowy.

Obecnie większość wytwórni mieszanek betonowych posiada nowoczesny, w pełni zautomatyzowany sprzęt do produkcji tego materiału, umożliwiający wytwarzanie wysokiej jakości mieszanki w bardzo krótkim czasie. Niestety zarządzanie obsługą zleceń (ustalanie terminów wyjazdów betonowozów i kolejności realizacji zamówień) jest oparte jedynie na doświadczeniu personelu [3]. Przedsiębiorstwa wytwarzające mieszankę betonową mają podobne koszty funkcjonowania oraz zakupu materiałów – efektywność dystrybucji staje się czynnikiem, który może decydować o przewadze konkurencyjnej na rynku [4]. Wysokie koszty transportu w stosunku do wartości przewożonego materiału powodują konieczność zwiększenia roli efektywnego zarządzania zintegrowanym systemem produkcji mieszanki betonowej i planowania terminów oraz tras betonowozów (marszrutyzacji) [4].

2. Charakterystyka procesu transportu mieszanki betonowej

Czas, jaki upływa od momentu przygotowania mieszanki do chwili jej wbudowania, powinien być krótszy od czasu wiązania betonu w danych warunkach [5]. Ograniczenie to wpływa na planowanie tras przewozowych i wymusza konieczność ustalenia harmonogramu produkcji mieszanki betonowej, tak aby w chwili zakończenia mieszania składników, kolejny betonowóz był gotowy do załadunku. Wytwórca powinien także starać się unikać sytuacji ustawienia się w kolejce zbyt wielu samochodów oczekujących na załadunek, co istotnie zmniejszyłoby stopień wykorzystania środków transportowych. Krótki czas przydatności do użycia mieszanki betonowej powoduje także ograniczenie potencjalnych odbiorców do tych, którzy są oddaleni od wytwórni mieszanki betonowej o maksymalnie półtorej godziny jazdy samochodem. Taka bariera intensyfikuje konkurowanie pomiędzy wytwórniami o ograniczoną liczbę zleceń [6].

Mieszanka betonowa jest wytwarzana według ustalonych receptur uwzględniających szczegółowe wymagania postawione przez zamawiającego. Skutkuje to tym, że załadowany betonowóz musi być kierowany na konkretną budowę. Dyspozytor nie ma możliwości zmiany miejsca przeznaczenia materiału (skierowania betonowozu na inną budowę).

Place budów położone w centrach miast często nie posiadają możliwości przyjęcia więcej niż jednego betonowozu ze względu na ograniczenia wielkości placu budowy i liczby maszyn transportu wewnętrznego. W tym wypadku, ze względu na zapewnienie ciągłości robót betonowych, jest konieczne staranne planowanie pracy wytwórni mieszanki betonowej i marszrut betonowozów. Szybkość układania i zagęszczania powinna być tak dostosowana, aby unikać przerw w betonowaniu [9].

W praktyce prowadzenia betonowni można wyróżnić dwa rodzaje zamówień na mieszankę betonową [6]. Pierwszym z nich są zamówienia, które są przyjmowane co najmniej dzień wcześniej od terminu realizacji. Drugą kategorią zamówień stanowią zlecenia przyjmowane w dniu realizacji. Występowanie tych zamówień komplikuje zarządzanie produkcją wytwórni mieszanek betonowych. Dyspozytor w krótkim czasie musi także podjąć decyzję o możliwości realizacji takiego zamówienia i zmianie ustalonego dzień wcześniej harmonogramu produkcji i transportu.

Zapotrzebowanie na mieszankę betonową nie jest równomierne w przeciągu całego dnia. W pracy [6] wskazano, że godziny szczytu występują od 9:30 do 11:30 oraz od 14:30 do 17:00. W pracach [7], [8] podano, że zwiększone zapotrzebowanie występuje od 7:00 do 9:00 oraz od 13:00 do 15:00. W godzinach szczytu szczególnie istotne jest dobre rozplanowanie produkcji mieszanki betonowej w celu zaspokojenia potrzeb odbiorców i przyjęcia jak największej liczby zleceń.

