

Modele symulacyjne zagadnień transportowych w programie Arena

Paweł Sutowski, Marzena Sutowska

W artykule przedstawiono modele symulacyjne zdefiniowane za pomocą programu Arena firmy Rockwell Automation, Inc. Każdy z opisanych w pracy modeli posiada własną strukturę i odpowiada przyjętemu algorytmowi wyboru racjonalnego przydziału trasy transportowej. Kryterium wyboru najlepszego wariantu (i tym samym najskuteczniejszego modelu) był całkowity koszt transportu zamówionego towaru z 6 różnych magazynów hurtowni budowlanej. Przeprowadzona w artykule analiza wykazała przydatność zastosowania modeli komputerowych i przeprowadzania symulacji do rozwiązywania zagadnień transportowych.

Wstęp

Transport drogowy, stanowiący ważny element systemów logistycznych, wymaga ciągłego procesu zarządzania i optymalizacji, co wiąże się z rozwiązywaniem licznych sytuacji problemowych. Jedną z takich sytuacji, występujących w logistyce transportu drogowego, jest wielokryterialna optymalizacja procesu dostarczania ładunku do wielu odbiorców [11]. Przykładem rozwiązania tego rodzaju problemu może być zagadnienie optymalizacyjne TSP (travelling salesman problem), znane jako problem komiwojażera [12]. Podobnym problemem, który omówiono w niniejszym artykule, jest opracowanie planu przewozów towaru z kilku różnych źródeł zaopatrzenia do wielu punktów odbioru. Gęsta sieć dróg transportowych stanowi wyzwanie dla służb logistycznych, których rolą jest minimalizacja kosztów przy jednoczesnym zapewnianiu terminowych dostaw. Przykładem tu mogą być przedsiębiorstwa z rozbudowywaną flotą transportową, takie jak: liczne firmy obsługi przesyłek (DHL International GmbH — Bonn, Germany; UPS — United Parcel Service of America, Inc. — Sandy Springs, Georgia, USA), przedsiębiorstwa dystrybucyjne (Kolporter z o.o. — Kielce, Poland), przedsiębiorstwa produkcyjne (Drutex S.A. — Bytów, Poland) oraz hurtownie.

W niniejszym artykule podjęto próbę rozwiązania zagadnienia transportowego z wykorzystaniem oprogramowania symulacyjnego.

1. Metody rozwiązywania zagadnień transportowych

Rozpatrywane w artykule zagadnienie transportowe można opisać za pomocą ogólnego modelu sformułowanego przez Hitchcocka [3]. Model ten umożliwia opracowanie planu przewozów towaru z kilku różnych źródeł zaopatrzenia (np. magazyny, hurtownie) do kilku odbiorców zgłaszających zapotrzebowanie. W modelu Hitchcocka występuje R dostawców oraz N odbiorców. Zapotrzebowanie każdego z odbiorców

wynosi B_j jednostek, natomiast możliwości dostawców określone są zmienną A_i . Model uwzględnia możliwość zaopatrywania dowolnego odbiorcy przez dowolnego dostawcę. Zadanie transportowe najczęściej dotyczy analizy kosztów transportu, ale może także uwzględniać odległości lub czas transportu na poszczególnych trasach. Warunkiem rozwiązania modelu jest przewaga łącznej podaży dostawców nad łącznym popytem odbiorców [4, 7, 9]:

$$\sum_{i=1}^R A_i \geq \sum_{j=1}^N B_j \quad (1)$$

W sytuacji równoważenia się podaży i popytu, model dotyczy zamkniętego zagadnienia transportowego. Dla tego przypadku, opracowany model składa się z warunków dla dostawców i odbiorców oraz warunków brzegowych [4, 7, 9]:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = A_i \quad \text{i} \quad \sum_{i=1}^R x_{ij} = B_j \quad \text{oraz} \quad x_{ij} \geq 0. \quad (2)$$

Kryterium oceny rozwiązania rozpatrywanego problemu transportowego może być np. minimalizacja łącznych kosztów transportu, które wyrażają się przez sumę iloczynów jednostkowych kosztów przewozu i wielkości transportu od poszczególnych punktów nadania do poszczególnych punktów odbioru.

