

dr hab. inż. Sławomir Biruk^{1*)}

ORCID: 0000-0003-4392-8426

dr hab. inż. Piotr Jaśkowski¹⁾

ORCID: 0000-0003-1661-3373

Optimizing the volume of construction material inventories on construction site

Optymalizacja wielkości zapasu wyrobów budowlanych na budowie

DOI: 10.15199/33.2026.01.04

Abstract. Construction projects are invariably subject to risk. The daily demand for construction materials can be modelled using random variables. This facilitates the use of computer simulation to support supply management. The aim of this paper is to present simulation model to support sizing the safety stock assuming a limited capacity of on-site storage, in order to reduce the inventory management costs of construction products delivered to the construction site.

Keywords: inventory management of construction materials; simulation model; discrete simulation; decision support; risk conditions.

Streszczenie. Przedsięwzięcia budowlane są realizowane w warunkach ryzyka. Wielkość dziennego zapotrzebowania na wyroby budowlane może być modelowana za pomocą zmiennej losowej. Umożliwia to zastosowanie metody symulacji komputerowej do wspomagania planowania dostaw. Celem artykułu jest zaprezentowanie modelu symulacyjnego, którego badanie pozwala określić wielkość zapasu bezpiecznego przy ograniczonej wielkości składowiska, w celu ograniczenia kosztów gospodarowania zapasami wyrobów dostarczanych na budowę.

Słowa kluczowe: gospodarka zapasami wyrobów budowlanych; model symulacyjny; symulacja dyskretna; wspomaganie podejmowania decyzji; warunki ryzyka.

The direct costs of materials have a considerable share in the total construction cost. The exact figure depends on a number of factors (among others, the type of facility under construction and the construction methods) and usually exceeds 50% [1, 2]. A rational inventory management system for construction products has been shown to reduce the cost of construction production while also significantly impacting the timeliness of work execution, thereby reducing the risk of out-of-stock and crew downtime. This risk stems from three primary sources: the possibility of increased demand for materials due to fluctuations in the productivity of crews, inaccuracies in determining the demand, and supply disruptions.

Keeping inventories ties up capital and generates storage costs, but buying larger batches may reduce transportation cost and offers economies of volume discounts. A number of optimization models have been developed to determine the economic order quantity with deterministic demand and subject to a variety of constraints (e.g. non-uniform demand [3]). Differential and integral calculus, linear and dynamic programming, as well as metaheuristic algorithms, including genetic [4] or particle swarm [5], have been used to solve these models.

If inventory management is considered in risky environment, it is essential to implement an inventory management (control) strategy, also known as a supply

koszty bezpośrednie wyrobów budowlanych, to znaczna część kosztów realizacji obiektów budowlanych. Ich udział zależy od wielu czynników, m.in. rodzaju obiektu oraz stosowanej technologii i wynosi ponad 50% [1, 2]. Racjonalna gospodarka zapasami wyrobów budowlanych umożliwia redukcję kosztów produkcji budowlanej, ale również wpływa istotnie na terminowość realizacji robót, zmniejszając ryzyko braku zapasów i przestojów na budowie. Źródłem tego ryzyka jest zarówno możliwość wystąpienia zwiększonego zapotrzebowania na materiały w wyniku wahanja wydajności pracy brygad roboczych, błędy w określaniu potrzeb materiałowych, ale także zakłócenia w realizacji dostaw.

Utrzymywanie i tworzenie zapasów generuje koszty, ale z drugiej strony zakup większych partii wyrobów pozwala na redukcję kosztów transportu przez wykorzystanie ładowności środków transportowych, czy uzyskiwanie rabatów. Dotychczas opracowano wiele modeli optymalizacyjnych, umożliwiających wyznaczenie ekonomicznie uzasadnionej wielkości partii dostawy przy deterministycznie określonym zapotrzebowaniu, uwzględniających różne ograniczenia i warunki realizacji dostaw, np. nierównomiernie zapotrzebowanie na materiał [3]. Do analizy tych modeli były stosowane: rachunek różniczkowy i całkowy, programowanie liniowe i dynamiczne, jak również algorytmy metaheuristiczne, m.in. genetyczne [4] czy roju cząstek [5].

W przypadku planowania dostaw w warunkach ryzyka istnieje konieczność opracowania strategii zarządzania (sterowania) zapasami, często określanej też mianem polityki dostaw. Konieczne jest utrzymywanie rezerw wyrobów, zabezpieczających przed wystąpieniem przestojów na budowie. Opraco-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

^{*)} Correspondence address: s.biruk@pollub.pl

policy. Sufficiently large inventories are intended to assure continuity of on-site operations. The inventory management strategy involves determining the safety and the maximum stock and effective inventory monitoring methods [6]. It allows for precise determination of the optimal moment to place order and the order quantity. In practice, the most common approach is a policy of periodical or continuous review of inventory levels and placing supplemental or standing orders as inventory drops to the safety level. This ensures uninterrupted workflow until delivery.