3. Modele optymalizacji procesu transportu mieszanki betonowej

Rozpatrywane zagadnienie optymalizacji procesu transportu mieszanki betonowej było wielokrotnie przedmiotem badań [3-5], [6-8], [10-14]. System zintegrowanego harmonogramowania produkcji mieszanki betonowej i marszrutyzacji betonowozów musi uwzględniać ograniczenia technologiczne wynikające z cech mieszanki betonowej i właściwości młodego betonu. Podnosi to trudność budowy i analizy modeli matematycznych, mających na celu optymalizację procesu transportu w dystrybucji mieszanki betonowej.

Orłowski [5] przedstawił metodykę doboru zestawu maszyn do transportu mieszanki betonowej. Zaproponował algorytm rozwiązania powyższego zagadnienia, który umożliwi ustalenie optymalnej kolejności załadunku betonowozów i minimalizuje koszt transportu mieszanki betonowej.

Matsatsinis [7] opracował system wspomagania decyzji w zarządzaniu dwoma rodzajami środków transportu: pomp samochodowych i betonowozów. Model został sformułowany jako wielomagazynowy problem dostaw z oknami czasowymi (ang. *multi-depot multi-vehicle routing problem with time windows*). Funkcja celu minimalizuje koszty funkcjonowania systemu, przy jednoczesnym wzmoczeniu poziomu obsługi klientów.

Feng i in. [6] przedstawili model oparty na algorytmie genetycznym oraz metodzie symulacji, służący zminimalizowaniu całkowitego czasu przebywania betonowozów w kolejce. W oparciu o ten algorytm zbudowano także program z przyjaznym dla użytkownika interfejsem, który usprawnił proces marszrutyzacji betoniarek samochodowych. Autorzy przedstawili również bardzo szczegółowo czynniki wpływające na harmonogramowanie przejazdów betonowozów.

Algorytm metaheurystyczny służący rozwiązaniu szczegółowego modelu dostaw mieszanki betonowej został także zaproponowany przez Naso i in. [8]. Model minimalizuje koszt procesu dystrybucji mieszanki betonowej, na który składają się koszty transportu, załadunku i rozładunku oraz koszty dodatkowe ponoszone na wynajem samochodów, nadgodziny dla pracowników itp. Model został zaprogramowany w środowisku Matlab i jego skuteczność wykazano na przykładzie jednej z holenderskich wytwórni mieszanek betonowych.

Asbach i in. [13] zaproponowali model dostaw mieszanki betonowej oparty na mieszanym programowaniu liniowym. Funkcja celu minimalizuje sumę kosztów transportowych oraz kar dla zamawiających za niewywiązanie się z dostaw. Ze względu na złożoność obliczeniową, model nie może być rozwiązywany przez większość komercyjnych programów przeznaczonych do rozwiązywania modeli mieszanego programowania liniowego, tzw. solverów. Stąd autorzy zaproponowali własny algorytm metaheurystyczny i dokonali oceny jego skuteczności.

Park i in. [12] stworzyli model obejmujący swym zakresem nie tylko proces produkcji i dostaw na budowę mieszanki betonowej, lecz także zaopatrzenie wytwórni w cement i kruszywa. Model ten został rozwiązany za pomocą zaadaptowanego do tego celu dynamicznego systemu symulacji ciągłej. Autorzy opracowali program komputerowy wspomagający zarządzanie pracą wytwórni mieszanki betonowej i następnie zastosowali go do optymalizacji pracy w jednej z singapurskich betonowni.

Yan i in. [3] przedstawili zintegrowany model łączący w jednej strukturze harmonogramowanie produkcji mieszanki betonowej z planowaniem tras przewozowych betoniarek samochodowych. Model bazuje na diagramie przestrzenno-czasowym, w którym wprowadzono pięć rodzajów łuków odwzorowujących pracę betonowni i betonowozów (przebieg samochodów, które w danym dniu nie będą wykorzystane z powodu małej liczby zleceń;

wykorzystanie środka transportowego; załadunek bądź oczekiwanie na niego przez betonowóz w wytwórni; przejazd samochodu na budowę, rozładunek betoniarki samochodowej oraz powrót do zakładu produkcyjnego; zakończenie pracy przez betonowóz i powrót do bazy). Następnie model ten został udoskonalony o dodatkowe ograniczenia realizacyjne: koszty wynikające z nadgodzin pracowników [14] oraz nieprzewidzianych wypadków na drodze [10].