Uniwersalną metodą rozwiązania zagadnień transportowych jest algorytm transportowy, który został szczegółowo opisany w pracy [10] i oparty jest na wyszukiwaniu rozwiązań dopuszczalnych oraz ich optymalizacji. Do tego celu, najczęściej wykorzystuje się proste metody programowania liniowego. Składają się one z dwóch etapów: wyznaczenia rozwiązania dopuszczalnego oraz kolejnych obliczeń iteracyjnych prowadzących do otrzymania rozwiązania optymalnego. Do metod tych zalicza się szeroko znane i stosowane procedury, m.in.: metodę kąta północno-zachodniego [2, 5, 13], metodę minimalnego elementu macierzy kosztów (LCM) [8, 13], metodę aproksymacyjną Vogla (VAM) [6, 13], czy też nowe, alternatywne procedury rozwiązania problemu — np. metodę ASM [1, 6].

2. Metodyka badań symulacyjnych

Celem badań było porównanie racjonalności wyników generowanych przez algorytmy transportowe w rozwiązywaniu problemu przydziału tras oraz przedstawienie możliwości skutecznej ich implementacji w postaci modeli komputerowych i zastosowaniu technik symulacyjnych.

Do modelowania i symulacji rozpatrywanego problemu transportowego zastosowano program Arena 14.70.0 firmy Rockwell Automation, Inc. (Milwaukee, Wisconsin, USA).

Badania symulacyjne wykonano dla systemu transportowego składającego się z sześciu hurtowni/magazynów (oznaczenia kodowe: $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$), z których towar jest odbierany przez sześciu różnych odbiorców (oznaczenia kodowe: $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$). Magazyny należą do przedsiębiorstwa extrDACH Hurtownia Materiałów Budowlanych (Polska, centrala: Szczecin), posiadającego swoje oddziały w sześciu miejscowościach (tab. 1), natomiast odbiorcami są podwykonawcy zatrudnieni przez dewelopera budującego domki jednorodzinne w zachodniej części Polski (na życzenie dewelopera nazwa firmy nie została ujawniona w artykule).

Tab. 1. Odległości między punktami transportowymi

Dostawca (hurtownia)	Miejsce odbioru					
	Stara Studnica (P_1)	Kalisz (P_2)	Kwilicz (P_3)	Leszno (P_4)	Poleczyn-Zdrój (P_5)	Czaplinek (P_6)
Szczecin (M_1)	117	399	177	280	141	133
Gorzów Wielkopolski (M_2)	106	297	74.8	178	167	136
Koszalin (M_3)	111	397	317	314	59	88.1
Wrocław (M_4)	327	123	213	105	369	338
Łódź (M_5)	367	105	266	244	402	371
Poznań (M_6)	181	137	79.6	80.5	216	185

(na podstawie Google Maps, Google Inc., Mountain View, CA, USA) — wartości w km

Zasadniczym celem przeprowadzonych badań była optymalizacja (minimalizacja) kosztów transportu zmagazynowanych wyrobów. Jako przykład wyrobów do analizy wybrano dachówkę ceramiczną typu Piemont (kolor: kasztan) produkcji Röben Polska Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. K. (Polska, siedziba: Środa Śląska). Waga pełnej palety dachówek to 983 kg. Jako środek transportowy przyjęto samochód ciężarowy dostawczy wyposażony w hydrauliczny żuraw przeładunkowy. W analizach założono, że ładowność pojazdu wynosi 11,000 kg, przy wymiarach skrzyni ładunkowej 2.48x6.40 m.

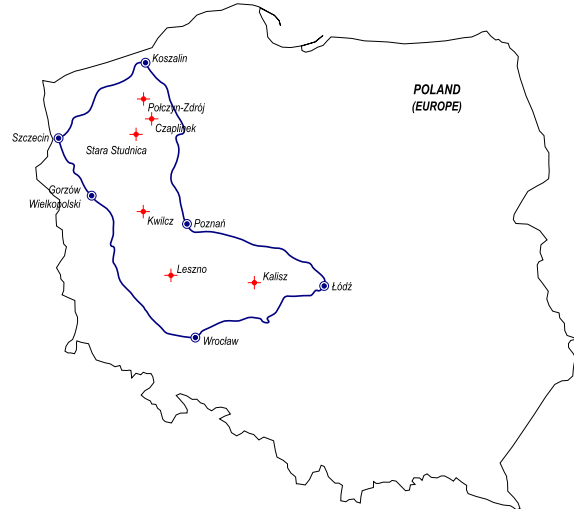
Przyjęte założenia pozwalają równomiernie obciążyć skrzynie transportową 10 paletami dachówek. Przyjęte koszty jednostkowe transportu, podaż dostawców oraz popyt odbiorców zestawiono w tab. 2. W trakcie przeprowadzania analiz, możliwości dostawy wskazanego towaru były ograniczone, co ujmuje zmienna A_i (dostępność towaru — równoważna ze wskaźnikiem available-to-promise, ATP).