An inventory management strategy is selected with the objective of minimizing the total cost of material management, which consists of acquisition and holding costs [7]. In some cases, out-of-stock costs are also examined [8]. **The costs associated** with acquisition encompass a wide range of expenses, including but not limited to: the identification of demand, the selection of a supplier, the oversight of the delivery process, the loading and unloading of materials, transportation logistics, and insurance. **The holding cost include storing** and maintaining inventory items, arranging and servicing storage space, inventory reviews, and depreciation/spoilage/shrinkage costs. Material shortages typically mean losses due to the plant and crew downtime, delays and related liquidated damages or penalties, and underutilization of the production potential of in-house labor.

Inventory management models in risky environment

The performance of construction crews is affected by variability of working conditions (frequent changes of location, outdoor environment). Consequently, risks and uncertainties must be accounted while planning works as well as in determining demand for materials and products and planning supplies. The inventory management system is a natural component of the overall project management system [9].

The impact of risk factors on inventory management can be modeled in various ways [10]. **A conventional approach** involves creating deterministic models based on the expected values of random variables (inputs) and, optionally, adding reserves sized on the basis of their standard deviations. Another method consists in building **stochastic models**. However, this approach is hindered by the complexity inherent in constructing and solving these models, as well as the challenge managers face in comprehending the principles of their creation and analysis. This category includes optimization models that generate solutions that remain feasible for any realization of random parameters [11]. A frequently employed approach, accounting for random input and complex relationships between the elements of the logistics system in a relatively straightforward manner, is to carry out computer simulation [12].

Discrete models are created to reflect changes in inventory levels resulting from daily consumption, timing and volume of

wanie strategii zarządzania zapasami wymaga ustalenia poziomu bezpiecznego i maksymalnego zapasu, wielkości zamówień oraz sposobu kontroli wielkości zapasów [6]. Pozwala to określać stosowny moment składania zamówienia oraz jego wielkość. W praktyce najczęściej stosuje się politykę przeglądów cyklicznych lub ciągłych stanu zapasów oraz zamówień uzupełniających lub stałych w przypadku, gdy stan zapasów osiągnie poziom mniejszy od bezpiecznego. Pozwala to na kontynuowanie robót do momentu realizacji dostawy.

Wybór strategii zarządzania zapasami jest dokonywany z punktu widzenia minimalizacji łącznych kosztów gospodarki materiałowej, na które składają się koszty realizacji dostaw i magazynowania [7]. Niekiedy analizowane są również koszty braku zapasów [8]. **Koszty realizacji dostaw** obejmują m.in. wszystkie koszty związane z określeniem zapotrzebowania, poszukiwaniem i wyborem dostawcy, kontrolą procesu dostawy, załadunkiem i wyładunkiem materiału, transportem i ubezpieczeniem dostawy. **Koszty utrzymywania zapasów**, to natomiast koszty związane z przechowywaniem wyrobów w magazynach lub na składowiskach, utworzeniem składowisk, przeglądami stanów zapasu, ryzykiem utraty wartości użytkowej wyrobów itp. Brak materiału powoduje straty związane z przestojami w realizacji robót, karami umownymi za przekroczenie terminów dyrektywnych i niewykorzystaniem potencjału produkcyjnego.

Modele symulacyjne gospodarki zapasami w warunkach ryzyka

W budownictwie na wydajność pracy brygad roboczych wpływają zmienne warunki realizacyjne (zmiana stanowisk pracy, praca na zewnątrz, wpływ warunków atmosferycznych itp.). Z tego względu konieczne jest uwzględnienie ryzyka i niepewności już na etapie planowania zarówno przebiegu realizacji procesów budowlanych, jak i przy planowaniu zapotrzebowania na wyroby budowlane, a następnie przy określaniu wielkości i terminów ich dostaw. System gospodarowania zapasami powinien być częścią całego systemu zarządzania przedsięwzięciem [9].

Wpływ czynników ryzyka w gospodarce zapasami może być ujęty w różny sposób [10]. **Klasyczny** polega na budowie modeli deterministycznych z wykorzystaniem wartości oczekiwanych zmiennych losowych i ewentualnie uwzględnieniem rezerw kalkulowanych na podstawie ich odchyłań standardowych. Drugi sposób to **tworzenie modeli stochastycznych**, ale ich wadą jest trudność konstruowania i rozwiązywania oraz niezrozumienie przez menedżerów zasad tworzenia i analizy. Do tej kategorii można zaliczyć modele optymalizacji zapewniającej odporność uzyskiwanych rozwiązań na zakłócenia losowe [11]. Często stosowanym podejściem, w którym dosyć łatwo jest uwzględnić losowość oraz wzajemne powiązania pomiędzy elementami systemu logistycznego, bez względu na stopień jego skomplikowania, jest przeprowadzanie symulacji komputerowej [12].

W celu odzwierciedlenia zmiany stanów zapasów, wynikających z dziennego zużycia oraz terminów i wielkości dostaw, są tworzone **modele dyskretne**. Stosowana przy dyskretnej symulacji metoda Monte Carlo umożliwia analizę dy-

deliveries. Discrete Monte Carlo simulation helps analyze dynamic inventory management systems where variables affecting decisions are described by random numbers. It facilitates the execution of experiments to assess the efficacy of diverse inventory management strategies [13]. Popular computer systems, such as Arena [14, 15], Anylogic [16], and GPSS [17], are frequently utilized in the study of inventory management systems. Simple simulation models are often analyzed using spreadsheets [12].

