

dr inż. Agnieszka Dziadosz^{1*)}

ORCID: 0000-0002-2258-4057

mgr inż. Julianna Jóźwiak²⁾dr inż. Mariusz Rejment¹⁾

ORCID: 0000-0001-8230-3627

Practical aspects of using *AnyLogic* and *FlexSim* to simulate concrete mix deliveries

Praktyczne aspekty wykorzystania AnyLogic i FlexSim do symulacji dostaw mieszanki betonowej

DOI: 10.15199/33.2025.09.04

Abstract: Managing the supply chain of building materials is one of the most important elements of the organization of construction works. When planning the supply of building materials, many factors should be taken into account, including: production time, delivery date, transport distance, storage locations, time and method of unloading and storage conditions of a given material. In the article, the authors presented numerous benefits and minor inconveniences of using the simulation of concrete mix deliveries to a real construction site using two computer programs: *AnyLogic* and *FlexSim*.

Key words: optimization; Ready Mixed Concrete Delivery Problem; Construction 4.0.

Streszczenie: Zarządzanie łańcuchem dostaw materiałów budowlanych jest jednym z istotnych elementów organizacji robót budowlanych. W trakcie planowania dostaw należy brać pod uwagę wiele czynników, takich jak: czas produkcji, termin dostawy, odległość transportu i miejsca składowania, czas i sposób rozładunku oraz warunki przechowywania danego materiału. W artykule przedstawiono liczne korzyści oraz drobne niedogodności wynikające z symulacji dostaw mieszanki betonowej na rzeczywisty plac budowy z wykorzystaniem dwóch programów komputerowych *AnyLogic* oraz *FlexSim*.

Słowa kluczowe: optymalizacja; dostawa mieszanki betonowej; budownictwo 4.0.

In recent years, the construction sector has undergone several significant changes aimed at improving logistics operations, substantially reducing transport time, and seeking methods for reliable verification and cost control of construction projects. This is primarily related to the implementation of digitalization throughout the entire investment process, including the stage of use of the construction. In the literature, the main technologies within Construction 4.0 are classified into several groups associated with supply chains (CSC), such as: digitization (management information systems, real-time supply chain management – SCM, intelligent transport systems); cloud computing (web service technology, mobile Internet-based SCM in construction, collaborative technologies); BIM (information integration and sharing, CSC monitoring, improvement of supply chain efficiency, decision support, support for construction SCM); 3D printing; tracking and localization (geographic information systems – GIS and RFID); and electronic supply chain management (web portals, e-business, extranets) [1, 2]. Moreover, the listed technologies have been grouped into the following categories: automation, communication, distribution, localization, optimization, reconstruction, simulation, standardization, and visualization, whose overriding advantage is that they can be applied at all stages of the building life cycle. In this article, simulation was used, which, combined with visualization, helps to identify potential problems with material availability as well as risks of delivery delays to the construction site. For the purposes of the

W ostatnich latach sektor budownictwa przeszedł kilka istotnych zmian, których celem było usprawnienie działań logistycznych, znaczne zmniejszenie czasu transportu oraz poszukiwanie sposobów rzetelnej weryfikacji i kontroli kosztów przedsięwzięć budowlanych. Jest to związane w głównej mierze z wdrożeniem cyfryzacji całego procesu inwestycyjnego, włącznie z uwzględnieniem fazy eksploatacji. W literaturze przedmiotu występuje podział głównych technologii w ramach budownictwa 4.0 na kilka głównych grup wiążących się z łańcuchami dostaw (CSC), takich jak: cyfryzacja (systemy informacji zarządczej, zarządzanie łańcuchem dostaw w czasie rzeczywistym – SCM, inteligentne systemy transportowe); przetwarzanie w chmurze (technologia usług internetowych; Internet mobilny oparty na budownictwie SCM; technologia kolaboracyjna); BIM (integracja i udostępnianie informacji, monitoring CSC; poprawa efektywności łańcucha dostaw; wspomaganie decyzji, wsparcie budownictwa SCM), druk 3D, śledzenie i lokalizacja (systemy informacji geograficznej; GIS i RFID) oraz elektroniczne zarządzanie łańcuchem dostaw (portale internetowe, e-biznes, ekstrasety) [1, 2]. Ponadto wymienione technologie zostały pogrupowane w następujące grupy: automatyzacja; komunikacja; dystrybucja; lokalizacja; optymalizacja; rekonstrukcja; symulacja; standaryzacja i wizualizacja, których nadrzędną zaletą jest fakt, że można je zastosować we wszystkich etapach cyklu życia obiektu budowlanego. W artykule wykorzystano symulację, która łącznie z wizualizacją pomaga identyfikować potencjalne problemy z dostępnością materiałów oraz zagrożenia z opóźnieniem dostaw na plac budowy. Jako podstawę analizy wybraliśmy procesy związane z transportem, takie jak logi-

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

^{*)} Correspondence address: agnieszka.dziadosz@pwr.edu.pl



analysis, the authors selected processes related to transportation, such as the logistics of supplying construction materials, which can be simulated in an interactive virtual environment closely resembling reality.