Yan i in. [11] uwzględnili losowe czasy transportu mieszanki betonowej. Model marszrutyzacji został sformułowany jako problem przepływu w sieciach uogólnionych o zerojedynkowej przepustowości z ograniczeniami pomocniczymi (ang. *mixed integer network flow problem with side constraints*). Przydatność modelu oraz zaproponowanego algorytmu jego rozwiązania była weryfikowana metodami symulacji komputerowej.

Najczęściej przyjmowanymi celami optymalizacji pracy wytwórni mieszanki betonowej były: minimalizacja czasu pracy zakładu i budów, zwiększenie stopnia wykorzystania betonowozów oraz węzła betoniarskiego lub kosztów funkcjonowania betoniarni. Mimo dużej liczby prac dotyczących problemu optymalizacji pracy wytwórni mieszanek betonowych, nie udało się opracować modelu zintegrowanego harmonogramowania produkcji mieszanki betonowej i marszrutyzacji betonowozów uwzględniającego wszystkie ograniczenia realizacyjne. O możliwości stosowania modelu decyduje także jego złożoność obliczeniowa. Celem autorów było opracowanie modelu, który może być rozwiązywany za pomocą ogólnie dostępnych programów komputerowych tzw. solverów.

4. Model matematyczny pracy betonowni i marszrutyzacji betonowozów

Budowy k ($k=1, 2, \dots, m$) muszą złożyć zamówienie w dniu poprzedzającym dostawę, określając wielkość zamówienia z_k wyrażoną liczbą dostaw mieszanki betonowej (betonowozów) oraz planowany termin s_k (godzinę rozpoczęcia robót betoniarskich). Zadaniem dyspozytora jest zaplanowanie dostaw (rozdysponowanie dostępnych b betonowozów) w taki sposób, aby w jak najwyższym stopniu spełnić oczekiwania zamawiających i jednocześnie zapewnić jak najkrótszy czas pracy betonowni i budów oraz zapewnić ciągłość robót betonowych na poszczególnych budowach.

Zmiany w stanie systemu są rejestrowane w terminach T_i ($i=1, \dots, n$). Długość kroku czasowego $\Delta T = (T_{i+1} - T_i)$ jest najwygodniej przyjąć równą czasowi trwania najkrótszej operacji np. czasowi załadunku środka transportowego w betonowni, a następnie okres trwania innych operacji wyrazić jako wielokrotność długości tego kroku. Zmienna binarna x_{ik} przyjmuje wartość 1 jeżeli w terminie T_i jest planowany początek załadunku betonowozu kierowanego na budowę k . Cykl pracy p_k betonowozu dostarczającego mieszankę na budowę k składa się z załadunku (o czasie trwania równym liczbie l kroków czasowych), transportu na budowę (t_k kroków), rozładunku (d_k) i powrotu pustego środka transportowanego (u_k):

$$p_k = l + t_k + d_k + u_k \quad (1)$$

Terminy rozpoczęcia załadunku kolejnych betonowozów dostarczających mieszankę na budowę k tworzą ciąg zdarzeń $T_{1,k}, T_{2,k}, \dots, T_{z_k,k}$, ($k=1, 2, \dots, m$). Aby wyeliminować kolejki betonowozów na budowie, rozpoczęcie załadunku kolejnego betonowozu nie może rozpocząć się wcześniej niż wynosił termin rozpoczęcia załadunku poprzedniego powiększony o okres rozładunku na tej budowie. Oznacza to, że pomiędzy terminami dostaw na każdej budowie k musi wystąpić zależność:

$$T_{r,k} - T_{r-1,k} - d_k \geq 0 \quad (r = 2, 3, \dots, z_k, k = 1, 2, \dots, m). \quad (2)$$