Tab. 2. Koszty jednostkowe transportu

Dostawca (hurtownia)	Miejsce odbioru						A_i
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	
M_1	900	3,069	1,362	2,154	1,085	1,023	40(4)
M_2	800	2,242	565	1,343	1,260	1,026	50(5)
M_3	950	3,398	2,713	2,687	505	754	40(4)
M_4	2,500	940	1,628	803	2,821	2,584	80(8)
M_5	2,914	834	2,112	1,938	3,192	2,946	70(7)
M_6	1,496	1,132	658	665	1,785	1,529	60(6)
B_j	35(4)	60(6)	40(4)	50(5)	80(8)	60(6)	+15(1)*

Uwaga: Wartości kosztów podane w PLN brutto, wartości bieżącego popytu (wiersz B) oraz bieżącej podaży (kolumna A) wyrażone są w dwóch jednostkach: w paletach oraz w liczbie kursów transportowych (wartości w nawiasie). * — nadwyżka podaży do popytu.

Graficzną formę rozpatrywanego problemu transportowego zaprezentowano na rys. 1.



Rys. 1. Rozmieszczenie dostawców i odbiorców

Zmienne decyzyjne x_{ij} , oznaczające ilość przewożonego materiału z i -tego magazynu do j -tego odbiorcy, tworzą trzydziestosześcioelementową macierz, dla której określono funkcję celu:

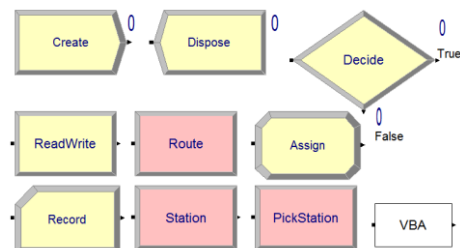
$$TC = 900x_{11} + 3069x_{12} + \dots + 20x_{16} + 800x_{21} + 2,242x_{22} + \dots + 1,026x_{26} + \dots + 1,496x_{61} + 1,132x_{62} + \dots + 1,529x_{66} \rightarrow \text{minimum.}$$

gdzie: K – łączne koszty transportu, x – macierz zaplanowanych wielkości przewozu towaru.

Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem serii modeli realizujących odmienne metodyki poszukiwania rozwiązania problemu. Konceptje modelu symulacyjnego obejmowały: model losowy (model nr 1), model największej podaży-popytu (model nr 2), model minimalnego elementu macierzy kosztów (model nr 3), model kąta północno-zachodniego (model nr 4) oraz model oparty na metodzie ASM (model nr 5).

Wszystkie typy modeli opracowano w taki sposób, aby w pełni odzwierciedlały metody programowania liniowego stosowane w rozwiązywaniu zagadnień transportowych.

Do opracowania modeli posłużono się blokami funkcjonalnymi z grup: Basic Process (moduły: Create, Dispose, Assign, Decide), Advanced Process (ReadWrite) oraz Advanced Transfer (moduły: Station, Route, PickStation) — rys. 2.