Problem of Modeling Concrete Mix Delivery

The main goal of seeking optimal solutions in logistics is to ensure the continuity of construction material deliveries to the construction site, as well as the uninterrupted production at the concrete batching plant, where it is most advantageous to maintain constant use of technical resources without unnecessary breaks that generate additional costs. By optimizing the concrete mix delivery process, each party gains measurable benefits; therefore, in practice, efforts are made to optimize and utilize various tools supporting this process [3].

In the literature, Mixed Integer Programming (MIP) models used in combination with genetic algorithms (GA) are recommended for delivery modeling, and their effectiveness has been confirmed, among others, in [4]. Furthermore, in [5] and [6], there is a growing use of simulations based on discrete-event modeling using GPSS. Discrete-event modeling involves creating a system model that closely resembles a realistic environment, where events occur at specific points in time. During the modeling of these events, interactions between objects or agents in the system are analyzed, along with their behavior over time and the impact of identified interactions on the system's state.

It is important to emphasize the complexity of concrete mix delivery to a construction site, which results from the high dynamics of the process, its dependence on numerous factors, and often from individual approaches. Concrete mix is a product that cannot be stored on-site and is prepared on demand for a specific recipient.

Data Preparation for Simulation and Their Analysis in Selected Software

One of the methods for optimizing the delivery process of concrete mix to the construction site is the practical use of simulation, which allows for determining the daily demand that will be fulfilled by a specific batching plant and for preparing the appropriate transport resources to continuously ensure the delivery of concrete mix to a designated location, thereby enabling its proper placement in the structure.

For the purpose of in-depth analyses, a task was modeled involving the handling of an order for a large quantity of concrete mix required for placing in the industrial floor of a production hall. The simulation served as a tool to support the prediction of concrete delivery time and to determine the demand for transporting resources. Two computer programs were used to perform the simulation: *AnyLogic* [7] and *FlexSim* [8]. The proposed discrete-event model describes this process from concrete mix production at the batching plant, through transportation, to the placing of the concrete mix at the construction site, with concrete trucks functioning as agents.

The first simulation, concerning two scenarios, was prepared in the *AnyLogic* program. **The assumptions for Sce-**

styka zaopatrzenia w materiały budowlane, które można symulować w interaktywnym środowisku wirtualnym, zbliżonym do realistycznego.

Problem modelowania dostawy mieszanki betonowej

Głównym celem poszukiwania optymalnych rozwiązań dotyczących logistyki jest zapewnienie ciągłości dostaw materiałów budowlanych na plac budowy, a także ciągłości produkcji na węźle betoniarskim, w którym najkorzystniejsze jest stałe, nieprzerwane wykorzystywanie środków technicznych, bez zbędnych przerw, które generują koszty. Dzięki optymalizacji procesu dostawy mieszanki betonowej, każda ze stron odnosi wymierne korzyści, dlatego też w praktyce dąży się do optymalizacji i wykorzystania różnych narzędzi wspomagających ten proces [3]. W literaturze przedmiotu przy modelowaniu dostaw polecany jest model MIP (ang. Mixed Integer Programming) stosowany razem z algorytmem genetycznym GA, których skuteczność potwierdzono m.in. w [4]. Z kolei w [5] oraz [6] można zauważyć coraz częstsze wykorzystywanie symulacji bazujących na modelowaniu zdarzeń dyskretnych przy użyciu GPSS. Modelowanie zdarzeń dyskretnych polega na tworzeniu modelu systemu, zbliżonego do realistycznego środowiska, w którym zdarzenia mają miejsce w określonych punktach czasowych. Podczas modelowania tych zdarzeń analizuje się interakcje między obiektami lub agentami w systemie, ich zachowanie w czasie i wpływ zidentyfikowanych interakcji na stan systemu. Należy podkreślić złożoność dostawy mieszanki betonowej na plac budowy, która wynika z ogromnej dynamiki procesu, z jego uzależnienia od wielu czynników, a także niejednokrotnie z indywidualnego podejścia, mieszanka betonowa to produkt, którego nie można składować na placu budowy, przygotowywany na zamówienie konkretnego odbiorcy.

Przygotowania danych do symulacji i ich analiza w wybranych programach

Jednym ze sposobów optymalizacji procesu dostawy mieszanki betonowej na plac budowy jest praktyczne wykorzystanie symulacji, umożliwiającej określenie dziennego zapotrzebowania, które zostanie zaspokojone przez konkretny węzeł oraz przygotowania odpowiednich środków transportu, aby móc w sposób ciągły zapewnić dostarczenie mieszanki betonowej w określone miejsce, co zapewni poprawne wbudowanie mieszanki betonowej w konstrukcję. Na potrzeby dogłębnych analiz zamodelowano zadanie wiążące się z obsługą zamówienia dużej ilości mieszanki betonowej potrzebnej do wbudowania w posadzkę przemysłową hali produkcyjnej. Symulacja posłużyła jako narzędzie wspomagające przewidywanie czasu trwania dostawy mieszanki betonowej oraz do określenia zapotrzebowania na środki transportujące. Do jej wykonania wykorzystano dwa programy komputerowe: *AnyLogic* [7] oraz *FlexSim* [8]. Zaproponowany model zdarzeń dyskretnych opisuje ten proces od produkcji betonu w betoniarni, poprzez transport, aż po układanie mieszanki betonowej na placu budowy, przy czym betonowozy pełnią rolę agentów.

nario 1 were as follows: two concrete batching plants were considered (with the capacity to dispatch four concrete trucks per hour from the first plant, and five concrete trucks per hour from the second plant); one construction site was assumed (reported demand for concrete mix for the execution of an industrial floor, ensuring continuity of supply); the delivery time of the concrete mix from batching plant no. 1 to the construction site was described by a triangular distribution with the following parameters: minimum time 20 minutes; most probable time 40 minutes; maximum time 60 minutes; the delivery time of the concrete mix from batching plant no. 2 to the construction site was a random variable with a triangular probability distribution with the following parameters: minimum time 10 minutes; most probable time 15 minutes; maximum time 35 minutes; unloading point no. 1 and unloading point no. 2 are represented by queue blocks with maximum capacity; the assumed duration of concrete mix delivery: 6 hours when carrying out the construction work within a single working day.

To represent the simulation in space and time, a map of the city of Poznań was used, with the concrete batching plants and the construction site marked on it (Figures 1 and 2).

In this model, after 6 hours, 44 concrete trucks delivered concrete mix to the construction site. From Plant No. 1, 26 trucks were dispatched, while from Plant No. 2, 22 trucks were dispatched. This means that a total of 48 trucks were sent out, 4 of which were still *en route* at the time the simulation was stopped and had not yet reached the site.

Each factor in the model under consideration – such as arrival rate, delay time, and queuing (i.e., the precise unloading of a queue by a buffer, meaning a queue of agents waiting for acceptance by the next block in the process flow, or a universal storage place for agents) – influences the functioning of

Pierwszą symulację, dotyczącą dwóch scenariuszy przygotowano w programie *AnyLogic*. **Założenia do scenariusza nr 1** były następujące: przyjęto 2 węzły betoniarские (możliwość wysłania czterech betonowozów na godzinę, a w drugim węźle – pięciu betonowozów na godzinę); przyjęto jeden plac budowy (zgłoszone zapotrzebowanie na mieszankę betonową w celu wykonania posadzki przemysłowej, z zachowaniem ciągłości dostaw); czas dostawy mieszanki betonu z węzła betoniarского nr 1 na plac budowy został opisany przez rozkład trójkątny o następujących parametrach: czas minimalny 20 min; czas najbardziej prawdopodobny 40 min; czas maksymalny 60 min; czas dostawy mieszanki betonu z węzła betoniarского nr 2 na plac budowy jest zmienną losową o trójkątnym rozkładzie prawdopodobieństwa o następujących parametrach: czas minimalny 10 min; czas najbardziej prawdopodobny 15 min; czas maksymalny 35 min; rozładunek nr 1 i rozładunek nr 2 są reprezentowane przez blok kolejek o maksymalnej pojemności; założony czas trwania dostawy mieszanki betonu: 6 h przy realizacji robót w ciągu jednego dnia roboczego.

W celu urzeczywistnienia symulacji w przestrzeni i czasie wykorzystano mapę Poznania, na której oznaczono węzły betoniarские i plac budowy (rysunki 1 i 2). W tym modelu po 6 h 44 betonowozy dostarczyły mieszankę betonową na plac budowy. Z węzła nr 1 wysłano 26 betonowozów, natomiast z węzła betoniarского nr 2 – 22 betonowozy. Oznacza to, że razem wysłano 48 betonowozów, z których w momencie wstrzymania symulacji 4 znajdowały się w trasie i nie dotarły jeszcze na plac budowy. Każdy czynnik w rozpatrywanym modelu, jak wskaźnik przybycia, czas opóźnienia, kolejkowanie (tj. dokładne rozładowywanie kolejki przez bufor, czyli kolejkę agentów oczekujących na akceptację przez następny blok w przepływie procesu, lub uniwersalne miejsce przechowywania agentów),

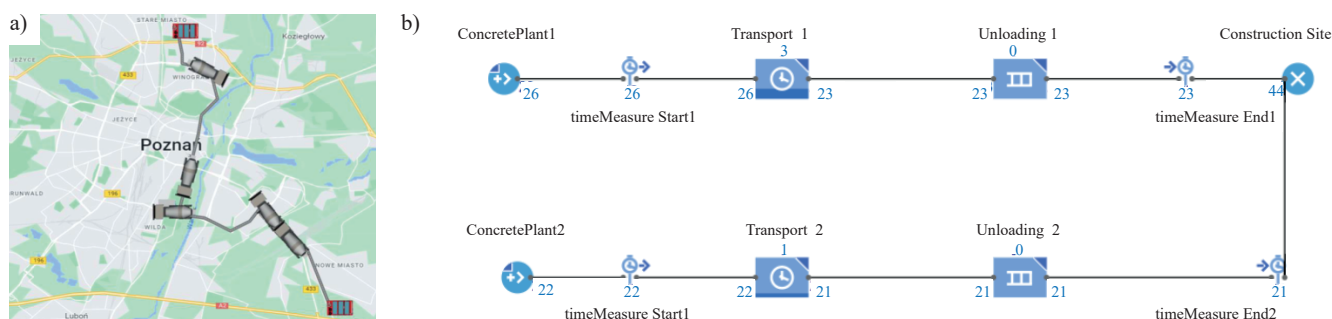


Fig. 1. Graphical presentation of the simulation for scenario no. 1: route (a) and graph (b) after 6 hours of running [9] *Fig. Own study*
Rys. 1. Graficzna prezentacja symulacji w przypadku scenariusza nr 1: trasa (a) oraz graf (b) po 6 h przeprowadzanej symulacji [9]