Simulation can be applied to comparing various inventory control policies [18]. In most policies, the **controlled variable is the level of safety stock**. It affects inventory holding cost and the amount of out-of-stock downtime. The size of safety stock largely depends on the accuracy of demand forecasting. Increasing the reliability of forecasts reduces the need to keep safety stock [19]. Its size is also significantly affected by the scale and variability of the lead time, variability of demand and availability of materials in the market [20].

Models presented in the literature aim to calculate stock replenishment level [12, 15], sizing orders for deliveries conducted with fixed frequency [21], and continuous control of inventory levels [22]. They differ strongly in terms of assumptions and constraints, and typically are not intended to cover problems specific to construction. For instance, A. Krishnamoorthy et al. [17] proposed a cyclic material ordering model programmed in the GPSS language that assumes random material consumption for a continuous production process, while the delivery time was assumed to be deterministic.

The purpose of this paper is to propose a simulation model to assist in determining the optimal order quantity and inventory level of a construction product under constraints typical for construction projects. Its objective is to reduce inventory management costs. A single iteration of the simulation represents the entire construction period, the delivery time is variable, and the on-site storage area is constrained. The function employed for evaluating various supply strategies incorporates a penalty mechanism to account for delays in construction caused by material shortages, along with a provision for discounts on deliveries equivalent to a full payload of a large transport vehicle.

Assumptions for the simulation model of material inventory management at the construction site

The proposed inventory management model was developed with consideration for conditions observed in practice when supplying materials directly to a constrained construction site. It has been assumed that materials will be utilized in substantial amounts and supplied in quantities commensurate with current production requirements, which are contingent on the non-uniform progress of the works. The variability of material demand can be attributed to the impact of risk factors on the performance of crews.

namicznych systemów gospodarki zapasami, w których wielkości wpływające na podejmowane decyzje są opisane zmiennymi losowymi. Pozwala ona na przeprowadzanie eksperymentów, mających na celu oszacowanie efektywności różnych strategii zarządzania zapasami [13]. Przy badaniu systemów gospodarowania zapasami stosowane są popularne systemy komputerowe, np. Arena [14, 15], Anylogic [16] czy GPSS [17], a proste modele symulacyjne analizuje się bardzo często również w arkuszach kalkulacyjnych [12].

Badania symulacyjne umożliwiają ocenę różnych systemów sterowania zapasami [18]. Najczęściej wielkością sterowaną jest **poziom zapasu bezpiecznego**, wpływający na koszty magazynowania oraz na wielkość przestojów produkcyjnych. Wielkość tej rezerwy zależy w dużej mierze od dokładności prognozowania popytu. Zwiększanie wiarygodności prognoz zmniejsza konieczność utrzymywania zapasu bezpiecznego [19]. Istotny wpływ na jego wielkość mają również czas realizacji zamówienia i jego zmienność, a także zmienność zapotrzebowania i dostępność materiałów na rynku [20].

Tworzone i badane modele pozwalają na określenie poziomu uzupełnienia zapasów [12, 15], wielkości zamówień cyklicznych [21] oraz przy ciągłej kontroli poziomu zapasu [22]. Różnią się natomiast przyjętymi założeniami i często nie uwzględniają warunków występujących w budownictwie, m.in. A. Krishnamoorthy i in. [17] analizowali model cyklicznego zamawiania materiału zaprogramowany w języku GPSS. Model ten uwzględnia jedynie losowość zużycia materiału w nieograniczonym okresie, natomiast czas realizacji dostaw przyjęto jako deterministyczny.

Celem artykułu jest opracowanie modelu symulacyjnego, wspomagającego określanie optymalnej wielkości dostaw i zapasów wyrobu budowlanego, z uwzględnieniem ograniczeń występujących przy realizacji przedsięwzięć budowlanych i umożliwiającego redukcję kosztów gospodarowania zapasami. W proponowanym modelu przyjęto założenie, że jeden przebieg symulacyjny odzwierciedla cykl budowy obiektu; czas realizacji dostaw jest zmienny oraz ograniczona jest powierzchnia placu składowego na budowie. Funkcja oceny różnych wariantów (strategii dostaw) uwzględnia kary za wydłużenie czasu budowy z powodu braku materiału oraz rabat za dostawy w ilości odpowiadającej ładowności dużego środka transportowego.

Założenia do proponowanego modelu symulacyjnego gospodarki zapasami materiałów na budowie

Proponowany model dostaw i gospodarki zapasami opracowano, uwzględniając uwarunkowania występujące często w praktyce przy dostawach materiałów bezpośrednio na plac budowy o ograniczonej powierzchni. Przyjęto, że będą one zużywane w dużej ilości i dostarczane w ilości odpowiadającej bieżącym potrzebom produkcyjnym wynikającym ze zmiennego w czasie postępu robót. Zmienność i nierównomierność zużycia materiałów jest wynikiem oddziaływań czynników ryzyka na wydajność pracy brygad roboczych.