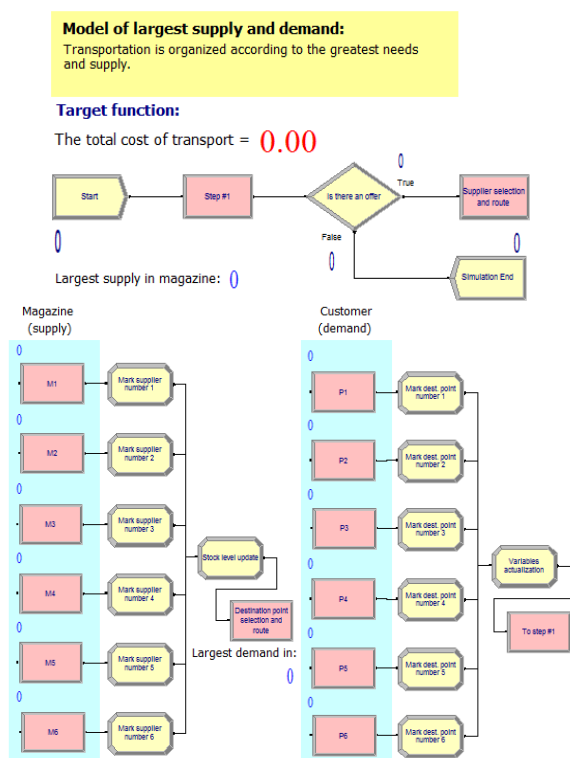


Rys. 2. Graficzna postać modułów programu Arena użytych w modelach symulacyjnych

3. Wyniki badań symulacyjnych

W przypadku modelu losowego, przyjęto założenie, że przewozy między magazynami a odbiorcami są realizowane wyłącznie w sposób przypadkowy. Wyniki badań modelu wykazały, że całkowity koszt transportu, przy losowym rozmieszczeniu przewozów między magazynami a odbiorcami, zawiera się w przedziale od **33,047 PLN** do **80,335 PLN**. Dla 200 oraz 500 powtórzeń otrzymano najniższy łączny koszt transportu, który wyniósł **33,047 PLN**. Ze względu na rozstęp wartości oraz czas symulacji należy przyjąć 200 powtórzeń jako optymalne.

Drugi opracowany i analizowany model symulacyjny dotyczył wariantu, w którym rozmieszczenie przewozów odbywa się wg. warunku największej podaży i popytu (rys. 3). Metodą tą można otrzymać rozwiązanie dopuszczalne zadania transportowego, więc z reguły służy do znalezienia wstępnego rozwiązania bazowego.



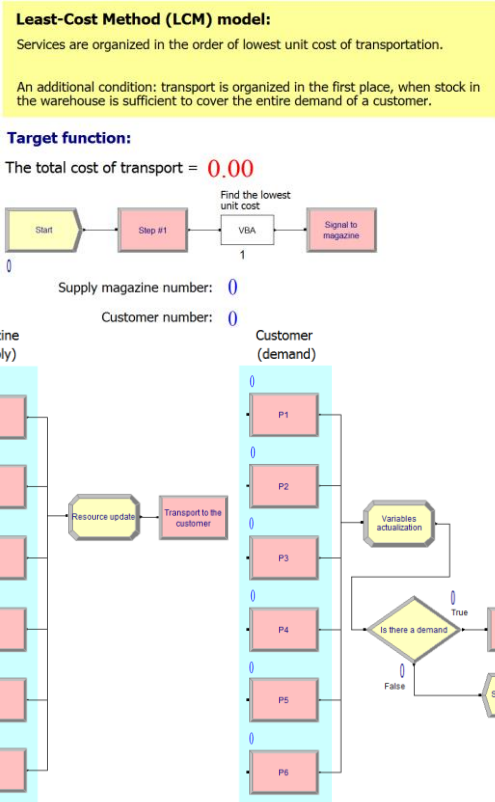
Rys. 3. Diagram blokowy struktury logicznej modelu w wariacie największej podaży-popytu

Zastosowany algorytm ustala bieżącą maksymalną wartość podaży wśród wszystkich magazynów, a w następnym kroku wyszukuje bieżące maksymalne potrzeby zgłaszane przez odbiorców. Transport następuje między uczestnikami łańcucha dystrybucyjnego spełniającymi ten warunek. Realizacja algorytmu umożliwia rozwiązanie problemu transportowego przy łącznych kosztach transportu na poziomie **57,913 PLN**.

W przypadku modelu działającego w oparciu o metodę minimalnego elementu macierzy (rys. 4), algorytm doboru dostawcy i odbiorcy wyszukuje najniższą aktualną wartość

kosztów transportowych, uwzględniając przy tym wyłącznie odbiorców, których popyt nie został aktualnie zrealizowany.

Dodatkowy warunek, organizuje wybór magazynu, w przypadku którego zapasy są wystarczające do pokrycia zapotrzebowania danego odbiorcy w całości. Jeżeli warunek ten nie może być spełniony, jest on pomijany, a transport odbywa się wyłącznie z uwzględnieniem kosztów.