Jednocześnie, w celu wyeliminowania niepożądanych przerw roboczych, czas upływający od zakończenia wyładunku poprzedniego betonowozu do rozpoczęcia wyładunku następnego, nie może przekroczyć czasu wiązania mieszanki betonowej t (w tym okresie musi się pojawić na budowie przynajmniej jeden środek transportowy), tzn. musi być spełniony dodatkowo warunek:

$$T_{r,k} - T_{r-1,k} - d_k \leq t \quad (r = 2, 3, \dots, z_k - 1, k = 1, 2, \dots, m). \quad (3)$$

Formuła (3) nie dotyczy ostatniej dostawy z_k kierowanej na budowę k .

Zależności (2) i (3) pozwalają na zdefiniowanie zbioru dopuszczalnych dostaw Δ_{Qik} na budowy w terminie T_i ze względu na eliminację kolejek na budowach. Oznacza to, że jeżeli dla budowy k rozpoczęto załadunek w terminie T_i to w momentach $T_{i+1}, T_{i+2}, \dots, T_{i+d_k-1}$ nie można dokonywać załadunku betonowozów na tę budowę. Natomiast w okresach $T_i, T_{i+1}, \dots, T_{i+t}$, musi zostać rozpoczęty przynajmniej jeden cykl transportowy na budowę k ze względu na zapewnienie ciągłości betonowania (jeśli jeszcze nie zostało zaspokojone zapotrzebowanie danej budowy). Te ciągi pozwalają na zdefiniowanie zbioru Δ_{Cik} dopuszczalnych terminów załadunku betonowozów ze względu na ciągłość betonowania.

Dodatkowo, dla każdego momentu T_i zdefiniowano zbiór wszystkich dopuszczalnych dostaw Δ_i (dla wszystkich budów), które mogłyby się rozpocząć przed terminem T_i i być realizowane w tym terminie. Są to cykle transportowe betonowozów, które potencjalnie rozpocząć się mogły w terminach:

$$(T_i - p_k - 1), (T_i - p_k - 2), \dots, T_i, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}. \quad (4)$$

Rozpoczęcie pracy betonowni można wyznaczyć ze wzoru:

$$s = \min_k \{s_k - l - t_k\}. \quad (5)$$

Zagadnienie polega na zaprojektowaniu takiego harmonogramu dostaw mieszanki betonowej, aby zminimalizować łączny czas pracy budów i betonowni, przy spełnieniu ograniczeń technologicznych. Zadanie to można zapisać w postaci:

$$\min : Z = \sum_{k=1}^b (f_k - s_k) + (f - s), \quad (6)$$

$$z_k = \sum_{i=1}^n x_{ik}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{ik} \leq 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (8)$$

$$\sum_{(i,k) \in \Delta_i} x_{ik} \leq b, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (9)$$

$$f_k \geq x_{ik} \cdot T_i + l + t_k + d_k, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (10)$$

$$f \geq f_k + u_k, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (11)$$

$$s \leq T_i \cdot x_{ik}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (12)$$

$$s_k \leq T_i \cdot x_{ik} + l + t_k, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (13)$$

$$\sum_{(i,k) \in \Delta Q_{ik}} x_{ik} \leq 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (14)$$

$$\sum_{(i,k) \in \Delta C_{ik}} x_{ik} - x_{ik} + M(1 - x_{ik}) \geq y_{ik}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (15)$$

$$y_{ik} - M(1 - x_{ik}) \geq \varepsilon \left(\sum_{(i,k) \in \Delta C_{ik}} x_{ik} - x_{ik} \right), \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (16)$$

$$x_{ik} \geq y_{ik}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ik} = z_k - 1, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (18)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (19)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (20)$$

gdzie:

y_{ik} – pomocnicza zmienna binarna,

f_k – zakończenie pracy budowy k ,

f – zakończenie pracy betonowni,

M – bardzo duża liczba,

ε – mała liczba z przedziału $[0, 1]$, np. $\varepsilon = 0,001$.