W celu zwiększenia uniwersalności tworzonego modelu symulacyjnego przyjęto założenie, że zużycie dzienne materiału

In order to enhance the versatility of the model, it was hypothesized that the daily consumption of materials at the construction site can be described by a random variable with any type of probability distribution. The simulation program that maps the inventory management model was developed using the general-purpose simulation language GPSS World from Minuteman Software. The user can select from a range of theoretical distributions (e.g., normal, gamma, uniform, etc.) embedded in the programming language. However, it is possible to apply any user-defined empirical distribution.

In the developed model, the variable representing the on-site inventory level (the model's output) is monitored on a daily basis. In the event that the quantity of material goes below the safety stock level, an order is placed with the supplier. The order quantity is a parameter of the model and is contingent upon the predefined capacity of the means of transport. The delivery time is modeled as a discrete random variable. Its parameters are to be defined by stating possible values and corresponding probability. Moreover, the assumption on a limited capacity of on-site storage requires that actual order quantities account for the current available storage: if storage is partly filled, it can be incapable of accommodating a whole load.

Under the above assumptions, the model parameters necessary for the simulation are as follows: the distribution type and parameters of the daily material consumption, the probability distribution of the discrete random variable of delivery time (calculated from the moment of placing an order), the size of the safety stock, the maximum area of the storage yard, the capacity of the transport vehicle (corresponding to the maximum size of one delivery), the timespan of the analysis, and the number of simulation runs within one experiment.

The analysis of the simulation results (the values of the output variables) helps the user estimate the average on-site inventory level, the number of days of out-of-stock downtime, the number of full deliveries (i.e. fully utilizing the capacity of the transport vehicle) and the number of incomplete deliveries (they occur if the on-site storage cannot accommodate a full load). This output facilitates the evaluation of various strategies for the delivery and management of material stocks. As in the classic models of material management, the objective is to minimize the total cost of supply management.

In the developed model, the material supply and inventory management strategy is evaluated by means of an objective function, with the outcome expressed in monetary units, including the costs of capital tied up in inventories, cost of delivery, inventory holding, and savings that arise from discounts on orders in the size corresponding to the full capacity of the means of transport. The search is for optimal values of variables at which the objective function reaches the minimum. This function (the cost of strategy) takes the following form:

$$K = s_m \cdot r \cdot t \cdot c_j + l_d \cdot k_r + d \cdot k_d + w_s \cdot k_s - u_m \cdot l_{dp} \cdot c_j \cdot p_d$$

na budowie może być opisane za pomocą zmiennej losowej o dowolnym typie rozkładu prawdopodobieństwa. Program symulacyjny odwzorowujący model gospodarki zapasami został opracowany w języku symulacyjnym ogólnego przeznaczenia GPSS World firmy Minuteman Software. Możliwe jest wykorzystanie rozkładów teoretycznych (np. normalny, gamma, równomierny itd.), wbudowanych w tym języku programowania, ale również zaimplementowanie dowolnych rozkładów empirycznych, definiowanych przez użytkownika.

W opracowanym modelu każdego dnia sprawdzany jest stan zapasu materiału na budowie (zmienna wyjściowa modelu). W przypadku gdy jego ilość jest mniejsza od poziomu zapasu bezpiecznego, wówczas składane jest zamówienie do dostawcy. Wielkość dostawy jest parametrem modelu uzależnionym od stałej ładowności środków transportowych. Czas dostawy jest dyskretną zmienną losową, w przypadku której możliwe jest zdefiniowanie rozkładu przez określenie prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych możliwych wartości. Założono, że wielkość składowiska na budowie jest ograniczona, a w efekcie na placu budowy może być zgromadzony zapas materiału nieprzekraczający możliwości składowania na nim wyrobów budowlanych. Z ograniczonej wielkości placu budowy oraz limitowanej możliwości składowania na nim wyrobów wynika konieczność zmniejszania wielkości niektórych dostaw w przypadku wystąpienia dużych stanów zapasu materiału zgromadzonego na budowie.

Przy wymienionych założeniach parametrami modelu niezbędnymi do przeprowadzenia badań symulacyjnych są: typ i parametry rozkładu zmiennej losowej zużycia dziennego materiału; rozkład prawdopodobieństwa dyskretnej zmiennej losowej czasu realizacji dostawy (od momentu złożenia zamówienia); wielkość zapasu bezpiecznego, maksymalna powierzchnia składowiska; ładowność środka transportowego (maksymalna wielkość jednej dostawy) oraz długość okresu i liczba przebiegów symulacyjnych.