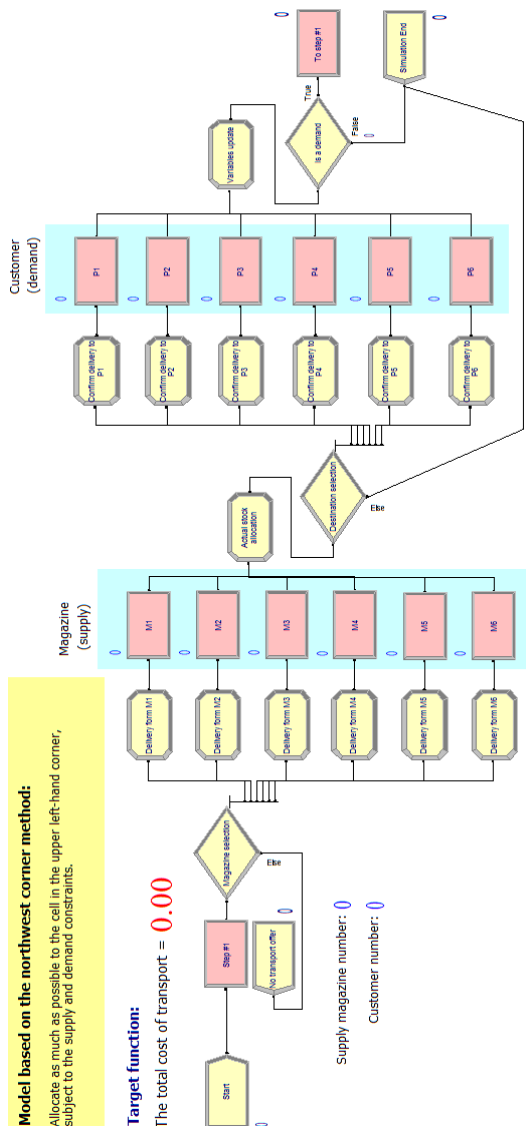
Rys. 4. Diagram blokowy struktury logicznej modelu w wariacie minimalnego elementu macierzy

Realizacja pełnej procedury wyboru magazynów i odbiorców, zapewniła uzyskanie rozwiązania, dla którego koszty transportu dachówek wynoszą **42,068 PLN**.

Diagram blokowy struktury logicznej modelu, wykonanego w programie Arena, dla wariantu metody kąta północno-zachodniego przedstawiono na rys. 5. Metoda kąta północno-zachodniego nie bierze pod uwagę kosztów i zwykle stosowana jest do wyznaczenia wstępnego rozwiązania, które może być poprawiane w kolejnych iteracjach algorytmu transportowego [4]. Opracowany model symulacyjny posiada w pełni zaimplementowaną procedurę realizowaną w ramach programowania liniowego dla zagadnienia transportowego [4, 7, 9]. Dobór przewozów dokonywany jest przez wypełnianie macierzy, rozpoczynając od komórki w lewym górnym rogu.

Wpisuje się do niej mniejszą wartość z pary: zapas w magazynie (A_i) i zgłoszone zapotrzebowanie (B_j). Następnie, wg metodyki wyznaczonej przez algorytm metody, następuje przesunięcie do komórki z prawej strony (jeżeli istnieje jeszcze towar do wydania z danego magazynu) lub do komórki leżącej poniżej aktualnej (jeżeli podaż danego dostawcy rozdzielono już między odbiorców). Koszty transportu materiałów wyznaczone

za pomocą opracowanego modelu są względnie wysokie i wynoszą 67,374 PLN.



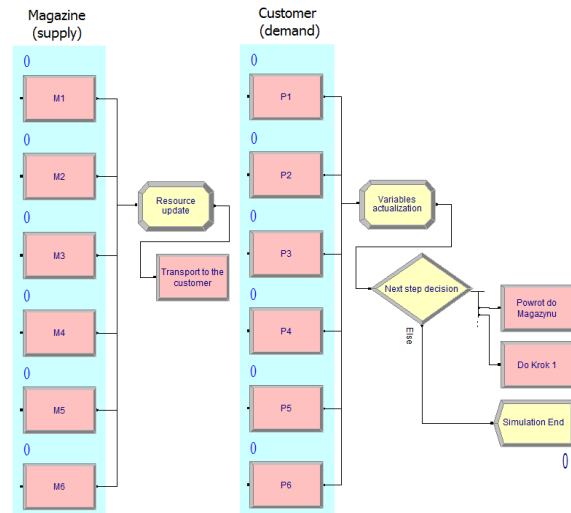
Rys. 5. Diagram blokowy struktury logicznej modelu w wariacie metody kąta północno-zachodniego

Kolejną metodą służącą do wyznaczania rozwiązania dopuszczalnego, które może być ewentualnie poprawiane w kolejnych krokach optymalizacyjnych, jest metoda ASM, w oparciu o którą zbudowano model symulacyjny zaprezentowany na rys. 6. W tym modelu symulacyjnym zaimplementowano procedurę ściśle wg metody ASM, która rozmieszcza przewozy głównie na trasach, na których koszty są najniższe [4, 9].