Funkcja celu (6) minimalizuje łączny czas pracy wszystkich budów oraz betonowni. Ograniczenie (7) jest warunkiem bilansowym dostaw dla budów i zapewnia, że na każdą budowę dostarczona zostanie zamówiona ilość mieszanki betonowej. Warunek (8) zapewnia, że w terminie i ładowany jest maksymalnie jeden betonowóz. Równanie (9) jest równaniem przepływu i sprawia, że w żadnej chwili liczba betonowozów nie przekracza liczby dostępnych środków transportowych. Zgodnie z warunkiem (10) są obliczane terminy zakończenia – a według (13) rozpoczęcia – prac betonowych dla poszczególnych budów. Koniec pracy betonowni następuje po powrocie ostatniego betonowozu – warunek (11). Rozpoczęcie pracy betonowni obliczone jest zgodnie z warunkiem (12). Ograniczenie (14) eliminuje kolejki betonowozów na budowach, a (15) – (18) zapobiegają występowaniu przerw roboczych, przy czym warunek ciągłości betonowania nie jest sprawdzany po zrealizowaniu ostatniej dostawy. Zmienne decyzyjne x_{ik} i y_{ik} są zmiennymi binarnymi – ograniczenie (19) oraz (20).

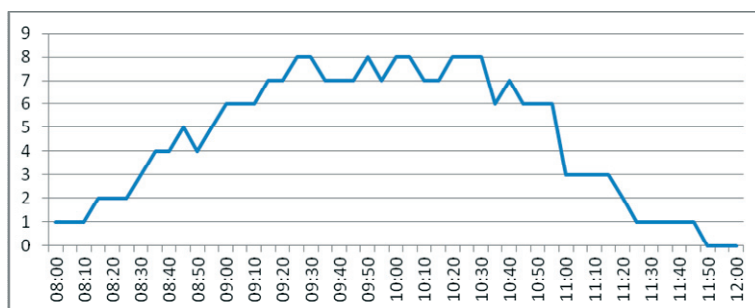
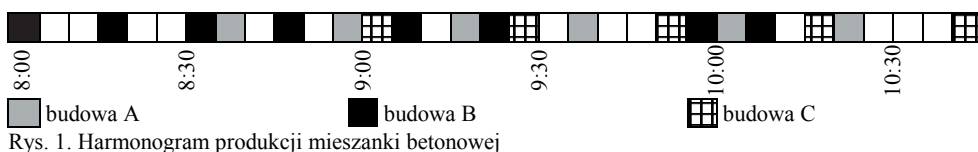
5. Przykład

Betonownia posiada flotę 8 betonowozów o pojemności 7 m^3 każdy. Jej węzeł betoniarski może produkować 84 m^3 mieszanki betonowej na godzinę. Dyspozytor przyjął trzy zamówienia (budowy A, B i C), których charakterystykę przedstawiono w tabeli 1. Czas wiązania betonu wynosi 30 minut. Należy ustalić harmonogram produkcji mieszanki betonowej o celu zminimalizowania łącznego czasu pracy budów i betonowni.

Tabela 1. Charakterystyka zamówień

Budowa	Czas przejazdu w jedną stronę [min]	Czas rozładunku [min]	Zapotrzebowanie [m ³]	Liczba dostaw	Termin rozpoczęcia pracy
A	15	20	40	6	8:50
B	15	15	50	8	8:20
C	20	25	30	5	9:25

Przykład rozwiązano za pomocą programu LINGO 12.0 Optimization Modelling Software [15]. Harmonogram produkcji mieszanki betonowej oraz wykres zatrudnienia samochodów przedstawiono na rysunkach nr 1 i nr 2.



6. Podsumowanie

Osiągnięcie właściwej jakości robót betonowych wymaga posiadania nowoczesnego wyposażenia do produkcji, transportu i układania mieszanki betonowej. Jakość i terminowość usług oferowanych przez producenta mieszanki betonowej może prowadzić do zwiększenia pozycji konkurencyjnej oraz szans na pozyskiwanie nowych zleceń. W artykule został zaproponowany model zintegrowanego harmonogramowania produkcji mieszanki betonowej i marszrutyzacji betonowozów. Opracowany model może stać się użytecznym narzędziem wspomagającym dyspozytorów w planowaniu tras przewozowych betonowozów. Stosowanie opracowanego modelu pozwala przyjąć większą liczbę zleceń oraz zwiększyć stopień wykorzystania mieszarek samochodowych.

Wyniki prac były finansowane z środków statutowych przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (S/63/2014).

Literatura

- 1 Ignatowski P. Realizacja żelbetowych konstrukcji nowoczesnych budynków użyteczności publicznej. Materiały Budowlane (2008),nr 6.
- 2 Podsumowanie rynku betonu towarowego w Polsce w 2012. Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce, Kraków 2013.

- 3 Yan S., Lai W., Chen M. Production scheduling and truck dispatching of ready mixed concrete. *Transportation Research. Part E* 44 (2008) 164-179.
- 4 Lin P. C., Wang J., Huang S. H., Wang Y. T. Dispatching ready mixed concrete trucks under demand postponement and weight limit regulation. *Automation in construction* 19 (2010) 798-807.
- 5 Orłowski Z. *Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- 6 Feng Ch. W., Cheng T. M., Wu H. T., Optimizing the schedule of dispatching RMC trucks through genetic algorithms. *Automation in Construction* 13 (2004) 327-340.
- 7 Matsatsinis N. F. Towards a decision support system for the ready concrete distribution system: A case of a Greek company. *European Journal of Operational Research* 152 (2004) 487-499.
- 8 Naso D., Surico M., Turchiano B., Kaymak U. Genetic algorithms for supply-chain scheduling: A case study in the distribution of ready mixed concrete. *European Journal of Operational Research* 177 (2007) 2069-2099.
- 9 PN-EN 13670:2011. *Wykonywanie konstrukcji z betonu*.
- 10 Yan S., Lin H. Ch., Liu Y.-Ch., Optimal schedule adjustments for supplying ready mixed concrete following incidents. *Automation in Construction* 20 (2011) 1041-1050.
- 11 Yan S., Lin H. C., Jiang X. Y., A planning model with a solution algorithm for ready mixed concrete production and truck dispatching under stochastic travel times. *Engineering Optimization* 44 (2012) 427-447.
- 12 Park M., Kim W. Y., Lee H. S., Han S., Supply chain model for ready mixed concrete. *Automation in Construction* 20 (2011) 44-55.
- 13 Asbach L., Dorndorf U., Pesh E., Analysis, modeling and solution of concrete delivery problem. *European Journal of Operational Research* 193 (2009) 820-835.
- 14 Yan S., Lai W., An optimal scheduling model for ready mixed concrete supply with overtime considerations. *Automation in Construction* 16 (2007) 734-744.
- 15 LINGO 14.0 - Optimization Modeling Software for Linear, Nonlinear, and Integer Programming. Lindo Systems (2014).

Transport optimization for ready-mix concrete distribution

Sławomir Biruk¹, Michał Tomczak²

^{1,2} *Department of Construction Project Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: ¹s.biruk@pollub.pl, ²m.tomczak@pollub.pl*

Abstract: Concrete batching plants are typically equipped with modern automated high-capacity systems and provide high quality products. The plants often dispose of fleets of concrete transport trucks. However, the plants rarely use decision support tools to plan transport routes and schedule production of the mix. The decisions in this respect base on experience of the staff. The paper investigates into the problems of integrated production scheduling and vehicle routing. A concept of mathematical model for vehicle routing optimization was proposed. If implemented, it is expected to improve plant operations so that more orders can be completed and the plant potential can be utilized more efficiently to the customer's satisfaction, offering the plant competitive advantage in this demanding business.

Keywords: Ready-mix concrete distribution, truck dispatching, vehicle routing problem, mathematical modelling, mixed linear programming