Analiza wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań symulacyjnych (wartości zmiennych wyjściowych) pozwala na oszacowanie średniego stanu zapasu materiału na składowisku, liczby dni przestoju w pracy brygad roboczych na budowie wynikających z braku materiału, liczby dostaw pełnych (wykorzystanie całej ładowności środka transportowego) i niepełnych (wynikających z ograniczonej powierzchni składowiska). Pozwala to na ocenę różnych strategii dostaw i gospodarowania zapasami materiału. Tak jak w klasycznych modelach gospodarki materiałowej dąży się do minimalizacji łącznych kosztów funkcjonowania systemu zamówień.

W opracowanym modelu strategia dostaw i gospodarowania zapasami materiału jest oceniana za pomocą funkcji celu K , wyrażonej w jednostkach pieniężnych, obejmującej koszty zamrożenia środków finansowych, dostaw, składowania wyrobu oraz uwzględniającej upust za zamówienie partii materiału o wielkości odpowiadającej pełnej ładowności środka transportowego. Poszukuje się optymalnych wartości zmiennych, przy których funkcja celu osiąga minimum. Funkcja ta (koszt strategii) przyjmuje następującą postać:

$$K = s_m \cdot r \cdot t \cdot c_j + l_d \cdot k_r + d \cdot k_d + w_s \cdot k_s - u_m \cdot l_{dp} \cdot c_j \cdot p_d$$

gdzie:

s_m – inventory level on-site, mean value for the planning horizon, in units of inventory;
 r – yearly discount rate needed to calculate cost of capital tied up in inventories [%];
 t – planning horizon (time of material consumption on site analyzed in simulation studies) [days per year];
 l_d – number of orders within the planning horizon;
 k_r – the delivery cost related with one order [PLN];
 d – out-of-stock downtime-induced delay, mean of the simulation experiment [days];
 k_d – unit cost of extending construction beyond the as-planned date set for deterministic conditions, in PLN per day;
 w – on-site storage capacity required for a particular strategy, in units of inventory;
 k_s – unit cost of holding inventory, PLN per unit of inventory;
 u_m – discounts on orders in the size corresponding to the full capacity of the means of transport [%];
 l_{dp} – number of deliveries using the full capacity of the means of transport;
 c_j – unit price of material, PLN/unit of inventory;
 p_d – maximum delivery (corresponds to the full capacity of the means of transport), units of inventor.

The model was tested on deterministic input data and comparing results with exact solutions found by means of simple analytical models.

Example of simulation studies using the model of material inventory management at the construction site

The model represents the process of erecting a building that consumes a total of 6600 units of material (units of inventory). A deterministic schedule of works defines the construction duration of 200 days (as-planned duration). The daily demand for the material is represented by a random variable of triangular distribution and the following parameters: pessimistic estimate $t_a = 300$, optimistic $t_b = 360$, most likely: $t_m = 330$. The daily consumption values (realizations of the random variable) were generated using a random number generator predefined in GPSS. The remaining inputs are as follows: $c_j = 85$ PLN/unit. (material unit price), $r = 15\%$ (yearly discount rate), $k_d = 200$ PLN (unit cost of delivery), $k_d = 3000$ PLN/day (unit penalty cost for exceeding the as-planned duration), $k_s = 1500$ PLN per 1000 units (unit cost of holding inventory), $u_m = 5\%$ (discounts on orders in the size corresponding to the full capacity of the means of transport) and $p_d = 1000$ units of material – the maximum delivery. The simulation experiment comprised 5,000 replications of the construction cycle, employing the single-simulation-run approach. In each replication, the crew installed 6,600 pieces of material. If the inventory was exhausted at any time, work was interrupted and resumed immediately after a new delivery.

As a result of the first stage of the simulation, the effect of the size of the safety stock on the average and maximum material stock and on the expected value of construction time extension was estimated. At this stage, no restrictions on the storage capacity were set, so deliveries were always made in quantities corresponding to the full capacity of the transport vehicle. Different levels of safety stock were experimented

gdzie:

s_m – średni stan zapasu materiału na składowisku w analizowanym okresie [szt.];
 r – roczna stopa dyskontowa do obliczenia kosztu zamrożenia środków finansowych w zapasach [%];
 t – długość analizowanego okresu (czas zużywania materiału na budowie analizowany w badaniach symulacyjnych) [dni/rok];
 l_d – liczba dostaw w analizowanym okresie;
 k_r – koszt transportu jednej partii materiału (koszt realizacji dostawy) [zł];
 d – średnie opóźnienie na budowie spowodowane brakiem materiału, określone w badaniach symulacyjnych [dni];
 k_d – jednostkowy koszt wydłużenia budowy ponad termin ustalony w przypadku warunków deterministycznych [zł/dzień];
 w_s – wymagana pojemność składowiska w przypadku danej strategii dostaw [szt.];
 k_s – koszt składowania jednostki materiału [zł/szt.];
 u_m – rabat za zamówienie dostawy w ilości odpowiadającej ładowności środka transportowego [%];
 l_{dp} – liczba pełnych dostaw;
 c_j – cena jednostkowa materiału [zł/szt.];
 p_d – maksymalna wielkość dostawy (odpowiadająca ładowności środka transportowego) [szt.].

Poprawność budowy modelu symulacyjnego testowano z wykorzystaniem deterministycznych danych wejściowych, a także korzystając z rozwiązania dokładnego prostych modeli analitycznych.

Przykład badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelu gospodarki zapasami materiału na budowie

Opracowany model odwzorowuje realizację budynku, w ramach której należy wbudować 6600 szt. materiału. Harmonogram realizacji, przy założeniu warunków deterministycznych, zakłada budowę w okresie dwustu dni (czas dyrektywny). Przyjęto założenie, że dzienne zapotrzebowanie na materiał jest opisane zmienną losową o trójkątnym rozkładzie prawdopodobieństwa z następującymi parametrami: oszacowanie pesymistyczne $t_a = 300$; oszacowanie optymistyczne $t_b = 360$, a najbardziej prawdopodobne $t_m = 330$ szt. Do generowania dziennego zużycia materiału wykorzystano generator zmiennych losowych predefiniowany w języku GPSS. Dodatkowo przyjęto następujące parametry i dane: $c_j = 85$ zł/szt. (cena jednostkowa materiału); $r = 15\%$ (roczna stopa procentowa); $k_d = 200$ zł (koszt realizacji jednej dostawy); $k_d = 3000$ zł/dzień (jednostkowa kara za wydłużenie czasu realizacji budowy); $k_s = 1500$ zł/1000 szt. (koszt składowania jednostki materiału); $u_m = 5\%$ (rabat za zamówienie maksymalnej wielkości dostawy) oraz $p_d = 1000$ szt. – maksymalna wielkość jednej dostawy. Przeprowadzono 5000 replikacji symulowanego cyklu budowy obiektu, stosując metodę jednego przebiegu symulacyjnego. W każdej replikacji brygada robocza wbudowywała 6600 sztuk materiału. W dniu, w którym zapas materiału osiągnął wartość zero, następowało przerwanie realizacji robót. Po dostarczeniu kolejnej partii materiału prace były kontynuowane.

W wyniku pierwszego etapu badań symulacyjnych został oszacowany wpływ wielkości zapasu bezpiecznego na średni i maksymalny stan zapasu materiału oraz na wartość oczekiwaną wydłużenia czasu budowy. Na tym etapie założono, że powierzchnia placu składowego nie jest limitowana, a zatem dostawy są realizowane w ilości odpowiadającej pełnej ładowności środka transportowego. Analizowano różne poziomy zapas bezpiecznego, stanowiące wielokrotność śred-

with, representing a multiple of the average daily consumption of material (330 units). The results of these trials are summarized in Table 1.

In the second stage of the simulation study, a constraint on the on-site storage capacity was defined to be 1,500 units of material. As comes from results of Stage 1, the option with a safety stock size of 330 units would not exceed the storage capacity, but its delays were at an unacceptable level (above 10% of the expected duration). Therefore, further analysis encompassed new options of the delivery strategy, all being modifications to the original options. The options are as follows:

1) the material will be delivered by a means of transport with a capacity of 500 units, and the level of safety stock will be 990 units. The cost of delivery for the new means of transport is PLN 120. As the delivery batch is now smaller, discounts are not available;

2) due to the limited storage capacity, deliveries smaller than the loading capacity of the means of transportation are allowed, and a choice of two types of vehicles is introduced: the first for deliveries of less than 500 units (delivery cost of 120 PLN), and the second for deliveries in the range of 500 – 1,000 units (delivery cost of PLN 200). The discounts are available only for full deliveries of 1,000 units;

3) simulations carried out with the assumptions as in Stage 1, but at safety stock level set to 500 units, prompt that maximum inventory was not greater than 1500 units. The capacity of the transport vehicle (1000 units) must be fully utilized and a discount is given each time.

The results of analysis of the three above options are summarized in Table 2. Option 2 generates the lowest total cost.

Table 2. Simulation results – stage 2

Tabela 2. Wyniki badań symulacyjnych modelu – etap 2

Delivery strategy variant/ Wariant strategii dostaw	Mean level of inventory [art]/Średni stan zapasów [szt.]	Average number of deliveries [art]/Średnia liczba dostaw [szt.]	Delivery cost [PLN]/ Koszt dostaw [zł]	Mean project delay [days]/ Średnie wydłużenie czasu budowy [dni]	Strategy cost [PLN]/ Koszt strategii [zł]
1	890,1	129,0	15480,00	6,5	49 029,79
2	1219,5	85,4	16992,78	0,5	35 591,36
3	901,5	65,0	13000,00	6,8	44 334,13

Summary and conclusions

The construction project's demand for materials is subject to variation due to the impact of random factors. It is likely that demand exceeds its estimates implied by a deterministic schedule of works. Inventories are kept to prevent out-of-stock downtime. To scale them economically, the planner should quantify the demand fluctuations and develop risk-aware inventory management strategies. Monte Carlo simulation proved to be a handy tool for solving such problems. The potential of simulation

niego dziennego zużycia materiału (330 szt.). Uzyskane wyniki z badań zostały przedstawione w tabeli 1.