W pierwszym kroku, wywoływany jest kod programowy przekształcający macierz kosztów, tak aby w każdym wierszu i kolumnie wystąpił koszt zerowy. W drugim korku, spośród komórek zerowych macierzy przekształconej, dobierana jest trasa o najniższym koszcie jednostkowym. Jeżeli w macierzy przekształconej nie ma komórek z pojedynczym zerem w danym wierszu i kolumnie, to analizowana jest sytuacja z wieloma zerami w wierszu i jednym zerem w kolumnie. Procedura ta trwa

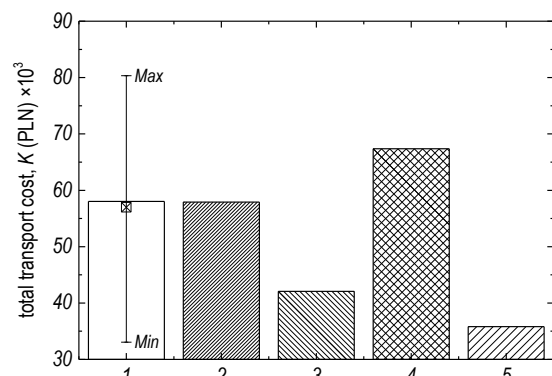
w sposób iteracyjny do momentu ustalenia pełnego planu przewozów.

W rozpatrywanym przypadku udało się rozmieścić wszystkie przewozy do elementów macierzy o wartościach zerowych (koszty jednostkowe), co oznacza, że uzyskano optymalny plan przewozów. Całkowity koszt transportu towarów z magazynów do odbiorców wynosi 35,818 PLN.



Rys. 6. Diagram blokowy struktury logicznej modelu opartego na metodzie ASM

Opracowane modele symulacyjne, o strukturze reprezentującej wybrane metody programowania liniowego, przeznaczone do rozwiązywania zagadnień transportowych, pozwoliły uzyskać różne rozwiązania dopuszczalne. Wszystkie otrzymane w trakcie prac eksperymentalnych wyniki, wskazują znaczny rozstęp całkowitych kosztów transportu dachówek — w przedziale od 33,047 do 80,335 PLN (rys. 7).



Rys. 7. Porównanie wyników symulacji w postaci łącznych kosztów transportu dla analizowanych modeli symulacyjnych (1 – model losowy, 2 – model największej podaży-popytu, 3 – model minimalnego elementu macierzy, 4 – model kąta północno-zachodniego, 5 – model ASM)

Analiza wartości całkowitych kosztów realizowanego planu przewozów, wykazała, że najgorszy wynik otrzymano stosując model skonstruowany w oparciu o metodę kąta północno-zachodniego (67,374 PLN). Wynika to z faktu, że model ten nie

uwzględnia kosztów jednostkowych. Korzystniejsze wyniki uzyskano dla modelu losowego oraz modelu największej podaży-popytu (na poziomie **57,900 PLN**). Modele 3 i 5, które skupiają się na kosztach pozwalają uzyskać korzystniejsze rezultaty. Najniższe koszty transport (**35,818 PLN**) uzyskano dla modelu opartego na metodzie ASM, która wg autorów pozwala określić optymalne rozwiązanie, w zaledwie kilku iteracjach [6] (model 5). W przypadku zastosowania kilkuset powtórzeń można zastosować model losowy, który pozwolił uzyskać jeszcze niższy koszt — **33,047 PLN**.

Podsumowanie

Nowoczesne narzędzia symulacyjne, takie jak oprogramowanie Arena, pozwala zdefiniować struktury logiczne modeli, które odzwierciedlają procedury opisane w metodach rozwiązywania zagadnień transportowych, a w szerszym pojęciu problemów przydziału.