Rys. Opracowanie własne

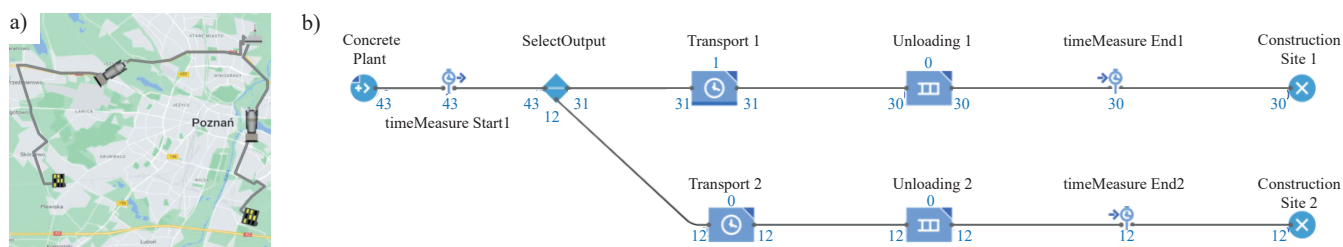


Fig. 2. Graphical presentation of the simulation for scenario no. 2: route (a) and graph (a) after 6 hours of simulation [9] *Fig. Own study*
Rys. 2. Graficzna prezentacja symulacji dla scenariusza nr 2: trasa (a) oraz graf (b) po 6 godzinach przeprowadzanej symulacji [9]

Rys. Opracowanie własne



the model and the final amount of concrete mix delivered to the construction site.

Ultimately, after 6 hours, 44 trucks arrived at the construction site. Assuming a load of 9 m^3 per truck, this corresponds to 396 m^3 of concrete mix delivered to the construction site. In addition to real-time observation of simulation parameters, the program also makes it possible to generate probability distribution charts of delivery time and the number of trucks present at the construction site after a given period – in this case, after 6 hours.

Assumptions for Scenario 2: one concrete batching plant was considered (with the capacity to dispatch six concrete trucks per hour); two construction sites were assumed, both reporting demand for concrete mix. The delivery time of the concrete mix from Batching Plant No. 1 to the construction site was described by a triangular distribution with the following parameters: minimum time 10 minutes, most likely time 25 minutes, and maximum time 50 minutes. The delivery time of the concrete mix from Batching Plant No. 2 to the construction site was described by a triangular probability distribution with the following parameters: minimum time 20 minutes, most likely time 30 minutes, and maximum time 45 minutes.

Unloading point No. 1 and unloading point No. 2 were represented as queue blocks with maximum capacity. The assumed duration of concrete delivery was 6 hours. A *SelectOutput* block, used to direct incoming agents to one of two output ports, was also added.

In this model, after 6 hours, 30 concrete trucks delivered concrete mix to construction site No. 1 and 12 trucks to construction site No. 2. The batching plant dispatched 43 trucks in total, one of which, at the time the simulation was stopped, was still *en route* and had not yet reached the construction site.

It can be observed that when the probability of directing agents to the output ports was set at 0.7, construction site No. 1 received more concrete mix. In this model, the main factor influencing the results was the assumed probability, which led to a noticeable difference in the number of trucks and thus the volume of concrete mix delivered. Variability of this parameter makes it possible to achieve the appropriate number of trucks depending on the demand of each construction site.

The simulation in *FlexSim* also covered two variants. The first was carried out using the GIS Module option available in the program, where transport time and distance are key factors for modeling the supply chain (Figure 3). This module focuses on a map object, on which points are placed and then connected to visualize the route. The GIS Module in *FlexSim* supports three types of routes, of which the so-called *Driving Roads* were used in this case. This type of route retrieves road information from a preconfigured routing server.

ma wpływ na funkcjonowanie modelu i ostateczną ilość mieszanki betonu dostarczonego na plac budowy. Ostatecznie po 6 h na budowę dotarły 44 betonowozы, co przy założeniu załadowania 9 m^3 w przypadku każdego z nich, oznacza 396 m^3 dostarczonej mieszanki betonowej na budowę. Program, poza bieżącą obserwacją parametrów symulacji, umożliwia także stworzenie wykresów rozkładu prawdopodobieństwa czasu dostawy i liczby betonowozów na budowie po określonym czasie, w tym przypadku po 6 h.

Założenia do scenariusza nr 2: przyjęto 1 węzeł betoniarski (możliwość wysłania sześciu betonowozów na godzinę); przyjęto 2 place budowy, które zgłosiły zapotrzebowanie na mieszankę betonową; czas dostawy mieszanki betonu z węzła betoniarskiego nr 1 na plac budowy został opisany przez rozkład trójkątny o następujących parametrach: czas minimalny 10 min; czas najbardziej prawdopodobny 25 min; czas maksymalny 50 min; czas dostawy mieszanki betonu z węzła betoniarskiego nr 2 na plac budowy został opisany przez rozkład trójkątny prawdopodobieństwa o następujących parametrach: czas minimalny 20 min; czas najbardziej prawdopodobny 30 min; czas maksymalny 45 min; rozładunek nr 1 i rozładunek nr 2 są reprezentowane przez blok kolejek o maksymalnej pojemności; założony czas trwania dostawy betonu: 6 h; blok *selectOutput*, służący do kierowania przychodzących agentów do jednego z dwóch portów wyjściowych, został dodany.

W tym modelu po 6 godzinach 30 betonowozów dostarczyło mieszankę betonową na plac budowy nr 1 oraz 12 betonowozów na plac budowy nr 2. Węzeł betoniarski wysłał 43 betonowozы, z których jeden, w czasie zatrzymania symulacji, był w trasie i nie dotarł jeszcze na plac budowy. Widać, że w przypadku, gdy ustawiono prawdopodobieństwo kierowania agentów do portów wyjściowych na poziomie 0,7, plac budowy nr 1 otrzymał więcej mieszanki betonowej. W przypadku tego modelu, głównym czynnikiem wpływającym na otrzymane rezultaty było założone prawdopodobieństwo, dzięki któremu zauważalna jest różnica w liczbie betonowozów, a co za tym idzie ilości dostarczonej mieszanki betonowej. Zmienność tego parametru pozwoli na uzyskanie odpowiedniej liczby betonowozów w zależności od zapotrzebowania każdej z budów.

Symulacja w programie *FlexSim* dotyczyła również dwóch wariantów. Pierwszy został przeprowadzony z wykorzystaniem opcji Modułu GIS, dostępnej w programie, gdzie czas transportu i odległość są kluczowymi czynnikami do modelowania łańcucha dostaw (rysunek 3). Moduł ten skupia się na obiekcie mapy, na której umieszcza się punkty, a następnie łączy je w celu wizualizacji trasy. Moduł GIS w programie *FlexSim* umożliwia obsługę trzech rodzajów tras, z których w tym przypadku wykorzystano tzw. *Driving Roads*. Ten rodzaj trasy pobiera informacje o drogach z wcześniej

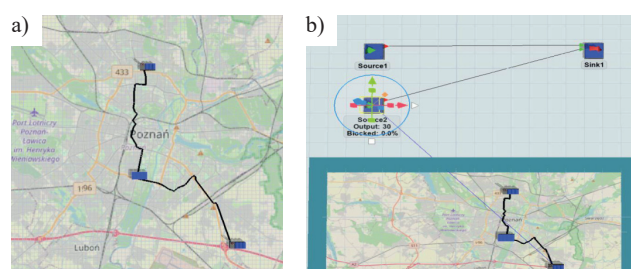


Fig. 3. Graphical presentation of the simulation for scenario no. 1: route (a) and diagram (b) during the simulation performed in FlexSim [9]

Rys. 3 Graficzna prezentacja symulacji dotyczącej scenariusza nr 1: trasa (a) oraz schemat (b) w trakcie przeprowadzanej symulacji we FlexSim [9]

Fig. Own study

Rys. Opracowanie własne

The second scenario, on the other hand, is a simplified scheme without the use of maps, also representing the production, transport, and unloading of concrete mix (Figure 4). In this scheme, the concrete truck together with its load is represented by a so-called *box*, the route is a conveyor belt with an assumed transport speed, while the construction site and the batching plant are represented as processors.

Each of the simulations presented in a synthetic form provides numerous benefits that can be applied in planning deliveries, organizing production on construction site, and managing the operation of batching plants. The presented examples illustrate different variants of using simulation in concrete mix deliveries, with particular attention given to the selection of parameters and their impact on the simulation outcome, e.g., after 6 hours.

skonfigurowanego serwera routingu. Drugi scenariusz jest natomiast uproszczonym schematem bez wykorzystywania map, przedstawiającym również produkcję, transport oraz wyładunek mieszanki betonowej (rysunek 4). W tym schemacie betonowóz wraz z załadunkiem reprezentowany jest przez tzw. *box*, trasa to taśmociąg, z założeniem prędkości transportowania, natomiast budowa i węzeł betoniarski to procesory.

Każda z syntetycznie przedstawionych symulacji zapewnia wiele korzyści możliwych do wykorzystania podczas planowania dostaw, produkcji na placu budowy i organizacji pracy węzłów betoniarskich. W przedstawionych przykładach są różne warianty wykorzystania symulacji w dostawach mieszanki betonowej, ze zwróceniem uwagi na dobór parametrów i ich wpływ na wynik symulacji np. po 6 h.

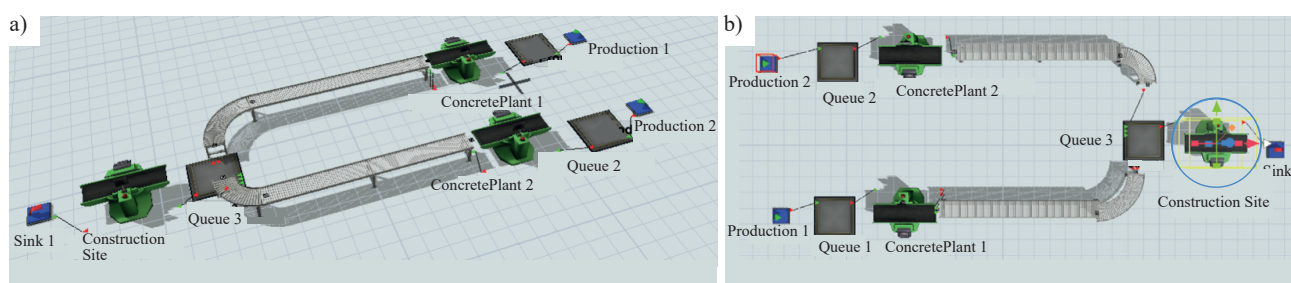


Fig. 4. Graphical presentation of the simulation for scenario no. 2: the model before (a) and during the simulation (b) performed in FlexSim [9]

Rys. 4 Graficzna prezentacja symulacji dla scenariusza nr 2: model przed (a) i w trakcie (b) przeprowadzanej symulacji we FlexSim [9]

Rys.: opracowanie własne

Discussion of the Simulation Process

When verifying the course of simulations for the individual scenarios using the two applications, it was found that in both *AnyLogic* and *FlexSim* the key factor influencing the results was the definition of probability distributions for delivery time. The higher the distribution parameters, expressed by the mean and standard deviation, the fewer concrete trucks were scheduled for the programmed route. Moreover, the smaller the minimum value assumed in the triangular distribution, the greater the probability that a concrete truck would leave the batching plant sooner.

By introducing variability of parameters in the concrete delivery model, it was possible to assess the frequency of dispatching trucks to a specific construction site with a defined demand, while maintaining continuous concreting. Planning the transport of concrete mix from two batching plants is safe, as it allows for uninterrupted concreting at a given construction site. In the event of random incidents at one batching plant that would prevent deliveries, distribution from the second plant remains possible and can be easily and quickly configured in the program.

Nevertheless, in the model, every parameter (such as arrival rate, delay time, and queuing) has a significant impact on the final outcome and the total amount of concrete mix delivered to the construction site. It should also be noted that the program cannot account for human factors, which may cause delays at any stage of the process, including loading, transport, and unloading, both at the batching plant and at the construction site.

Dyskusja nad przebiegiem symulacji

Weryfikując przebieg symulacji dotyczącej poszczególnych scenariuszy, z wykorzystaniem dwóch aplikacji, stwierdzono, że zarówno w programie *AnyLogic*, jak i *FlexSim*, kluczowy wpływ na otrzymane wyniki miało ustalenie rozkładów prawdopodobieństwa czasu dostawy. Im większa była wartość parametrów rozkładu, wyrażona przez średnią oraz odchylenie standardowe, tym mniejsza liczba betonowozów została zaplanowana do dostawy w zaprogramowaną trasę. Ponadto im mniejsza wartość minimalna była przyjmowana w rozkładzie trójkątnym, tym większe prawdopodobieństwo, że betonowóz opuści węzeł betoniarski po krótszym czasie. Dzięki wprowadzanej zmienności parametrów w modelu dostawy mieszanki betonowej możliwa była ocena częstotliwości wysyłania betonowozów na konkretną budowę o konkretnym zapotrzebowaniu z zachowaniem ciągłości betonowania. Planowanie transportu mieszanki betonowej z dwóch węzłów betoniarskich jest bezpieczne, ponieważ pozwala utrzymać ciągłość betonowania na danej budowie. W przypadku zdarzeń losowych, dotyczących jednego z węzłów betoniarskich, które uniemożliwiłyby dostawę, wciąż pozostaje możliwość dystrybucji z drugiego węzła, co w sposób łatwy i szybki można ustawić w programie. Niemniej jednak w modelu każdy parametr, jak wskaźnik przybycia, czas opóźnienia i kolejowanie, ma istotny wpływ na ostateczny wynik i ilość dostarczonej mieszanki betonowej na plac budowy. Należy pamiętać również o tym, że program nie jest w stanie przewidzieć czynnika ludzkiego, który może spowodować opóźnienia na każdym etapie procesu, a więc



In the second scenario, using the *AnyLogic* program, a situation was analyzed in which a single batching plant supplies concrete mix to two construction sites. In this model, the main factor influencing the results was the assumed probability distribution of concrete delivery time. It was precisely this distribution that determined the differences in the number of concrete trucks between the scenarios. Adjusting this parameter made it possible to match the number of trucks to the individual demand of each construction site. This parameter should be adapted each time depending on construction site specific requirements, in order to maintain continuity of deliveries and to minimize queues of concrete trucks in front of the construction sites. Thanks to real-time visualization of the programmed simulation, immediate reaction is possible in the case of undesirable results.

In the scenario developed using *FlexSim*, where the GIS module was applied, the simulation reflected transport along an optimized route, since the so-called *Driving Roads* retrieve road information from a preconfigured routing server. Similarly, the GIS module features a more advanced graphical interface compared to *AnyLogic*. The basic version of *AnyLogic*, however, offers more flexibility in setting parameters and using them for routing directly on the map with real distances. The drawback is the need to manually input the route on the map, requiring the user to select it based on personal knowledge, which does not necessarily guarantee the shortest path. In contrast, *FlexSim* automatically selects the route, thus eliminating human error.

In the first two simulations, there is a difference in routing, as one of the routes (selected by *FlexSim* and the GIS module) is shorter, which may affect the final outcome. In *FlexSim*, the route is represented by a simplified conveyor belt, which impacts the actual representation of the route on the map.

Both programs and the simulations developed in them can support the planning of concrete mix deliveries to construction sites.

Summary

Discrete-event modeling enables the analysis of system change scenarios and the assessment of the impact of different strategies and decisions on its performance through the use of simulation, as presented in this article. Simulation makes it possible to study many aspects of system operation. Concrete mix delivery simulations provide numerous benefits, as confirmed by the conducted studies of the presented delivery scenarios using *AnyLogic* and *FlexSim*, including:

- **Optimization of time and costs** – concrete mix delivery simulations enable precise determination of optimal routes and delivery schedules, thereby minimizing transport time for the concrete mix.
- **Ensuring material availability** – simulations allow for an accurate assessment of the required amount of concrete mix for a specific order, which optimizes the ordering and delivery process. This translates into maintaining continuity of batching plant operations and avoiding delivery delays.
- **Minimization of concrete mix losses** – to maintain the proper quality of the concrete mix, it is crucial to place it in

podczas załadunku, transportu i rozładunku zarówno po stronie węzła, jak i placu budowy.

W drugim scenariuszu, z wykorzystaniem programu *AnyLogic*, przeanalizowano sytuację, w której jeden węzeł betoniarski dostarcza mieszankę betonową na dwa place budowy. W tym modelu głównym czynnikiem wpływającym na uzyskane wyniki był założony rozkład prawdopodobieństwa dotyczący czasu dostawy mieszanki betonowej. To właśnie dzięki niemu uzyskujemy różnicę w liczbie betonowozów w poszczególnych scenariuszach. Zmiana tego parametru pozwoliła na dostosowanie liczby betonowozów do indywidualnego zapotrzebowania każdej z budów na mieszankę betonową. Parametr ten należy dostosowywać każdorazowo w zależności od zapotrzebowania każdej z budów, aby zachować ciągłość dostaw, a także w celu minimalizacji kolejek betonowozów przed placami budów. Dzięki wizualizacji na żywo zaprogramowanej symulacji, możliwa jest natychmiastowa reakcja w przypadku niepożądanych wyników. W scenariuszu opracowanym z wykorzystaniem programu *FlexSim*, w którym wykorzystano moduł GIS, symulacja odwzorowała transport po zoptymalizowanej trasie ze względu na fakt, iż tzw. *Driving Roads* pobiera informacje o drogach z serwera trasowania, który jest już wstępnie skonfigurowany. Podobnie jest z modułem GIS, który ma bardziej rozwiniętą szatę graficzną w porównaniu z programem *AnyLogic*. Program *AnyLogic* w podstawowej wersji ma więcej możliwości pod względem zadawania parametrów i wykorzystywania ich w trasowaniu bezpośrednio na mapie z wykorzystaniem realnych odległości. Minusem jest natomiast konieczność manualnego wprowadzania trasy na mapie, w której użytkownik dobiera trasę ze względu na swoją wiedzę, co niekoniecznie prowadzi do wyboru trasy najkrótszej. Z kolei w programie *FlexSim* jest automatyczny dobór trasy, co eliminuje błąd ludzki. W pierwszych dwóch symulacjach występuje różnica w trasowaniu, ponieważ jedna z tras (wybrana przez program *FlexSim* i moduł GIS) jest krótsza, co może wpłynąć na ostateczny wynik. W symulacji *FlexSim* trasę stanowi uproszczony przenośnik taśmowy, co ma wpływ na rzeczywiste oznaczenie trasy na mapie. Oba programy i przygotowane w nich symulacje mogą wspomagać planowanie dostaw mieszanki betonowej na plac budowy.

Podsumowanie

Modelowanie zdarzeń dyskretnych umożliwia analizę scenariuszy zmian w systemie oraz ocenę wpływu różnych strategii i decyzji na jego wydajność z wykorzystaniem prezentowanej w artykule techniki, jaką jest symulacja. Dzięki niej mamy możliwość badania wielu aspektów działania systemu. Symulacje dostaw mieszanki betonowej zapewniają wiele korzyści, co potwierdzają przeprowadzone badania zaprezentowanych scenariuszy dostaw, przy użyciu programów *AnyLogic* i *FlexSim*, m.in:

- **optymalizacja czasu i kosztów** (symulacje dostaw mieszanki betonowej umożliwiają precyzyjne określenie optymalnych tras i harmonogramów dostaw, a w efekcie zminimalizowanie czasu transportu mieszanki betonu);
- **zapewnienie dostępności materiału** (symulacje pozwalają na dokładną ocenę ilości potrzebnej mieszanki betonowej



a formwork within the appropriate time after production. Delivery simulations therefore contribute indirectly to reducing concrete losses related to mixing, transport, and hardening times, e.g., the need to discard a batch due to excessive waiting time before placement.

• **Reduction of CO₂ emissions, environmental protection, and sustainable deliveries** – concrete mix delivery simulations allow for the selection of optimal concrete truck routes, shortening travel distances, and reducing fuel consumption, which indirectly leads to a reduction in CO₂ and other greenhouse gas emissions. The use of simulation also enables the optimization of vehicle utilization, reduction in the number of trips, and minimization of underused or inefficiently used trucks.

• **Improvement of safety and efficiency** – concrete delivery simulations can take into account various external factors, such as road conditions, traffic density, or concrete truck restrictions. Preparing the simulation before starting the route allows potential challenges related to construction site delivery to be anticipated, enabling the implementation of appropriate precautions and route optimization to avoid traffic disruptions.

The use of simulation and the tools for its development offers far more advantages than the drawbacks associated with the need to learn the software, prepare input data, select parameters, etc.

w przypadku konkretnego zamówienia, dzięki czemu proces zamawiania i dostaw materiałów może być zoptymalizowany; ma to przełożenie na ciągłość pracy wężła betoniarского i uniknięcie opóźnień w realizacji dostaw);

• **minimalizacja strat mieszanki betonowej** (w celu utrzymania prawidłowej jakości mieszanki betonowej kluczowe jest jej wbudowanie w odpowiednim czasie liczącym od wyprodukowania, dlatego też symulacje dostaw przyczyniają się pośrednio do minimalizacji strat mieszanki betonu związanych z czasem mieszania, transportu i twardnienia, np. konieczność rezygnacji z partii betonu z powodu zbyt długiego czasu oczekiwania na jego wbudowanie);

• **redukcja emisji CO₂, ochrona środowiska i zrównoważone dostawy** (symulacje dostaw mieszanki betonowej pozwalają na wybór optymalnej trasy betonowozów, skrócenia jej dystansu i zmniejszenia zużycia paliwa, co pośrednio prowadzi do redukcji emisji CO₂ i innych gazów cieplarnianych; zastosowanie symulacji umożliwia także zoptymalizowanie stopnia wykorzystania pojazdów, zmniejszenie liczby kursów oraz liczby nieużywanych lub mało efektywnie wykorzystanych ciężarówek);

• **poprawa bezpieczeństwa i efektywności** (symulacje dostaw betonu mogą uwzględniać różne czynniki zewnętrzne, takie jak warunki drogowe, natężenie ruchu lub ograniczenia dotyczące ciężarówek); przygotowanie symulacji przed rozpoczęciem trasy pozwala na przewidywanie potencjalnych wyzwań związanych z dostawą na plac budowy dzięki czemu możliwe jest podjęcie odpowiednich środków ostrożności i zoptymalizowanie trasy, pozwalające na uniknięcie zakłóceń w ruchu drogowym).

Wykorzystanie symulacji oraz narzędzi do jej opracowania ma zdecydowanie więcej zalet, niż niedogodności związanych z koniecznością nauki oprogramowania, przygotowania danych wejściowych, doboru parametrów itp.

Received: 07.04.2025
Revised: 16.06.2025
Published: 19.09.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.04.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 16.06.2025 r.
Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature:

- [1] Perrier N, Bled A, Bourgault M, Cousin N, Danjou C, Pellerin R, Roland T. Construction 4.0: A survey of research trends, Journal of Information Technology in Construction, ITcon Vol. 35, 2020.
- [2] Dallasega P, Rauch, E, Linder C. (2018). Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction
- [3] Supply chains: A systematic literature review. Computers in Industry, 99, 205-225.
- [4] Dziadosz A, Kończak A. Review of selected methods of supporting decision-making proces in the construction industry, Archives of Civil Engineering Vol. LXII Issue 1 (2016) p. 112-126.
- [5] 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.
- [6] Matejević-Nikolić B, Zivković L. Development of the Simulation Model for Ready Mixed Concrete Supply Chain Cost Structure Technical Gazette 30, 1 (2023), p. 102-113.
- [7] Biruk S. Dispatching concrete trucks using simulation method, Budownictwo i Architektura 14(2) (2015) p. 5-10.
- [8] AnyLogic Library Reference Guides – Process Modeling Library.
- [9] Jurczyk K. FLEXSIM: podręcznik użytkownika, InterMarium, Kraków 2022.
- [10] Józwiak J. Decision support in optimizing concrete mix deliveries based on simulation, praca magisterska, promotor: dr inż. Agnieszka Dziadosz, 2023, Politechnika Poznańska.