W drugim etapie badań symulacyjnych szczegółowo przeanalizowano przypadek, w którym przyjęto, że stan maksymalny zapasu nie może przekroczyć 1500 jednostek materiału, co wynika z powierzchni placu składowego na budowie. Zgodnie z wynikami uzyskanymi w etapie 1, tylko przy wielkości zapasu bez-

piecznego równej 330 szt. maksymalny stan zapasu nie przekracza pojemności składowiska, ale wydłużenie czasu budowy jest na poziomie nieakceptowalnym (ponad 10% czasu dyrektywnego). Do dalszych badań przyjęto trzy warianty strategii dostaw, dokonując zmiany pierwotnych założeń. Przyjęto, że:

1) materiał będzie dostarczany środkami transportowymi o ładowności 500 szt., a poziom zapasu bezpiecznego wyniesie 990 szt.; koszt dostawy w przypadku zmienionego środka transportowego wyniesie 120 zł, a ze względu na mniejszą partię dostawy nie będzie udzielany rabat;

2) ze względu na ograniczoną powierzchnię składowiska dopuszczono możliwość dostaw mniejszych niż ładowność środków transportowych; przewidziano zastosowanie dwóch rodzajów pojazdów: pierwszy do dostawy mniej niż 500 szt. (koszt realizacji dostawy 120 zł), a drugi 500 – 1000 szt. (koszt realizacji dostawy 200 zł). Rabat jest naliczany tylko w przypadku dostaw pełnych o wielkości 1000 szt.;

3) na podstawie badań symulacyjnych, przeprowadzonych z uwzględnieniem założeń przyjętych w etapie 1, ustalono poziom zapasu bezpiecznego równy 500 szt., przy którym maksymalny stan zapasów nie przekracza 1500 szt. W pełni wykorzystana jest ładowność środka transportowego (1000 szt.) i za każdym razem udzielany jest rabat.

Wyniki badań proponowanych strategii dostaw przedstawiono w tabeli 2. Koszt zastosowania wariantu 2 strategii dostaw jest najniższy.

Podsumowanie

Ze względu na oddziaływanie czynników ryzyka zapotrzebowanie na wyroby budowlane jest zmienne i może przekraczać ilości określone na podstawie harmonogramu budowy, sporządzonego w przypadku warunków deterministycznych. Z tego względu, w celu uniknięcia przestojów w realizacji przedsięwzięć budowlanych, konieczne jest gromadzenie i utrzymywanie zapasów. Oddziaływanie czynników ryzyka na przebieg realizacji budowy powinno być uwzględniane przy tworzeniu strategii gospodarowania zapasami wyrobów, np. dzięki zastosowaniu symulacji komputerowej. Moż-

modelling to reflect the specific construction environment is evident.

The paper presented a simulation model to support the planning supplies of a construction product with random changes of demand. A single replication of the simulation represents the entire construction process. The model was constructed assuming a limited on-site storage capacity and the choice of payload capacity of the means of transport. Further, the model accounts for volume discounts on deliveries and economies of ordering batches that correspond to a full payload of the means of transport. The planer can easily compare results of simulations under a different set of constraints in search for most satisfactory strategy. The example illustrated the cost effects of manipulating the scale of safety stock as well as delivery options..

However, formulating the options, so supply strategies, is assumed to be based on experience of the user. The direction of further research will be to incorporate an optimization module into the model, allowing the search for the most economical combination of multiple variables and variants of the logistics system and, as a result, the optimal solution for construction product inventory management.

This work was funded under "Subvention for Science" of Polish Ministry of Science and Higher Education, project no. FN-06, FN-10, FD-20/IL-4/005, FD-20/IL-4/026.

Received: 24.10.2025

Revised: 28.11.2025

Published: 26.01.2026

liwość modelowania symulacyjnego złożonych relacji między elementami systemów logistycznych pozwala odzwierciedlić w nich specyficzne warunki występujące w produkcji budowlanej.

W artykule zaprezentowano model symulacyjny wspomagający planowanie dostaw wyrobu budowlanego przy zmiennej wydajności pracy brygady. Model odzwierciedla przebieg realizacji całej budowy. Przy jego opracowaniu przyjęto założenie ograniczonej powierzchni placu składowego i możliwość dostaw z wykorzystaniem środków transportowych o różnej ładowności. Uwzględniono uzyskiwanie rabatów przy dostawach większych partii oraz redukcję kosztów realizacji dostaw przy pełnym wykorzystaniu środków transportowych. Badanie modelu symulacyjnego pozwala na przeprowadzenie analizy ekonomicznej różnych wariantów strategii dostaw i kosztów utrzymywania różnej wielkości zapasu bezpiecznego, co zaprezentowano w przykładzie.

Zaproponowany w artykule model symulacyjny pozwala na analizę różnych strategii dostaw. Ich formułowanie odbywa się przez menedżera jedynie na podstawie jego doświadczenia. Kierunkiem dalszych badań będzie włączenie do modelu modułu optymalizacyjnego, pozwalającego na poszukiwanie najbardziej ekonomicznej kombinacji wielu zmiennych i wariantów systemu logistycznego zaopatrzenia budowy w wyroby budowlane, a w efekcie optymalnego rozwiązania w ramach gospodarki zapasami wyrobów budowlanych.

Praca była finansowana w ramach dotacji „Subwencja na Naukę” (MEiN) projekt nr FN-06, FN-10, FD-20/IL-4/005, FD-20/IL-4/026.

Artykuł wpłynął do redakcji: 24.10.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 28.11.2025 r.

Opublikowano: 26.01.2026 r.

Literature

- [1] Chen P.-H, Nguyen TC. A BIM-WMS integrated decision support tool for supply chain management in construction. *Automation in Construction* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.019>.
- [2] Vipin VP, Shabeen SR. Factors affecting material management in construction industry *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* 2019; <https://doi.org/10.35940/ijrte.C6337.098319>.
- [3] Jaśkowski P. Model gospodarki zapasami materiałów budowlanych używanych nierównomiernie. *Gospodarka Materiałowa & Logistyka*. 2013; 15 – 19.
- [4] Georgy M, Yasmina S. Using genetic algorithms in optimizing construction material delivery schedules. *Construction Innovation: Information, Process, Management*. 2008; <https://doi.org/10.1108/14714170810846503>.
- [5] Son PVH, Duy NHC, Dat P.T. Optimization of Construction Material Cost through Logistics Planning Model of Dragonfly Algorithm – Particle Swarm Optimization. *KSCE J CivEng*. 2021; <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1427-5>.
- [6] Kowalik MJ, Baran J. Zastosowanie symulacji Monte Carlo do zarządzania zapasami. *Logistyka*. 2014; 4: 3591 – 3597.
- [7] Beier F, Rutkowski K. *Logistyka, Szkoła Główna Handlowa, Warszawa*; 1995.
- [8] Andoaga-Mejia MA, Susana Casy Téllez-Ballesteros SC, Solis-Vivanco H. Determination of an optimal inventory system, and safety factor, in a MSME, through Monte Carlo simulation. *Proceedings of the 22nd International Conference on Modelling and Applied Simulation MAS 2023*. 2023; <https://doi.org/10.46354/i3m.2023.mas.004>.
- [9] Okorocho KA. Factors affecting effective materials management in building construction projects – A case study of selected building sites, in Imo State, Nigeria. *International Journal of Management Sciences and Business Research*. 2013; 2(4): 50 – 59.
- [10] Barros J, Cortez P, Carvalho MS. A systematic literature review about dimensioning safety stock under uncertainties and risks in the procurement process. *Operations Research Perspectives*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.orp.2021.100192>.
- [11] Chen Z, Hammad AWA, Alyami M. Building construction supply chain resilience under supply and demand uncertainties. *Automation in Construction*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105190>.

- [12] Abuizam R. Optimization of (s, S) periodic review inventory model with uncertain demand and lead time using simulation. *International Journal of Management & Information Systems*. 2011; <https://doi.org/10.19030/ijmis.v15i1.1597>.
- [13] Chang Y, Makatsoris H. (2001). Supply chain modeling using simulation. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*. 2001; 2(1): 24 – 30.
- [14] Hairullidzam, N, Bareduan SA. Modelling and simulation of a company inventory using Arena Software. *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering*. 2023; 1: 40 – 46.
- [15] Baharom N, Hamzah P. Inventory optimization using simulation approach. *Journal of Computing Research & Innovation*. 2018; <https://doi.org/10.24191/jcrrinn.v3i2.93>.
- [16] Straßer S, Altendorfer K, Peirleitner AJ. Sensitivity Analysis of simulation study results on safety stock relaxation in material requirement planning. *Proceedings of the 10th International Conference on Advances in System Simulation*. 2018; 23 – 28.
- [17] Krishnamoorthy A, Naresh K, Prabakaran N, Kannadasan R. GPSS Simulation of inventory with periodic review. *IJSRD – International Journal for Scientific Research & Development*. 2015; 3(03): 2321 – 0613.
- [18] Neetu. Simulation and its applications in inventory control. *National Workshop-Cum-Conference on Recent Trends in Mathematics and Computing (RTMC)*. Proceedings published in *International Journal of Computer Applications® (IJCA)* 2011. 2012; 21-25. Tebaldi L, Bigliardi B, Filippelli S, Bottani. E. EOJ or EOQ? A simulation study for the inventory management of a company operating in the railway sector. *Procedia Computer Science* 217. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.353>.
- [19] Persson F, Axelsson M, Edlund F, Lanshed C, Lindström A. Using simulation to determine the safety stock level for intermittent demand. *Proceedings of the 2017 Winter Simulation*. 2017; <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8248089>.
- [20] Gonçalves JNC, M. Carvalho S, Cortez P. Operations research models and methods for safety stock determination: A review. *Operations Research Perspectives*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.orp.2020.100164>.
- [21] Tebaldi L, Bigliardi B, Filippelli S, Bottani. E. EOJ or EOQ? A simulation study for the inventory management of a company operating in the railway sector. *Procedia Computer Science* 217. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.353>.
- [22] Maitra S. Inventory management under stochastic demand: A simulation-optimization approach. 2024; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.19425>.