Zastosowanie technik symulacyjnych pozwoliło uzyskać zestaw dopuszczalnych wariantów planów przewozów towaru między magazynami a odbiorcami. Każdy z opracowanych modeli może posłużyć jako skuteczne narzędzie do wspomagania rozwiązania zagadnienia transportowego, przy czym najlepsze rezultaty w postaci minimalnych kosztów uzyskuje się przy zastosowaniu modelu realizującego metodę ASM lub dla modelu losowego.

Użycie modeli symulacyjnych pozwala uniknąć żmudnych analiz, szczególnie w przypadku dużej skali (znaczna liczba dostawców i odbiorców) i rosnącej z nią złożoności obliczeń. Ponadto, problem harmonogramowania przewozów, z którym możemy mieć do czynienia w rzeczywistości, w tym otwarte zagadnienia transportowe, zagadnienia transportowo-produkcyjne, zagadnienia lokalizacji produkcji, czy też minimalizacja pustych przebiegów, z reguły mogą być w prosty sposób przekształcone do postaci zamkniętego zagadnienia transportowego, a tym samym rozwiązane z użyciem jednego z opracowanych modeli symulacyjnych.

Dodatkową zaletą modelowania i symulacji problemów transportowych, jest możliwość łatwego wprowadzenia dodatkowych warunków i analiz, np. statystycznych. Szczególnymi przykładami mogą tu być analiza wykorzystania zasobów, wprowadzenie planowanych przestojów lub awarii środków transportowych. Każda jednostka w modelu symulacyjnym może być opisana parametrami powiązаныmi relacjami i obciążonymi określonym rozkładem prawdopodobieństwa, co daje szerokie możliwości stosowania pakietów symulacyjnych do rozwiązywania zagadnień transportowych.

Bibliografia

- Godsell J., Hoek R., *Fudging the supply chain to hit the number: five common practices that sacrifice the supply chain and what financial analysts should ask about them*. Supply Chain Management: An International Journal, vol. 14, no. 3, 2009.
- Hasan M.K., *Direct Methods for Finding Optimal Solution of a Transportation Problem are not Always Reliable*. International Refereed Journal of Engineering and Science, vol. 1, no. 2, 2012.
- Hillier F.S., Lieberman G.J., *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill Series, 7 edition, 2001.
- Hitchcock F.L., *The distribution of a product from several sources to numerous localities*, MIT Journal of Mathematics and Physics, vol. 20, 1941.
- Jędrzejczyk Z., Kukuła K., Skrzypek J., Walkosz A., Kukuła K., *Badania operacyjne w przykładach i zadaniach*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- Papageorgiou G., Damianou P., Pitsillides A., et al., *Modelling and Simulation of Transportation Systems: a Scenario Planning Approach*, Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, vol. 50, no. 1–2, 2009.
- Quddoos A., Javaid S., Khalid M.M., *A New Method for Finding an Optimal Solution for Transportation Problems*, International Journal on Computer Science and Engineering, vol. 4 no. 7, 2012.
- Razumikhin B.S., *Classical Principles and Optimization Problems*, Springer Science+Business Media Dordrecht, 1987.
- Royston J.P., *A remark on algorithm AS181: The test for normality*, Applied Statistics, vol. 44, no.4, 1995.
- Sakarovitch M., *Linear Programming*, Springer Science+Business Media, LLC. New York, 1983.
- Stadnicki J., *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji z przykładami zastosowań technicznych*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2006.
- Stajniak M., Hajdul M., Foltiński M., Krupa A., *Transport i spedycja*, Biblioteka Logistyka, Poznań 2008.
- Tylicki H., Gorzelańczyk P., *Problemy występujące w logistyce transportu drogowego oraz sposoby ich rozwiązywania*, Logistyka, vol. 6, 2011.

The simulation models of transport problems solving with Arena software

The paper presents simulation models defined with Arena of Rockwell Automation, Inc. Each of the five models described in the article has its own structure and corresponds to the adopted algorithm to choose the rational allocation of transport routes. The criterion for choosing the best option (and thus the most effective model) was the total cost of transport of goods ordered from 6 different storage of wholesale building materials supplier. Carried out in the article analysis showed the usefulness of the use of computer modelling and simulation to solve transportation problems.

Autorzy:

dr inż. **Paweł Sutowski** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji.

dr inż. **Marzena Sutowska** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Centrum Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych.