

TOMCZAK Michał<sup>1</sup>  
BUCOŃ Robert<sup>1</sup>

## Modelowanie procesów logistycznych w produkcji i dystrybucji mieszanki betonowej

### WSTĘP

W ostatnich dziesięcioleciach stosowanie logistyki przeobraziło się z fragmentarycznych działań do zintegrowanych operacji, mających na celu optymalizację przepływów fizycznych zasobów oraz informacji w ujęciu holistycznym w obrębie całego łańcucha dostaw [1], [2], [3]. Dziś logistykę definiuje się jako proces zarządzania łańcuchem dostaw, w ramach którego uwzględnia się źródła surowców i dostawców, politykę zakupu i gromadzenia surowców, przepływ materiałów wewnątrz łańcucha, przechowywanie wyrobów gotowych, dystrybucję, magazynowanie i transport [1], [3]. Wpływa ona na wydajność niemal każdej sfery działalności przedsiębiorstwa budowlanego, ogół jego polityki, a więc w wielu przypadkach jest podstawowym elementem działalności firmy decydującym o jego pozycji konkurencyjnej na wymagającym rynku [3], [4].

Jednym z krytycznych zagadnień logistycznych rozpatrywanych w ramach przedsięwzięć inwestycyjno-budowlanych jest zaopatrzenie placu budowy w mieszankę betonową. Wskutek coraz większych wymagań odnośnie jakości oraz dążenia do uzyskania specjalnych właściwości betonu, produkcja mieszanek betonowych jest realizowana w wyspecjalizowanych zakładach, w ustabilizowanych warunkach o charakterze przemysłowym [5]. Mieszanka betonowa jest transportowana z zakładu produkcyjnego na budowy specjalnie przystosowanymi do tego pojazdami – mieszalnikami na podwoziach samochodowych, nazywanych także betonowozami. Pomimo wielu silnych stron takiego rozwiązania, ten sposób zaopatrzenia w mieszankę betonową stwarza wiele problemów logistycznych [5]. Największy z nich wiąże się z krótkim czasem przydatności mieszanki, która w zależności od składu, użytych domieszek itp. musi zostać wykorzystana w ciągu od kilkudziesięciu minut do paru godzin od wyprodukowania. To powoduje, że mieszanka betonowa jest produktem nieskładalnym – takim, którego nie można wyprodukować „na zapas”. Dodatkowo, ze względów technologicznych, na placu budowy jest wymagana ciągłość procesu betonowania, aby w dojrzałym betonie nie pojawiły się przewarstwienia (ang. *cold joints*), obniżające jakość i wytrzymałość elementów betonowych. Warunki te niosą za sobą konieczność wydajnego planowania efektywnej produkcji mieszanki betonowej oraz zespolonej z nią obsługi placu budowy [5].

Współcześnie niemal wszystkie wytwórnie mieszanek betonowych dysponują nowoczesnymi, w pełni zautomatyzowanymi węzłami betoniarskimi, pozwalającymi na wytwarzanie wysokiej jakości produktu w bardzo krótkim czasie. Niestety, harmonogramowanie produkcji oraz ekspediowanie betonowozów nadal odbywa się ręcznie przez doświadczony personel [4], [5]. Ponieważ przedsiębiorstwa wytwarzające mieszankę betonową mają podobne koszty funkcjonowania oraz zakupu materiałów, efektywność dystrybucji staje się czynnikiem mogącym decydować o potencjalnym sukcesie bądź porażce na coraz bardziej konkurencyjnym rynku [6]. Niski współczynnik wartości do wagi przewożonego materiału zwiększa rolę racjonalnego i efektywnego zarządzania zintegrowanym systemem produkcji mieszanki betonowej i marszrutyżacji betonowozów [5], [6].

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury; 20-618 Lublin; ul. Nadbystrzycka 40. Tel. + 48 81-538-4441, m.tomczak@pollub.pl, r.bucon@pollub.pl

## 1 CECHY PROCESU TRANSPORTU MIESZANKI BETONOWEJ

W przypadku modelowania procesów logistycznych w dystrybucji mieszanki betonowej ogólny model zagadnienia planowania tras przewozowych należy uzupełnić o charakterystyczne ograniczenia, wynikające z reżimu technologicznego przy produkcji mieszanki. Wymagania te są dość specyficzne i znacząco podnoszą trudność sformułowania problemu optymalizacji procesu transportu w dystrybucji mieszanki betonowej.

### 1.1 Maksymalny czas transportu mieszanki betonowej

„Szczególnym wymogiem technologicznym jest czas transportu mieszanki betonowej. Czas, jaki upływa od momentu przygotowania mieszanki do chwili jej wbudowania, powinien być krótszy od czasu wiązania betonu w danych warunkach” [7]. Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206-1:2003 precyzuje: „Jeżeli dostawca z odbiorcą nie uzgodnią inaczej, to w przypadku mieszanki betonowej niezawierającej domieszek o działaniu opóźniającym, w temperaturze otoczenia nieprzekraczającej +20°C, betoniarki samochodowe należy całkowicie rozładować w czasie nie dłuższym niż 90 min, licząc od chwili pierwszego kontaktu wody z cementem” [8]. W Tabeli nr 1 przedstawiono maksymalny czas transportu mieszanki betonowej w zależności od jej temperatury oraz rodzaju środka transportowego [7].

Tab. 1. Maksymalny czas transportu mieszanki [7]

Temperatura mieszanki betonowej [°C]	Dopuszczalny czas transportu [min]	
	Rodzaj środka transportowego	
	Bez mieszadła	Z mieszadłem
5-10	70	120
10-20	50	90
20-25	30	60
25-30	20	30

Przytoczone powyżej wymagania i obostrzenia dotyczące maksymalnego czasu transportu mieszanki betonowej stanowią istotne utrudnienie przy planowaniu tras przewozowych, które determinują postać modelu procesu, jak i dobór metod jego rozwiązania.

### 1.2 Brak możliwości składowania wyprodukowanej mieszanki

Brak możliwości składowania mieszanki betonowej jest ściśle powiązany z jej krótkotrwałym czasem użycia. Wywołuje to konieczność ustalenia niezwykle precyzyjnego harmonogramu produkcji mieszanki betonowej, tak aby w chwili zakończenia mieszania składników, betonowóz był gotowy na załadunek. W przeciwnym wypadku producent może być narażony na poniesienie znacznych kosztów związanych z koniecznością zniszczenia przygotowanego produktu. Wytwórca powinien także starać się unikać sytuacji ustawienia się w kolejce zbyt wielu samochodów oczekujących na załadunek, co istotnie zmniejszyłoby stopień wykorzystania betoniarek. W takiej sytuacji przedsiębiorca musi nadal ponosić koszty stałe (np. wynagrodzenie pracowników), co pośrednio wpływa na koszty produkcji i jej rentowność.

Właściwe decyzje wpływają na efektywność ekonomiczną planowania produkcji mieszanki betonowej i marszrutyżacji betonowozów. Przedsiębiorstwa stosujące programy komputerowe wspomagające podejmowanie decyzji w porównaniu do wytwórni, które „ręcznie” zarządzają produkcją, mogą zwiększyć swoją przewagę konkurencyjną.

### 1.3 Indywidualny charakter każdego zamówienia

Mieszanka betonowa jest wytwarzana według ustalonych receptur uwzględniających szczególne wymagania postawione przez zamawiającego. Skutkuje to tym, że betoniarka samochodowa, która została obsłużona w betoniarni, musi dotrzeć na budowę, która została jej przypisana przy załadunku. W trakcie wykonywania zlecenia dyspozytor nie ma możliwości przekierowania samochodu na inny plac budowy.

#### 1.4 Dwa rodzaje zleceń

Praktyka prowadzenia zakładu produkcji mieszanki betonowej pokazuje, że możemy wyróżnić dwa rodzaje zamówień [9]. Pierwszym z nich są zamówienia, które są przyjmowane co najmniej dzień wcześniej niż ich realizacja. Drugą kategorią zamówień są zlecenia *last minute*, które są przyjmowane w dniu realizacji. Występowanie zamówień „z ostatniej chwili” mocno komplikuje zarządzanie produkcją wytwórni mieszanek betonowych. Dyspozytor w ciągu kilku minut musi zmienić ustalony dzień wcześniej harmonogram produkcji mieszanki betonowej i transportu betoniarek samochodowych. W krótkim czasie musi także zadecydować, czy istnieje możliwość realizacji zlecenia „z ostatniej chwili”, czy należy odmówić przyjęcia takiego zamówienia. Dyspozytorzy przede wszystkim chcą uniknąć przyjęcia zbyt dużej liczby zamówień. Podejmowanie decyzji jedynie w oparciu o doświadczenie dyspozytora może prowadzić do odrzucenia zbyt dużej liczby zamówień *last minute*.

#### 1.5 Godziny szczytu

Nasilenie liczby zamówień nie jest równomierne w ciągu całego dnia. Według [9] godziny szczytu występują od 9:30 do 11:30 oraz od 14:30 do 17:00. Natomiast [10] (a za nim także [11]) podaje, że godziny apogeum nasilenia ruchu pojawia się 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 *last minute*.

#### 1.6 Zabezpieczenie stwardniałego betonu przed pojawieniem się rozwarstwień

Prenorma europejska ENV 13670-1 Wykonywanie konstrukcji betonowych. Część 1: Uwagi ogólne podaje: „Szybkość układania i zagęszczania powinna być tak dostosowana, aby uniknąć tworzenia się zimnych złączy [...]”[12]. Celem niedopuszczenia pojawienia się rozwarstwień w stwardniałym betonie, znacznie obniżających jakość konstrukcji, należy zapewnić ciągłość betonowania. W przypadku wystąpienia przerwy w betonie zagęszczonym przez wibrowanie norma PN-63/B-06251 zaleca, aby „wznowienie betonowania rozpoczęło się nie później niż w ciągu 3 godzin, lub po całkowitym stwardnieniu betonu. Jeżeli temperatura powietrza jest wyższa niż 20°C, to czas trwania przerwy (ang. *cold joint time*) nie powinien przekraczać 2 godzin” [13].

## 2 DOTYCHCZASOWE MODELE PROCESÓW PRODUKCJI I DYSTRYBUCJI MIESZANKI BETONOWEJ

Rozpatrywane zagadnienie optymalizacji procesu transportu i produkcji mieszanki betonowej było wielokrotnie przedmiotem badań [4-7], [9-11], [14-28]. Autorzy tych prac uzupełnili klasyczne modele produkcji oraz planowania tras przewozowych o ograniczenia wymienione w punkcie 1. Uwzględnienie powyższych obostrzeń istotnie zwiększa złożoność modeli matematycznych.

W pracy [14] produkcja i dystrybucja mieszanki betonowej została przedstawiona jako system produkcji *just-in-time*. W artykule tym, obszernie została omówiona charakterystyka systemu produkcyjnego oraz cechy mieszanki wpływające na budowę łańcucha dostaw. Przedstawiono dwa alternatywne odwzorowania łańcucha dostaw. W pierwszym z nich, za transport mieszanki betonowej odpowiada zakład produkcyjny (jest to częściej występujący przypadek), natomiast w drugim – zleceńodawca zamówienia. Ma to miejsce zazwyczaj, gdy plac budowy jest usytuowany w centrum miasta co powoduje utrudnienia w ruchu pojazdów, prace odbywać się muszą w określonych godzinach, ze względu na utrudnienia dla mieszkańców (np. hałas), a na prowadzenie robót należy uzyskać dodatkowe pozwolenia (np. na zajęcie pasa ruchu drogowego).

Orłowski [7] przedstawił algorytm służący ustaleniu optymalnej kolejności załadunku mieszarek samochodowych. Celem algorytmu jest zminimalizowanie kosztów transportu mieszanki betonowej, a pośrednio także minimalizacja przestojów środków transportowych oraz maksymalizacja współczynnika wykorzystania czasu pracy betoniarek.

Biruk i Tomczak [5] omówili problem zintegrowanej marszrutyzacji betonowozów i harmonogramowania produkcji mieszanki betonowej oraz przedstawili model matematyczny procesu transportu mieszanki betonowej. Wdrożenie modelu może prowadzić do przyjęcia większej

liczby zleceń, lepszego wykorzystania posiadanego potencjału produkcyjnego, a w rezultacie do osiągnięcia przewagi konkurencyjnej na rynku mieszanek betonowych.

Matsatsinis [10] opracował system wspomagania decyzji przy planowaniu tras przewozowych różnych rodzajów betonowozów i pomp samochodowych. Problem sformułowano jako wielomagazynowy problem dostaw z oknami czasowymi (ang. *Multi-Depot Multi-Vehicle Routing Problem with Time Windows*). Funkcja celu modelu minimalizuje koszt dystrybucji mieszanki betonowej przy jednoczesnym wzroście poziomu obsługi.

Feng i in. [9] sformułowali model minimalizujący czas postoju betonowozów w kolejkach na budowach. Zadanie to zostało rozwiązane za pomocą algorytmu genetycznego i techniki symulacyjnej. Stworzono także program komputerowy z przyjaznym dla użytkownika interfejsem, wspomagający podejmowanie decyzji dyspozytorów pracujących w wytwórniach mieszanek betonowych. Dodatkowo autorzy gruntownie przeanalizowali czynniki wpływające na działanie systemów do planowania transportu i produkcji mieszanki betonowej.

Naso i in. [11] przedstawili szczegółowy model harmonogramowania produkcji mieszanki betonowej i planowania tras przewozowych betonowozów. Funkcja celu modelu minimalizuje całkowity koszt funkcjonowania systemu, który obejmuje koszty: transportu, załadunku, wyładunku, postoju w kolejkach oraz wynajem samochodów od zewnętrznej firmy. Model został rozwiązany za pomocą algorytmu genetycznego połączonego z heurystyką konstruktywną. System został zaimplementowany i przetestowany w holenderskiej wytwórni mieszanki betonowej.

Asbach i in. [15] zaproponowali liniowy model dostaw mieszanki betonowej, który niestety nie uwzględnia zmian zachodzących w ciągu dnia – przyjmowania nowych zamówień, przesunięcia okien czasowych, opóźnień w realizacji zamówień itd. Zadanie okazało się zbyt duże do rozwiązania za pomocą typowych solverów optymalizacyjnych, dlatego autorzy zaproponowali własny algorytm oparty na lokalnym przeszukiwaniu, a następnie dokonali jego oceny.

Lin i in. [6] sformułowali zagadnienie marszrutyzacji betonowozów jako problem gniazdowy (ang. *job shop problem*). W modelu zostały uwzględnione okna czasowe (okresy, w których musi być dostarczona mieszanka betonowa na budowy zgodnie z wymaganiami zamawiającego), koszt najmu dodatkowych samochodów w przypadku dużej liczby zamówień, czy opóźnienia wynikające np. z warunków atmosferycznych. Autorzy zastosowali model programowania wielokryterialnego. Celem głównym jest nie przekroczenie czasu dostawy, ze względu na wiązanie mieszanki betonowej, a celami drugorzędnymi ograniczenie liczby kursów betonowozów i wyrównanie stopnia wykorzystania poszczególnych mieszarek samochodowych.

Park i in. [16] stworzyli dynamiczny model symulacyjny obejmujący swym zakresem nie tylko produkcję i dystrybucję mieszanki betonowej, lecz również dostawy składników potrzebnych do jej wytworzenia: kruszyw grubych i drobnych oraz cementu. Symulacja została oparta na bazie danych uzyskanych z obserwacji pracy jednej z singapurskich wytwórni mieszanek, w której później wdrożono powyższy system.

Yan i in. [4] przedstawili zintegrowany model matematyczny planowania tras przewozowych betonowozów oraz harmonogramowania produkcji mieszanki betonowej, który został oparty na diagramie czasowo-przestrzennym. Celem modelu sformułowanego jako problem przepływu w sieciach uogólnionych o zero-jedynkowej przepustowości z ograniczeniami pomocniczymi (ang. *mixed integer network flow problem with side constraints*) jest minimalizacja kosztów. Przeprowadzono analizę wrażliwości wpływu poszczególnych czynników na ostateczny wynik za pomocą autorskiego programu połączonego z programem CPLEX 9.0. W kolejnych publikacjach model został rozbudowany o dodatkowe ograniczenia realizacyjne: stochastyczne czasy transportu mieszanki betonowej [17], konieczność ponoszenia nakładów finansowych wynikających z nadgodzin pracowników [18], koszty niespodziewanych wypadków na drodze [19].

Większość dotychczasowych modeli harmonogramowania mieszanki betonowej oraz planowanie tras przewozowych minimalizowały: koszt funkcjonowania systemu, długość kolejek w betonowni bądź na budowach, długość czasu pracy budów, czy stopień wykorzystania betonowozów. Żaden z modeli nie uwzględnia wszystkich ograniczeń wynikających z reżimu technologicznego produkcji mieszanek betonowych oraz organizacji pracy wytwórni. Zdecydowana większość przytoczonych

modeli jest bardzo złożona obliczeniowo. Celem pracy było stworzenie modelu uwzględniającego wszystkie ograniczenia technologiczne, który będzie można rozwiązać za pomocą powszechnie dostępnych programów optymalizacyjnych, tzw. solverów.

### 3 LINIOWY MODEL MATEMATYCZNY PRODUKCJI I DYSTRYBUCJI MIESZANKI BETONOWEJ

Problem zintegrowanego harmonogramowania mieszanki betonowej i marszrutyzacji betonowozów sformułowano jako model liniowy. Model ten minimalizuje terminy zakończenia pracy wszystkich budów, przy jednoczesnym zaspokojeniu ich zapotrzebowania. Ograniczeniami są: liczba dostępnych betonowozów, wydajność węzła betonowego, czas wiązania betonu, terminy otwarcia i zamknięcia okien czasowych budów. Wprowadzono następujące parametry w opisie matematycznym problemu:

- $t_z$  – czas załadunku jednego betonowozu,
- $t_{pk}$  – czas jazdy na budowę  $k$  (w jedną stronę),
- $t_{rk}$  – czas rozładunku na budowie  $k$ ,
- $N_1$  – zbiór terminów składających się na horyzont planowania, różnica pomiędzy dwoma kolejnymi terminami jest równa krokowi czasowemu,  $N_1 = \{1, \dots, n-1\}$ ,
- $N_0$  – dwuelementowy zbiór sztucznych terminów odpowiadający za wprowadzenie oraz wyprowadzenie wszystkich betonowozów z modelu,  $N_0 = \{0, n\}$ ,
- $N$  – zbiór wszystkich terminów,  $N = N_0 \cup N_1 = \{0, 1, \dots, n\}$ ,
- $K_0$  – jednoelementowy zbiór reprezentujący betonownię,  $K_0 = \{0\}$ ,
- $K_1$  – zbiór reprezentujący budowy,  $K_1 = \{1, \dots, m\}$ ,
- $K$  – zbiór betonowni i budów,  $K = K_0 \cup K_1 = \{0, 1, \dots, m\}$ ,
- $R_k$  – zbiór  $n-1$  par liczb  $(i, j)$  określających możliwe terminy rozpoczęcia załadunku/powrotu do betonowni (ponieważ model jest deterministyczny, dla danej budowy  $k$  i dla danego kroku czasowego  $i$  jest tylko jeden możliwy termin powrotu do betonowni  $j = i + t_z + 2 \cdot t_{pk} + t_{rk} - 1$ ),
- $b$  – liczba samochodów,
- $h$  – czas wiązania betonu,
- $c$  – czas załadunku wyrażony w liczbie okresów jednostkowych,
- $a_k$  – czas rozładunku wyrażony w liczbie okresów jednostkowych,
- $d_k$  – zapotrzebowanie budowy  $k$  wyrażone w liczbie wymaganych okresów,
- $T_i$  – termin odpowiadający okresowi jednostkowemu  $i$ ,
- $q_k$  – termin zamknięcia się okna czasowego budowy  $k$ ,
- $g_k$  – rozpoczęcie pracy budowy  $k$ , wyrażone w liczbie okresów jednostkowych,
- $B$  – dostatecznie duża liczba.

W modelu wykorzystano także następujące zmienne:

- $x_{ijk}$  – zmienna binarna, która jest równa 1 gdy samochód wyjechał w terminie  $i$  na budowę  $k$ , a powróci do betonowni w terminie  $j$  (0 – w przeciwnym wypadku), określona dla  $\forall i, j \in N_1, \forall k \in K_1$ ,
- $x_{ij0}$  – zmienna całkowitoliczbowa wyrażająca liczbę betonowozów oczekujących na załadunek w betonowni (może być kilka samochodów w kolejce), określana dla  $\forall i, j \in N, \forall k \in K_0$ ,
- $y_{ijk}$  – zmienna binarna pomagająca zamodelować warunek zapewnienia ciągłości betonowania,
- $f_k$  – zakończenie pracy budowy  $k$ .

Model matematyczny problemu ma następującą postać:

$$\min : Z = \sum_{k=1}^m f_k \quad (1)$$

przy ograniczeniach:

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^m x_{ijk} - \sum_{l=0}^n \sum_{k=0}^m x_{lik} = \begin{cases} b & i=0 \\ 0 & \forall i \in N_1 \\ -b & i=n, \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^m x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in N_1, \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in R_k} x_{ijk} \geq d_k \quad \forall k \in K_1, \quad (4)$$

$$f_k + t_{pk} \geq x_{ijk} \cdot T_j - B(1 - x_{ink}), \quad \forall i, j \in N_1, \forall k \in K_1, \quad (5)$$

$$f_k \leq q_k, \quad \forall k \in K_1, \quad (6)$$

$$\sum_{i=l}^{l+a_k-1} \sum_{j=l+t_z+2t_{pk}+t_{rk}-1}^{l+t_z+2t_{pk}+t_{rk}+a_k-2} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K_1, \forall l=1, 2, \dots, n-a_k-t_z-2 \cdot t_{pk}-t_{rk}+1, \quad (7)$$

$$\sum_{i=l}^{l+c-1} \sum_{j=l+t_z+2t_{pk}+t_{rk}-1}^{l+t_z+2t_{pk}+t_{rk}+c-2} \sum_{k=1}^m x_{ijk} \leq 1 \quad \forall l=1, 2, \dots, n-c-t_z-2 \cdot t_{pk}-t_{rk}+1, \quad (8)$$

$$g_k - t_z - t_{pk} \leq x_{ijk} \cdot T_i \quad \forall (i, j) \in R_k, \forall k \in K_1, \quad (9)$$

$$T_i \cdot x_{ijk} + h \geq T_v \cdot (x_{vjk} - y_{vjk}) \quad \forall i, j=1, \dots, n-h-1, \forall v=1, \dots, n \forall k \in K_1, \quad (10)$$

$$x_{ijk} \geq y_{ijk}, \quad \forall i, j \in N_1, \forall k \in K_1, \quad (11)$$

$$\sum_{(i,j) \in R_k} y_{ijk} = 1, \quad \forall k \in K_1, \quad (12)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N_1 \quad \forall k \in K_1, \quad (13)$$

$$x_{ij0} \geq 0, \quad \forall i, j \in N, \quad (14)$$

$$y_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N_1, \quad \forall k \in K_1. \quad (15)$$

Funkcja celu (1) minimalizuje sumę terminów zakończenia pracy budów (łącznie czas ich pracy). Równanie (2) jest równaniem przepływu i gwarantuje nie przekroczenie dostępnej liczby betonowozów. Warunek (3) zapewnia, że w terminie  $i$  ładowany jest maksymalnie jeden betonowóz. Równanie (4) zapewnia zaspokojenie zapotrzebowania każdej budowy. Zgodnie z warunkiem (5) są obliczane terminy zakończenia pracy wszystkich budów. Równanie (6) zapewnia zakończenie pracy budowy przed zamknięciem się okna czasowego. Ograniczenie (7) eliminuje kolejki na budowach, a (8) zapewnia nieprzekroczenie wydajności węzła betoniarskiego. Warunek (9) zapewnia rozpoczęcie pracy budowy  $k$  w ustalonym terminie. Równania (10)-(12) zapewniają ciągłość betonowania.

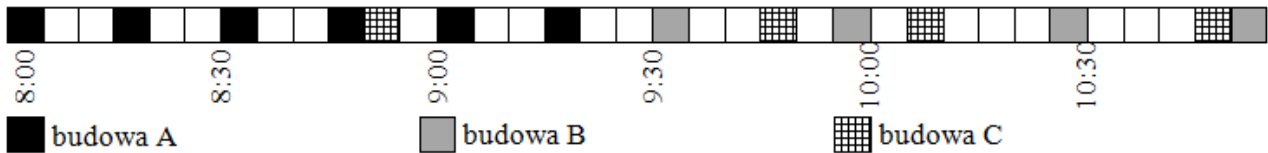
#### 4 PRZYKŁAD

Betonownia posiada flotę 4 betonowozów o pojemności 7 m<sup>3</sup> każdy. Jej węzeł betoniarski może produkować 84 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej na godzinę. Dyspozytor przyjął trzy zamówienia (budowy A, B i C), których charakterystykę przedstawiono w tabeli 2. Czas wiązania betonu wynosi 60 minut. Należy ustalić harmonogram produkcji mieszanki betonowej w celu zminimalizowania łącznego czasu pracy budów.

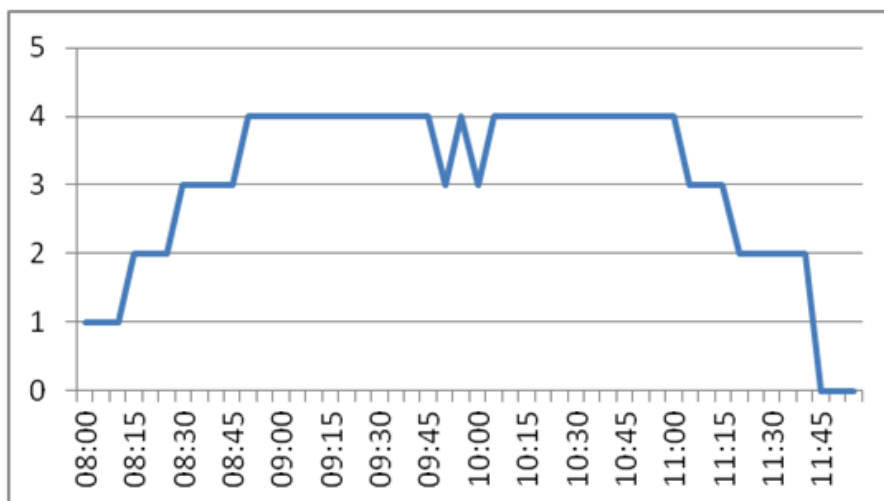
Tab. 2. Charakterystyka zamówień

Budowa	Czas przejazdu w jedną stronę [min]	Czas rozładunku [min]	Zapotrzebowanie [m <sup>3</sup> ]	Liczba dostaw	Termin rozpoczęcia pracy
A	15	15	40	6	8:15
B	15	25	25	4	9:15
C	20	20	28	4	8:50

Przykład rozwiązano za pomocą programu LPSolve IDE (wersja 5.1.0.0 z 1 Maja 2004, Michel Berkelaar, Kjell Eikland, Peter Notebaert GNU LGPL). Harmonogram produkcji mieszanki betonowej oraz wykres zapotrzebowania na mieszarki samochodowe przedstawiono na rysunkach nr 1 i nr 2.



Rys. 1. Harmonogram produkcji mieszanki betonowej



Rys. 2. Wykres zapotrzebowania na mieszarki samochodowe

## WNIOSKI

„To właśnie sprawność procesów logistycznych decyduje o produktywności, jakości robót budowlanych i osiągnięciu celów gospodarczych organizacji uczestniczących w przedsięwzięciach inwestycyjno-budowlanych” [2]. Zapewnienie odpowiedniej jakości robót betonowych wymaga nie tylko posiadania nowoczesnego wyposażenia do produkcji, transportu i układania mieszanki betonowej, lecz także systemów zapewniających właściwe wykorzystanie posiadanego potencjału produkcyjnego i należytą organizację pracy. Ze względu na niskie marże stosowane w branży produkcji mieszanek betonowych, jakość i terminowość oferowana przez wytwórnię może przyczynić się do osiągnięcia przewagi konkurencyjnej na wymagającym rynku. W pracy został zaproponowany całkowitoliczbowy liniowy model problemu produkcji i dystrybucji mieszanki betonowej. Stosowanie powyższego modelu umożliwi obsługę większej liczby zleceń, poprawę terminowości dostaw oraz zwiększenie stopnia wykorzystania betonowozów.

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

## Streszczenie

Jednym z krytycznych zagadnień rozpatrywanych w ramach logistycznych przedsięwzięć inwestycyjno-budowlanych jest zaopatrzenie placu budowy w mieszankę betonową. Wskutek coraz większych wymagań odnośnie jakości oraz dążenia do uzyskania specjalnych właściwości betonu, wiele wytwórni dysponuje zaawansowanymi, w pełni zautomatyzowanymi liniami produkcyjnymi. Przedsiębiorstwa te posiadają również floty nowoczesnych betonowozów. Problemem okazuje się jednak wykorzystanie posiadanego potencjału produkcyjnego. Harmonogramowaniem produkcji mieszanki oraz planowaniem tras przewozowych betonowozów zazwyczaj zajmują się dyspozytorzy, którzy bazują jedynie na własnym doświadczeniu, a nie na

rzetelnej analizie wspartej systemami wspomagającymi podejmowanie decyzji.

W artykule scharakteryzowano ograniczenia w dystrybucji mieszanki betonowej oraz opracowano liniowy model matematyczny mający na celu optymalizację procesów transportu i produkcji mieszanki betonowej.

## Modeling logistic processes for production and dispatching ready-mixed concrete

### Abstract

*Ready-mixed concrete delivery is one of the major logistic problem for construction investment projects. Because of demand for quality are growing, concrete batching plants are typically equipped with modern automated high-capacity systems. The plants often dispose of fleets of modern concrete transport trucks. The biggest disadvantage of concrete batching plants is fluctuation of production capacity utilization level. 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 modeling logistic processes and systems for production and dispatching ready-mixed concrete, and proposes a concept of mathematical model for integrated production scheduling and vehicle routing optimization.*

### BIBLIOGRAFIA

1. Gołemska E., Sławińska M., Szymczak M. Kompendium wiedzy o logistyce. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
2. Sobotka A. Logistyka przedsiębiorstw i przedsięwzięć budowlanych. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010.
3. Tomczak M. Model decyzyjny dostaw realizowanych przez centrum dystrybucyjne dla potrzeb małych i średnich przedsiębiorstw budowlanych. Logistyka nr 3 (2014) str. 6358-6366.
4. Yan S., Lai W., Chen M. Production scheduling and truck dispatching of ready mixed concrete. Transportation Research. Part E 44 (2008) 164-179.
5. Biruk S., Tomczak M., Optymalizacja procesu transportu w dystrybucji mieszanki betonowej. Budownictwo i Architektura 13 (4) (2014) 335-342.
6. 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.
7. Orłowski Z. Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
8. PN-B-06265:2004 Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206-1:2003.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. PN-EN 13670:2011. Wykonywanie konstrukcji z betonu.
13. PN-63/B-06251 Roboty betonowe i żelbetowe. Wymagania techniczne.
14. Tommelein I. D., Li A. E. Y., Just-in-time concrete delivery: mapping alternatives for vertical supply chain integration. Proceedings of the Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction IGLC-7, Kalifornia 1999, 97-108.
15. Asbach L., Dorndorf U., Pesh E., Analysis, modeling and solution of concrete delivery problem. European Journal of Operational Research 193 (2009) 820-835.
16. Park M., Kim W. Y., Lee H. S., Han S., Supply chain model for ready mixed concrete. Automation in Construction 20 (2011) 44-55.



17. 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.
18. Yan S., Lai W., An optimal scheduling model for ready mixed concrete supply with overtime considerations. *Automation in Construction* 16 (2007) 734-744.
19. 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.
20. Faria J. M., Silva C. A., Sousa J. M. C., Surico M., Kaymak U., Distributed optimization using ant colony optimization in a concrete delivery supply chain. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Kanada 2006, 73-80.
21. Cao M., Lu M., Zhang J. P., Concrete plant operation using combined simulation and genetic algorithms. *Proceedings of Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Szanghaj 2004, 4204-4209.
22. Tang S. L., Ying K. C., Anson M., Lu M., RMCSIM: A simulation model of a ready-mixed concrete plant serving multiple sites using multiple truckmixers. *Construction Management and Economics* 23 (2005) 15-32.
23. Lu M., Lam H. Ch., Optimized concrete delivery scheduling using combined simulation and genetic algorithms. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 2572-2580.
24. Liu P., Wang L., Ding X., Gao X., Scheduling of dispatching ready mixed concrete trucks through discrete particle swarm optimization. *IEEE International Conference on System Man and Cybernetics*. Turcja 2010, 4086-4090.
25. Zhang Y., Li M., Liu Z., Vehicle scheduling and dispatching of ready mixed concrete. *Fourth International Workshop on Advanced Computational Intelligence*, Chiny 2011, 465-472.
26. Payr F., Schmid V., Optimizing deliveries of ready-mixed concrete. *Logistics and Industrial Informatics*, Austria 2009.
27. Graham L. D., Forbes D. R., Smith S. D., Modeling the ready mixed concrete delivery system with neural networks. *Automation in Construction* 15 (2006) 656-663.
28. Schmid V., Doerner K. F., Hartl R. F., Gonzalez J. J. S., Hybridization of very large neighborhood search for ready-mixed concrete delivery problems. *Computers&Operations Research* 37 (2010) 559-574.