

Jarosław ZIOŁKOWSKI, Aleksandra LĘGAS

Military University of Technology (Wojkowa Akademia Techniczna)

MINIMISATION OF EMPTY RUNS IN TRANSPORT

Minimalizacja pustych przebiegów w transporcie

Abstract: *The issue of minimisation of empty runs in transport, assumptions and calculation method were presented. The example of ineffective usage of transport means was described as well as a procedure algorithm for the optimisation of the above-mentioned issues using the Solver module.*

Keywords: transport, optimisation, minimisation of empty runs in transport, Solver module, Excel

Streszczenie: *Prezentowana została problematyka minimalizacji pustych przebiegów w transporcie, założenia oraz metodyka obliczeń. Zaprezentowano przykład nieefektywnego wykorzystania środków transportu, a także algorytm postępowania w celu optymalizacji ww. zagadnienia z wykorzystaniem modułu Solver.*

Słowa kluczowe: transport, optymalizacja, minimalizacja pustych przebiegów w transporcie, moduł Solver, Excel

1. Introduction

Transport has a substantial impact both on the society – in view of the creation of workplaces, and on the economy – it is a significant factor of the development and industrial growth. On 1 May 2017, it was 13 years since Poland acceded to the European Union. During these years the transport system of Poland underwent fundamental changes, both structural, quantitative as well as qualitative. Liberalisation of trade contributed to the internationalisation of the activity of Polish carriers. Thanks to the European support funds, a considerable amount of money was allotted for the development of transport infrastructure, which led to the improvement of traffic safety, but purchase and modernisation of transportation improved the quality of the provided services.

The analysis of statistical data will enable to demonstrate the contribution of certain transport branches in transporting freight (fig. 1) and passengers (fig. 2) in Poland in recent years.

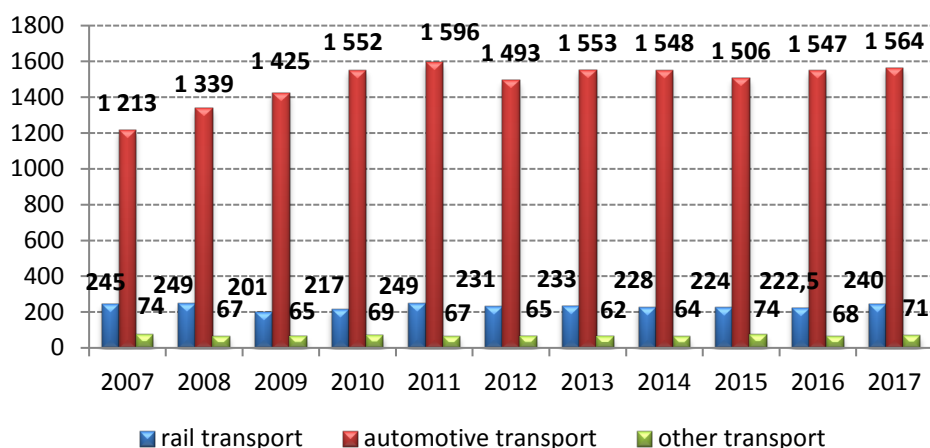


Fig. 1. Structure of freight transport in Poland for the years 2007–2017 [mln ton]

Source: own elaboration based on www.stat.gov.pl.

In 2017, 1875 mln tonnes were transferred by all means of transport, i.e. by 2.1% more than in 2016. The increase in freight transport was reported in all transport modes. The most significant share, because even 83.4% constituted automotive transport. The next position was occupied by rail transport – 12.8%, then, pipeline transport – 3%, other means of transport – below 1%.

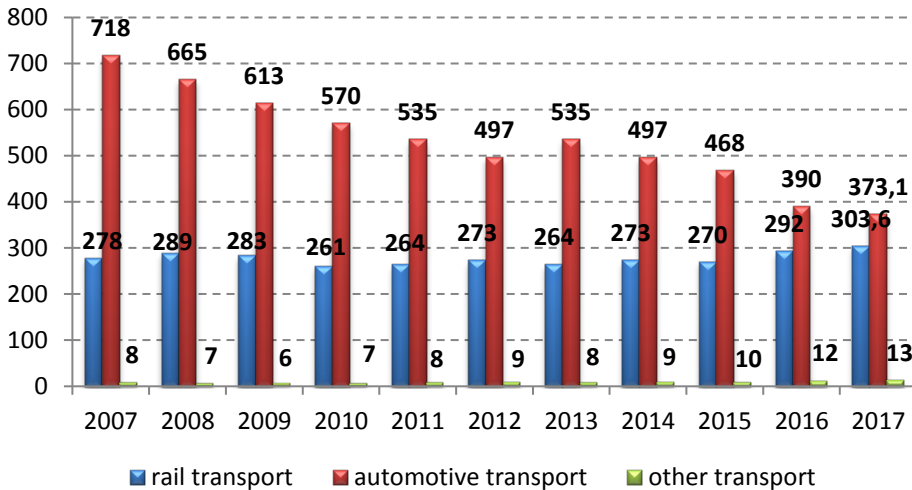


Fig. 2. Structure of passengers' transport in Poland for the years 2007–2017 [mln ton]

Source: own elaboration based on www.stat.gov.pl.

In 2017, by public transport a total of 689.7 mln passengers were transported, i.e. by 0.6% less than in 2016. The most significant share – above 54.2% – constituted a carriage of passengers in automotive transport. The second position was occupied by rail transport – 44% and then, aircraft transport – 1.3%, other means of transport achieved the result below 1%.

Transport signifies a production process, which results in the change in spatial sales of the transport object (freight or passengers), satisfying specific needs [1]. As mentioned previously, transport plays a significant role in the social and economic area of the country, because it affects the intensification of the development of particular branches of national economy [8] and substantially contributes to the creation of the gross domestic product.

Optimisation of transport tasks leads to the increase of efficiency of the company's operation. One of its primary aspects is the full use of load capacity and minimisation of empty runs [3]. The problem of the minimisation of empty runs is connected with the creation of the optimum transit plan of the means of transport within a given network. Optimum means the one for which the number of vehicle-kilometres travelled without freight will be minimum. Besides, limitations as regards utilising the supply of the empty means of transport have to be satisfied as a part of the network and unsatisfied demand [4].

The occurrence of empty runs is not advantageous because it leads to the growing costs of the company. The issue of empty runs concerns especially the

companies which carry out haulages for their own needs and on one's own account (own account transport) as well as smaller transport companies providing such services on request (commercial transport) [2]. In the second situation, the possibilities to minimise empty runs are much more limited than in the case of a company with the developed transport fleet or cooperating with other carriers. The problem of empty runs may concern every transport branch except for pipeline transport, but it is the most painful in automotive transport. Currently, thanks to the current monitoring of haulages by GPS systems and the application of virtual vehicle and freight market, the problem of empty runs can be alleviated [6].

According to the data from the Polish Central Statistical Office from 2016, the empty runs constituted 33% of all transfers in Poland and 15% of international shipments [7].

2. Assumptions and calculation method

The companies which pursue the economic activity incur the costs arising in general from the consumption of sources, but the effect of their activity is manufacturing products, providing services or selling goods [9]. One of the cost components is a rationalisation of using transport modes related both to the optimum use of the load area, determining the shortest shipment route and the reduction of empty runs.

The assumptions of the minimisation of empty runs in transport:

- haulages performed as a part of one transport branch (e.g. rail transport, automotive transport, etc.);
- the same means of transport (load capacity) are used;
- transport is provided between various fixed points in the transport network;
- each point can serve as the place for loading and unloading;
- the number of points is known and permanent, and haulages are carried out only between them (There are imported and exported freights of a given size and within the time limit to and from each transit point);
- schedule of haulages between transit points is known, and transport volumes are expressed in the number of transportation means of the given type;
- distances between the points in the transport network are given;
- only haulages carried out with the total number of the means of transport of a given type are permitted;
- there are suppliers of empty means of transport (import larger than export);
- there are recipients of empty means of transport (export larger than import);

The optimum trip schedule of empty means of transport (from suppliers to recipients) in a transport network should characterise by a minimum number of empty vehicle-kilometres, and:

- using the supply of empty means of transport,
- meeting the demand for the empty means of transport [6].

Assuming that i, j will be the numbers of transit points $i, j = 1, \dots, n$, then, the decision variable will be the empty list of the means of transport x_{ij} , which should be moved from i -transit point (suppliers of the empty means of transport) to the j -transit point (recipients of the empty means of transport).

Below there are essential data to complete this task [6]:

d_{ij} – distance from i - to the j -transit point,

c_{ij} – transport volume from i - to j - transit point (the number of the full load means of transport),

e_i – the volume of export of freight from i - transit point (the number of the full load means of transport), thus:

$$e_i = \sum_{j=1}^n c_{ji} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

where i_i – transport volume of shipment from i -transit point (the number of the full load means of transport), and thus:

$$i_i = \sum_{j=1}^n c_{ji} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

whereby, for the whole transport network (but not necessarily for particular transit points) the number of the means of transport exporting freight has to be equal to the number of the means of transport used for the import of freight (closed issue), thus the following equation has to be satisfied:

$$\sum_{i=1}^m e_i = \sum_{i=1}^m i_i \quad (3)$$

transit points, for which $e_i < i_i$, are suppliers of the empty means of transport, and their supply takes the form of:

$$a_i = i_i - e_i \quad (a_i > 0) \quad (4)$$

transit points, for which $e_i > i_i$, are recipients of the empty means of transport, and the demand for them is as follows:

$$b_j = e_j - i_j \quad (b_j > 0) \quad (5)$$

transit points, for which $e_i = i_i$, are omitted in the analysis – there is no problem of empty runs.

The task consists in finding such reallocations of the empty means of transport x_{ij} , so that [6]:

$$\sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (6)$$

by fulfilling the following conditions:

- the demand for the empty means of transport of each transit point will be satisfied according to the following dependence (7):

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j \quad (j=1, \dots, n) \quad (7)$$

- empty means of transport used by each transit point will be utilised in accordance with formulas/inequalities (8) and (9):

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = a_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i, j = 1, \dots, n) \quad (9)$$

To solve the problem of the reduction of empty runs the Excel with the Solver module will be used. The main tasks of the Solver module will be to find such variable values of the equation, that lead to obtaining the optimised value [6].

The spreadsheet was designed for a transport network encompassing eight points. The spreadsheet 'data' includes tables, where the following data should be included:

- distances between transit points d_{ij} ,
- volume of haulages defined by the number of the full load means of transport c_{ij} omitting the cells located at the intersection of a row and a column denoted by indexes i and j with the same value (haulage as a part of the same transit point), where the value 0 should be found [6].

Having introduced data based on the transport volume c_{ij} , in the same spreadsheet, the import and export volumes will be calculated for each transit point as a sum of all haulages for a given transit point (the sum of values in i -column of the matrix of haulages) and exports from the transit point (the sum of values of i - rows of the matrix of haulages). Then, in the 'calculations' spreadsheet, the volume of demand and supply of the empty means of transport will be presented for each transit point. Building upon these results the number of suppliers and recipients of the empty means of transport will be found. Next, an appropriate table

for the transport task should be designed, to which one shall transfer the values of distances between transit points taking part in the exchange of empty means of transport. Similarly, a table with the previously calculated values of the supply and demand for empty means of transport should be designed. The next stage is to solve the transport task using the SOLVER module. Due to this, in some cells of spreadsheet 'calculations', there are values of decision variables and formulas necessary to use this module. Having done the calculations in the appropriate cells there will be an optimum transit plan for the empty means of transport.

3. Numerical example

The example may be the problem of the minimisation of the empty runs in a courier company having its branch offices in eight cities on the territory of Poland (Łódź, Bydgoszcz, Katowice, Świnoujście, Zielona Góra, Kielce, Poznań, Warszawa). They serve as a transport base and a consolidation (combining a few smaller shipments from various deliveries, going in the same direction and to the same recipient) and de-consolidation centre of shipments (division of delivery into smaller parts), which are transported to these points by couriers from the served area and from these points delivered by them to the recipients located within the boundaries of the served area. It was observed that during long-distance haulages there are empty runs between branch offices, which negatively affect the financial result. Due to maintaining the highest possible level of client service, the company cannot introduce higher prices for the offered services (it would result in a decrease in competitiveness) nor prolong the delivery time of shipments to better use the means of transport (it would affect the reduction of the level of client service).

In compliance with the methodology as mentioned above, in spreadsheet „data” in table (table 1), there should be included the distances between particular company's branches expressed in kilometres.

Table 1**Distance between cities**

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
5										
6	Table of distances between transit points d_{ij}									
7										
8	<i>ij</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	
9	1	0	197	184	461	296	140	204	129	
10	2		0	355	287	234	336	118	246	
11	3			0	567	335	143	304	282	
12	4				0	256	598	266	532	
13	5					0	408	120	411	
14	6						0	335	168	
15	7							0	303	
16	8								0	
17										

Source: own elaboration based on www.odleglosci.pl.

In the subsequent table 2 of the spreadsheet „data”, transport of shipments between office branches expressed in the number of full load means of transport in the month should be included.

Table 2**Transport of shipments as well as the values of import and export for each branch**

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
18											
19	Table of transport volume expressed by the number of the full load means of transport c_{ij}										
20											
21	<i>ij</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	wywóz e_i	
22	1	0	7	13	5	6	12	11	9	63	
23	2	5	0	10	8	13	12	4	23	75	
24	3	16	11	0	7	5	6	9	12	66	
25	4	12	13	7	0	11	14	8	2	67	
26	5	11	7	18	6	0	11	10	13	76	
27	6	9	8	3	20	10	0	11	7	68	
28	7	10	13	7	11	6	5	0	8	60	
29	8	7	16	6	5	20	10	7	0	71	
30	przywóz i_j	70	75	64	62	71	70	60	74		
31											

Source: own elaboration.

As it can be inferred from data compiled in table 2, transport volumes on particular routes differ substantially. It has an impact both on the size of the given centre and region supported by a given branch as well as the level of their economic development. Thus, it contributes to the number of the served economic entities (primary client group) and their activity as well as the number of served households (increase in demand for courier services arising from the increase in electronic trade

transactions). Due to this, transport volumes may also differ in relation (i,j) comparing to the transport volume in relation (j,i) .

To calculate the total volume of monthly import and export of shipments in each branch, in spreadsheet „calculations” (table 3) the values of supply and demand were calculated for the empty means of transport in each branch.

Table 3

Demand and supply of each branch in the area of the empty means of transport

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
5										
6	Table of supply and demand for the empty means of transport									
7										
8	i	1	2	3	4	5	6	7	8	
9	i_i	70	75	64	62	71	70	60	74	
10	e_i	63	75	66	67	76	68	60	71	
11	$i_i - e_i$	7	0	-2	-5	-5	2	0	3	
12										

Source: own elaboration.

It can be deduced from the calculations that three branches are suppliers of the empty means of transport:

- Łódź with a surplus of 7 cars,
- Kielce with a surplus of 2 cars,
- Warszawa with a surplus of 3 cars.

The same number of branches will be the recipients of the empty means of transport:

- Katowice with a deficit of 2 cars,
- Świnoujście with a deficit of 5 cars,
- Zielona Góra with a deficit of 5 cars.

The remaining branches (Bydgoszcz and Poznań) indicate a zero balance of imports and exports of cars, which is tantamount to meeting the demand for empty means of transport within the possessed resources (it does not contribute to empty runs). Owing to this, they are taken into account in further analysis.

In the case under consideration, the transport issue is of the size 3×3 , thus the next two tables in spreadsheet „calculations” will not be filled with data. In table 4, from the spreadsheet „data” the distances between suppliers and recipients of the empty vehicles and the obtained values of demand and supply in relation to empty means of transport were demonstrated. The table also illustrated the formulas of left sides of restricting conditions. The suppliers are marked in a

spreadsheet with a letter *a* along with the appropriate number arising out of the input data (identification of the transport point), but the recipients – with letter *b*. The value of haulages (number of the empty runs – decision variables) and left sides of restricting conditions (dotted cells) are cleared before the initiation of the Solver module – table 4.

Table 4

The compilation of transport data before the initiation of the Solver module

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
17	Table of haulages with distances between suppliers and recipients of the empty means of transport				Table with values of demand and supply					
18										
19										
20	Supplier	Recipient	Distance	Haulage		Tr. point	Rest. cond.	Supply	Demand	
21	a1	b3	184	0		a1	0	7		
22	a1	b4	461	0		a6	0	2		
23	a1	b5	296	0		a8	0	3		
24	a6	b3	143	0		b3	0		2	
25	a6	b4	598	0		b4	0		5	
26	a6	b5	408	0		b5	0		5	
27	a8	b3	282	0			0			
28	a8	b4	532	0			0			
29	a8	b5	168	0			0			
30				0						
31				0						
32				0						
33				0						
34				0						
35				0						
36				0						
37	Total run of the empty means of transport			0						
38										
39										

Source: own elaboration

Decision variables (table 4) in the considered problem are the numbers of empty runs between the offices demonstrating the surplus of empty vehicles (suppliers of empty vehicles) and the offices showing the deficiency of empty vehicles (recipients of empty vehicles):

- x_{13} – the number of empty runs from Łódź to Katowice (E21),
- x_{14} – the number of empty runs from Łódź to Świnoujście (E22),
- x_{15} – the number of empty runs from Łódź to Zielona Góra (E23),
- x_{63} – the number of empty runs from Kielce to Katowice (E24),

- x_{64} – the number of empty runs from Kielce to Świnoujście (E25),
- x_{65} – the number of empty runs from Kielce to Zielona Góra (E26),
- x_{83} – the number of empty runs from Warszawa to Kielce (E27),
- x_{84} – the number of empty runs from Warszawa to Świnoujście (E28),
- x_{85} – the number of empty runs from Warszawa to Zielona Góra (E29).

Objective function (E38) assumes thus the following form:

$$\begin{aligned} f(x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{63}, x_{64}, x_{65}, x_{83}, x_{84}, x_{85}) &= \\ &= 184x_{13} + 461x_{14} + 296x_{15} + 143x_{63} + 598x_{64} + 408x_{65} + 282x_{83} + 532x_{84} + 411x_{85} \\ &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (10)$$

which is presented in the Solver module using the formula:

= SUMA.ILOCZYNÓW (E21:E36; D21:D36) encompassing the maximum possible size of the analysed problem.

The restricting conditions are as follows:

- for supplier No. 1 (H21):

$$x_{13} + x_{14} + x_{15} = 7, \text{ in spreadsheet: } =\text{SUM}(E21:E23) \quad (11)$$

- for supplier No. 6 (H22):

$$x_{63} + x_{64} + x_{65} = 2, \text{ in spreadsheet: } =\text{SUM}(E24:E26) \quad (12)$$

- for supplier No. 8 (H23):

$$x_{83} + x_{84} + x_{85} = 3, \text{ in spreadsheet: } =\text{SUM}(E27:E29) \quad (13)$$

- for supplier No. 3 (H24):

$$x_{13} + x_{63} + x_{83} = 2, \text{ in spreadsheet: } =\text{SUM}(E21;E24;E27) \quad (14)$$

- for supplier No. 4 (H25):

$$x_{14} + x_{64} + x_{84} = 5, \text{ in spreadsheet: } =\text{SUM}(E22;E25;E28) \quad (15)$$

- for supplier No. 5 (H26):

$$x_{15} + x_{65} + x_{85} = 5, \text{ in spreadsheet: } =\text{SUM}(E23;E26;E29) \quad (16)$$

and the additional requirement of non-negativeness, which is not to be found directly in the spreadsheet but will be taken into consideration only during solving the problem as:

$$X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{63}, X_{64}, X_{65}, X_{83}, X_{84}, X_{85} \geq 0 \quad (17)$$

When the solution was found, the Solver module was employed. After the activation of a program in a dialogue box, the address of objective function and addresses of decision variables, restricting conditions and type of optimisation should be entered – fig. 3. By using the button „options” the additional dialogue box should be activated, where it is necessary to select the type of linear model and non-negativeness of decision variables. Then, in the dialogue box, the command „solve” should be selected.

Parametry dodatku Solver

Ustaw cel:

Na: ☐ Maks ☒ Mjn ☐ Wartość:

Przez zmienianie komórek zmiennych:

Podlegających ograniczeniom:

\$H\$21:\$H\$23 = \$I\$21:\$I\$23
\$H\$24:\$H\$26 = \$J\$24:\$J\$26

☒ Ustaw wartości nieujemne dla zmiennych bez ograniczeń

Wybierz metodę rozwiązywania:

Metoda rozwiązywania

W przypadku gładkich nieliniowych problemów dodatku Solver wybierz aparat nieliniowy GRG. Dla liniowych problemów dodatku Solver wybierz aparat LP simpleks, natomiast w przypadku problemów, które nie są gładkie, wybierz aparat ewolucyjny.

Dodaj
Zmień
Usuń
Resetuj wszystko
Załaduj/zapisz
Opcje

Pomoc Rozwiąż Zamknij

Fig. 3. Filled dialogue box of the Solver module

Source: own elaboration.

As a result, dotted areas in the spreadsheet „calculations” are filled. From the table, the optimum solution can be read, and the cell E38 includes the value of the objective function. The final transport tables obtain the form which appears in table 5.

Table 5

Transport tables with the optimum solution after the activation of the Solver module

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
17										
18	Table of haulages with distances between suppliers and recipients of the empty means of transport					Table with values of demand and supply				
19										
20	Supplier	Recipient	Distance	Haulage		Tr. point	Rest. cond.	Supply	Demand	
21	a1	b3	184	6		a1	7	7		
22	a1	b4	461	0		a6	2	2		
23	a1	b5	296	1		a8	3	3		
24	a6	b3	143	1		b3	2		2	
25	a6	b4	598	1		b4	5		5	
26	a6	b5	408	0		b5	5		5	
27	a8	b3	282	4			0			
28	a8	b4	532	1			0			
29	a8	b5	168	0						
30				0						
31				0						
32				0						
33				0						
34				0						
35				0						
36				0						
37										
38	Total run of the empty means of transport			3801						
39										

Source: own elaboration.

4. Summary

The final solution to this problem was placed independently in the spreadsheet „solution”. In the issue under discussion, the optimum monthly plan of empty runs includes:

- 6 empty runs from Łódź to Katowice,
- 1 empty run from Łódź to Zielona Góra,
- 1 empty run from Kielce to Katowice,

- 1 empty run from Kielce to Świnoujście,
- 1 empty run from Warszawa to Katowice,
- 1 empty run from Warszawa to Świnoujście.

It guarantees the minimum number of vehicle kilometres of empty runs amounting to 3801.

Due to the increasing fuel prices also leading to an increase in the company's costs, the minimisation of empty runs in transport aims at reducing these costs and contributes to the profit growth of the company.

5. References

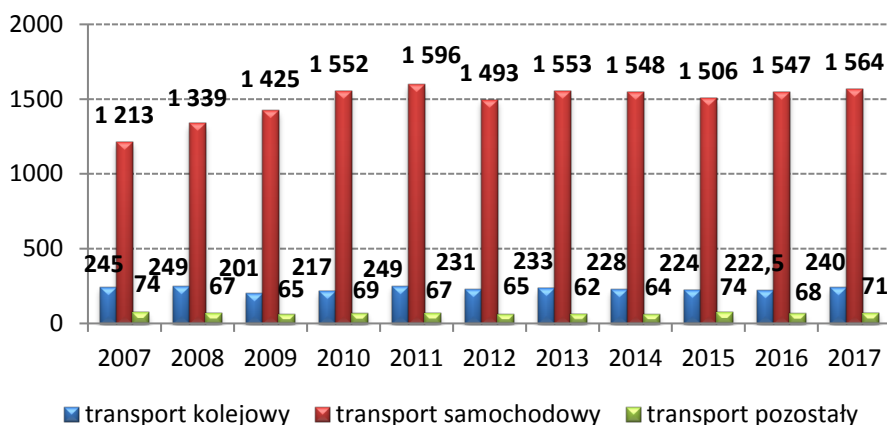
1. Bogdanowicz S.: Podatność. Teoria i zastosowanie w transporcie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
2. Józwiak A., Ziółkowski J.: Minimalizacja pustych przebiegów w transporcie wojskowym, Biuletyn WAT nr 2/2014, vol. 63.
3. Kauf S., Tłuczak A.: Optymalizacja decyzji logistycznych, Difin, Warszawa 2016.
4. Nowotyńska I.: Zagadnienie minimalizacji pustych przebiegów w firmie kurierskiej, Modern Management Review nr 1/2014.
5. Pieriegud J.: Polski rynek usług transportu samochodowego i kolejowego – bilans dziesięciolecia w Unii Europejskiej, Logistyka nr 1/2015.
6. Szymczak M. (red.): Decyzje logistyczne z Excelem, Difin, Warszawa 2011.
7. Wasiak M., Jacyna-Golda I.: Transport drogowy w łańcuchach dostaw. Wyznaczanie kosztów, PWN, Warszawa 2016.
8. www.stat.gov.pl, Transport – wyniki działalności w 2016 r., GUS, Warszawa 2014.
9. Zalewski W.: Rachunek kosztów działań w zarządzaniu przedsiębiorstwem transportu drogowego, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2016.

MINIMALIZACJA PUSTYCH PRZEBIEGÓW W TRANSPORCIE

1. Wprowadzenie

Transport ma znaczący wpływ zarówno na społeczeństwo – w zakresie tworzenia miejsc pracy, jak i na gospodarkę – stanowi bowiem ważny czynnik rozwoju oraz wzrostu gospodarczego. 1 maja 2017 roku minęło 13 lat od wstąpienia Polski do Unii Europejskiej. W ciągu tych lat system transportowy Polski przeszedł poważne przemiany zarówno strukturalne, ilościowe, jak i jakościowe. Liberalizacja handlu sprzyjała umiędzynarodowieniu działalności polskich przewoźników. Dzięki unijnym funduszom pomocowym przeznaczono znaczne środki na rozwój infrastruktury transportowej, co przyczyniło się do poprawy bezpieczeństwa ruchu, a zakup i modernizacja taboru poprawiła jakość świadczonych usług [5].

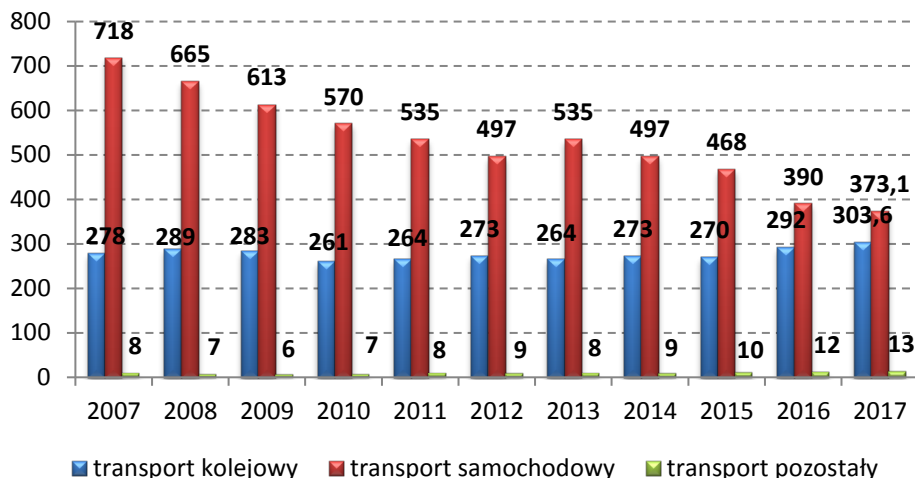
Analiza danych statystycznych pozwoli na ukazanie udziału poszczególnych gałęzi transportu w przewozach ładunków (rys. 1) i pasażerów (rys. 2) w Polsce w ostatnich kilku latach.



Rys. 1. Struktura transportu ładunków w Polsce w latach 2007–2017 [mln ton]

Źródło: opracowanie własne na podstawie: www.stat.gov.pl, Mały Rocznik Statystyczny za lata 2008–2017, GUS, Warszawa 2018.

W 2017 r. wszystkimi rodzajami transportu przewieziono 1 875 mln ton, tj. o 2,1% więcej niż w 2016 r. Wzrost przewozów ładunków zanotowano we wszystkich rodzajach transportu. Największy udział, bo aż 83,4%, stanowił transport samochodowy, na kolejnym miejscu znajduje się transport kolejowy – 12,8%, następnie rurociągowy – 3%, pozostałe rodzaje transportu poniżej 1%.



Rys. 2. Struktura transportu pasażerów w Polsce w latach 2007–2017 [mln osób]

Źródło: opracowanie własne na podstawie: www.stat.gov.pl, *Mały Rocznik Statystyczny za lata 2008–2017*, GUS, Warszawa 2018.

Środkami publicznego transportu w roku 2017 przewieziono łącznie 689,7 mln pasażerów, tj. o 0,6% mniej niż w 2016 r. Największy udział – ponad 54,2% – stanowił przewóz pasażerów w transporcie samochodowym, na drugim miejscu znajdował się transport kolejowy – 44,0%, następnie transport lotniczy – 1,3%, pozostałe rodzaje transportu osiągnęły wynik poniżej 1%.

Transport oznacza proces produkcyjny, którego efektem jest zmiana przestrzennego zbytu przedmiotu przewozu (ładunków lub osób), odpowiadająca określonym potrzebom [1]. Jak już wspomniano, transport odgrywa znaczącą rolę w obszarze społeczno-gospodarczym kraju, ponieważ jest czynnikiem intensyfikującym rozwój poszczególnych działów gospodarki narodowej kraju [8] oraz ma znaczący udział w tworzeniu produktu krajowego brutto.

Optymalizacja zadań transportowych prowadzi do wzrostu efektywności działalności przedsiębiorstwa. Jednym z jej głównych aspektów jest pełne wykorzystanie ładowności środków służących do przewozów oraz minimalizacja

pustych przebiegów [3]. Problem minimalizacji pustych przebiegów jest związany z opracowaniem optymalnego planu przejazdów środków transportu w ramach danej sieci. Optymalny oznacza taki, dla którego liczba wozokilometrów wykonanych bez ładunku będzie minimalna. Ponadto muszą być spełnione ograniczenia w zakresie wykorzystania podaży pustych środków transportu w ramach sieci i niezaspokojenia popytu [4].

Wystąpienie pustych przebiegów nie jest korzystne, gdyż prowadzi do wzrostu kosztów działalności przedsiębiorstwa. Zagadnienie pustych przebiegów dotyczy szczególnie przedsiębiorstw wykonujących przewozy na własne potrzeby oraz we własnym zakresie (transport gospodarczy), a także mniejszych firm przewozowych wykonujących takie usługi na zlecenie (transport zarobkowy) [2]. W tym drugim przypadku możliwości minimalizacji pustych przebiegów są dużo bardziej ograniczone niż w przypadku przedsiębiorstwa posiadającego rozbudowaną flotę transportową lub współpracującego z innymi przewoźnikami. Problem pustych przebiegów dotyczyć może każdej gałęzi transportu z wyjątkiem transportu przesyłowego, ale najbardziej dotkliwy jest w transporcie samochodowym. Obecnie dzięki powszechnemu monitoringowi przewozów z wykorzystaniem systemu GPS oraz wykorzystaniu wirtualnych giełd pojazdów i frachtów można ograniczyć problem pustych przebiegów [6].

Według danych z GUS z 2016 roku puste przebiegi stanowiły 33% wszystkich przejazdów w Polsce oraz 15% przejazdów międzynarodowych [7].

2. Założenia i metodyka obliczeń

Przedsiębiorstwa prowadzące działalność gospodarczą ponoszą koszty wynikające z reguły ze zużycia zasobów, natomiast efektem ich aktywności jest wytworzenie produktów świadczenia usług lub sprzedaż towarów [9]. Jedną ze składowych kosztowych stanowi racjonalizacja wykorzystania środków transportu odniesiona zarówno do optymalnego wykorzystania powierzchni ładunkowej, wyznaczenia najkrótszej trasy przewozu, jak i redukcji pustych przebiegów.

Założenia minimalizacji pustych przebiegów w transporcie:

- przewozy realizowane są w ramach jednej gałęzi transportu (np. transport kolejowy, samochodowy itp.);
- wykorzystywane są jednakowe środki transportu (ładowność);
- transport odbywa się pomiędzy wieloma stałymi punktami w sieci transportowej;
- każdy punkt może być miejscem za- i wyładunku;

- liczba punktów jest znana i stała, a przewozy odbywają się tylko między nimi (do każdego punktu transportowego przywozi się i z każdego punktu transportowego wywozi się ładunki określonej wielkości, w określonym czasie);
- znany jest rozkład przewozów pomiędzy punktami transportowymi, a wielkości przewozów wyrażone są liczbą środków transportu danego typu;
- podane są odległości między punktami w sieci transportowej;
- dopuszcza się wyłącznie przewozy realizowane całkowitą liczbą środków transportu danego typu;
- istnieją dostawcy pustych środków transportu (przywóz większy od wywozu);
- istnieją odbiorcy pustych środków transportu (wywóz większy od przywozu) [6].

Optymalny plan przejazdu pustych środków transportu (od dostawców do odbiorców) w sieci transportowej powinien cechować się minimalną liczbą wozokilometrów „na pusto” oraz:

- wykorzystaniem podaży pustych środków transportu;
- zaspokojeniem popytu na puste środki transportu [6].

Przy założeniu, że i, j oznaczać będą numery punktów transportowych $i, j = 1, \dots, n$, wówczas zmienną decyzyjną będzie pusta lista środków transportu x_{ij} , jaka powinna zostać przemieszczona od i -tego punktu transportowego (dostawcy pustych środków transportu) do j -tego punktu transportowego (odbiorcy pustych środków transportu).

Niezbędne dane do tego zadania są następujące [6]:

d_{ij} – odległości od i -tego do j -tego punktu transportowego,

c_{ij} – wielkość przewozu od i -tego do j -tego punktu transportowego (liczba pełnych środków transportu),

e_i – wielkość wywozu ładunku z i -tego punktu transportu (liczba pełnych środków transportu), a więc:

$$e_i = \sum_{j=1}^n c_{ji} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

gdzie i_i – wielkość przewozu ładunku od i -tego punktu transportowego (liczba pełnych środków transportu), a więc:

$$i_i = \sum_{j=1}^n c_{ji} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

przy czym dla całej sieci transportowej (ale niekoniecznie dla poszczególnych punktów transportowych) liczba środków transportu obsługujących wywóz ładunku musi być równa liczbie środków transportu wykorzystywanych do realizacji przywozu ładunku (zagadnienie zamknięte), a więc spełnione musi być równanie:

$$\sum_{i=1}^m e_i = \sum_{i=1}^m i_i \quad (3)$$

punkty transportowe, dla których $e_i < i_i$, są dostawcami pustych środków transportu, a ich podaż ma postać:

$$a_i = i_i - e_i \quad (a_i > 0) \quad (4)$$

punkty transportowe, dla których $e_i > i_i$, są odbiorcami pustych środków transportu, a zapotrzebowanie na nie wynosi:

$$b_j = e_i - i_i \quad (b_j > 0) \quad (5)$$

punkty transportowe, dla których $e_i = i_i$, pomija się w analizie – brak tam problemu pustych przebiegów.

Zadanie polega na znalezieniu takich przesunięć pustych środków transportu x_{ij} , żeby [6]:

$$\sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (6)$$

przy spełnieniu następujących warunków:

- zapotrzebowanie na puste środki transportu każdego punktu transportowego zostanie zaspokojone według zależności (7):

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j \quad (j=1, \dots, n) \quad (7)$$

- puste środki transportu znajdujące się w wykorzystaniu każdego punktu transportowego zostaną wykorzystane zgodnie z równaniami/nierównościami (8) i (9):

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = a_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i, j = 1, \dots, n) \quad (9)$$

Do rozwiązywania problemu minimalizacji pustych przebiegów zostanie wykorzystany program Excel z modułem Solver. Głównym zadaniem Solvera będzie znalezienie takich wartości zmiennych równania, które prowadzą do otrzymania wartości zoptymalizowanej [6].

Arkusz kalkulacyjny utworzono dla sieci transportowej obejmującej osiem punktów. Arkusz „dane” zawiera tabele w których należy wpisać dane:

- odległości między punktami transportowymi d_{ij} ,
- wielkości przewozów określone liczbą pełnych środków transportu c_{ij} pomijając komórki znajdujące się na przecięciu się wiersza i kolumny oznaczonych indeksami i i j o jednakowej wartości (przewóz w ramach tego samego punktu transportowego), w których powinna się znajdować wartość zero [6].

Po wprowadzeniu danych na podstawie wielkości przewozów c_{ij} w tym samym arkuszu obliczone zostaną wielkości przywozu i wywozu dla każdego punktu transportowego jako suma wszystkich przewozów dla danego punktu transportowego (suma wartości w i -tej kolumnie macierzy przewozów) i wywozów z tego punktu transportowego (suma wartości w i -tym wierszu macierzy przewozów). Następnie w arkuszu „obliczenia” zestawione zostaną wielkości zapotrzebowania i podaży pustych środków transportu dla każdego punktu transportowego. Na podstawie tych wyników znaleziona zostanie liczba dostawców i odbiorców pustych środków transportu. Następnie należy skonstruować odpowiednią tablicę dla zadania transportowego, do której należy przenieść wartości odległości pomiędzy punktami transportowymi biorącymi udział w wymianie pustych środków transportu. W podobny sposób należy utworzyć tabelę z wyliczonymi wcześniej wartościami podaży i popytu na puste środki transportu. Kolejnym etapem jest rozwiązanie zadania transportowego za pomocą dodatku SOLVER. W związku z tym w części komórek arkusza „obliczenia” znajdą się wartości zmiennych decyzyjnych i formuły niezbędne do wykorzystania tego dodatku. Po zakończeniu obliczeń w odpowiednich komórkach pojawi się optymalny plan przejazdu pustych środków transportu.

3. Przykład liczbowy

Za przykład posłuży problem minimalizacji pustych przebiegów w firmie kurierskiej mającej oddziały w ośmiu miastach na terenie Polski (Łódź, Bydgoszcz, Katowice, Świnoujście, Zielona Góra, Kielce, Poznań, Warszawa). Pełnią one funkcję bazy transportowej oraz swego centrum konsolidacji (łączenie kilku mniejszych przesyłek z różnych dostaw, podążających w tym samym kierunku, do tego samego odbiorcy) i dekonsolidacji przesyłek (podział dostawy na mniejsze partie), które do tych punktów są zwożone przez kurierów z obsługiwanego rejonu, a także są przez nich z tych punktów rozwożone do odbiorców znajdujących się w granicach obsługiwanego rejonu. Zauważono, że na poziomie długo-dystansowych przewozów pomiędzy oddziałami występują puste przebiegi, które negatywnie wpływają na wynik finansowy. Firma, ze względu na zachowanie

należytego poziomu obsługi klienta, nie może wprowadzić wyższych cen za oferowane usługi (spowodowałoby to spadek konkurencyjności) ani wydłużyć czasu dostarczania przesyłek, aby lepiej wykorzystać środki transportu (wpłynęłoby to na obniżenie poziomu obsługi klienta).

Zgodnie z omówioną powyżej metodyką w arkuszu „dane” w tabeli (tabela 1) należy umieścić odległości pomiędzy poszczególnymi oddziałami firmy określone w kilometrach.

Tabela 1

Odległości pomiędzy miastami

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
5										
6	Tablica odległości między punktami transportowymi d_{ij}									
7										
8	ij	1	2	3	4	5	6	7	8	
9	1	0	197	184	461	296	140	204	129	
10	2		0	355	287	234	336	118	246	
11	3			0	567	335	143	304	282	
12	4				0	256	598	266	532	
13	5					0	408	120	411	
14	6						0	335	168	
15	7							0	303	
16	8								0	
17										

Źródło: opracowanie własne na podstawie: www.odleglosci.pl.

W kolejnej tabeli 2 arkusza „dane” należy wpisać przewozy przesyłek pomiędzy oddziałami wyrażone liczbą pełnych środków transportu w miesiącu.

Tabela 2

Przewozy przesyłek oraz wartości przywozu i wywozu dla każdego oddziału

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
18											
19	Tablica wielkości przewozów wyrażona liczbą pełnych środków transportu c_{ij}										
20											
21	ij	1	2	3	4	5	6	7	8	wywóz e_i	
22	1	0	7	13	5	6	12	11	9	63	
23	2	5	0	10	8	13	12	4	23	75	
24	3	16	11	0	7	5	6	9	12	66	
25	4	12	13	7	0	11	14	8	2	67	
26	5	11	7	18	6	0	11	10	13	76	
27	6	9	8	3	20	10	0	11	7	68	
28	7	10	13	7	11	6	5	0	8	60	
29	8	7	16	6	5	20	10	7	0	71	
30	przywóz i_j	70	75	64	62	71	70	60	74		
31											

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z danych zestawionych w tabeli 2, wielkości przewozów na poszczególnych trasach znacznie się różnią. Ma na to wpływ zarówno wielkość danego ośrodka i obsługiwanego przez dany oddział regionu oraz poziom ich rozwoju gospodarczego. Przedkłada się to z kolei na liczbę obsługiwanych podmiotów gospodarczych (podstawowa grupa klientów) i ich aktywność oraz na liczbę obsługiwanych gospodarstw domowych (wzrost zapotrzebowania na usługi kurierskie wynikający ze wzrostu transakcji handlu elektronicznego). W związku z tym mogą różnić się także wielkości przewozów w relacji (i,j) w stosunku do wielkości przewozów w relacji (j,i) .

W celu obliczenia sumarycznych wielkości miesięcznego przywozu i wywozu przesyłek w każdym oddziale w arkuszu „obliczenia” (tabela 3) wyliczone zostały wartości podaży i popytu na puste środki transportu w każdym oddziale.

Tabela 3

Popyt i podaż każdego oddziału w zakresie pustych środków transportu

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
5										
6	Tablica wielkości zapotrzebowania i podaży pustych środków transportu									
7										
8	i	1	2	3	4	5	6	7	8	
9	i_i	70	75	64	62	71	70	60	74	
10	e_i	63	75	66	67	76	68	60	71	
11	$i_i - e_i$	7	0	-2	-5	-5	2	0	3	
12										

Źródło: opracowanie własne.

Z obliczeń wynika, że trzy oddziały są dostawcami pustych środków transportu:

- Łódź z nadwyżką 7 samochodów,
- Kielce z nadwyżką 2 samochodów,
- Warszawa z nadwyżką 3 samochodów.

Taka sama liczba oddziałów będzie odbiorcami pustych środków transportu:

- Katowice z niedoborem 2 samochodów,
- Świnoujście z niedoborem 5 samochodów,
- Zielona Góra z niedoborem 5 samochodów.

Pozostałe oddziały (Bydgoszcz oraz Poznań) wykazują zerowy bilans przyjazdów i wyjazdów samochodów, co oznacza zaspokajanie popytu na puste środki transportu w ramach posiadanych zasobów (nie generują one pustych przebiegów). Z tego względu nie są one brane pod uwagę w dalszej analizie.

W analizowanym przypadku zagadnienie transportowe posiada zatem rozmiar 3×3 , stąd kolejne dwie tabele w arkuszu „obliczenia” nie będą w całości wypełnione danymi. Do tabeli 4 wstawiono z arkusza „dane” odległości między

dostawcami i odbiorcami pustych pojazdów oraz otrzymane wartości popytu i podaży w odniesieniu do pustych środków transportu. W tabeli określono także formuły lewych stron warunków ograniczających. Dostawcy są oznaczeni w arkuszu literą *a* wraz z odpowiednim numerem wynikającym z danych wejściowych (identyfikacja punktu transportowego), natomiast odbiorcy – literą *b*. Wartość przewozów (liczby pustych przebiegów – zmienne decyzyjne) oraz lewych stron warunków ograniczających (komórki zakropkowane) są wyzerowane przed uruchomieniem dodatku Solver – tabela 4.

Tabela 4

Zestawienie danych transportowych przed uruchomieniem dodatku Solver

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
17	Tabela przewozów z odległościami między dostawcami i odbiorcami pustych środków transportu				Tabela z wartościami popytu i podaży					
18										
19										
20	Dostawca	Odbiorca	Odległość	Przewóz		Punkt tr.	War. ogr.	Podaż	Popyt	
21	a1	b3	184	0		a1	0	7		
22	a1	b4	461	0		a6	0	2		
23	a1	b5	296	0		a8	0	3		
24	a6	b3	143	0		b3	0		2	
25	a6	b4	598	0		b4	0		5	
26	a6	b5	408	0		b5	0		5	
27	a8	b3	282	0			0			
28	a8	b4	532	0			0			
29	a8	b5	411	0			0			
30				0						
31				0						
32				0						
33				0						
34				0						
35				0						
36				0						
37	Całkowity przebieg pustych									
38	środków transportu			0						
39										

Źródło: opracowanie własne.

Zmiennymi decyzyjnymi (tabela 4) w rozpatrywanym problemie są liczby pustych przebiegów pomiędzy oddziałami wykazującymi nadwyżkę pustych samochodów (dostawcy pustych samochodów) a oddziałami wykazującymi niedobór pustych samochodów (odbiorcy pustych samochodów):

- x_{13} – liczba pustych przebiegów z Łodzi do Katowic (E21),
- x_{14} – liczba pustych przebiegów z Łodzi do Świnoujścia (E22),

- x_{15} – liczba pustych przebiegów z Łodzi do Zielonej Góry (E23),
- x_{63} – liczba pustych przebiegów z Kielc do Katowic (E24),
- x_{64} – liczba pustych przebiegów z Kielc do Świnoujścia (E25),
- x_{65} – liczba pustych przebiegów z Kielc do Zielonej Góry (E26),
- x_{83} – liczba pustych przebiegów z Warszawy do Kielc (E27),
- x_{84} – liczba pustych przebiegów z Warszawy do Świnoujścia (E28),
- x_{85} – liczba pustych przebiegów z Warszawy do Zielonej Góry (E29).

Funkcja celu (E38) przybiera zatem następującą postać:

$$\begin{aligned} f(x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{63}, x_{64}, x_{65}, x_{83}, x_{84}, x_{85}) = \\ = 184x_{13} + 461x_{14} + 296x_{15} + 143x_{63} + 598x_{64} + 408x_{65} + 282x_{83} + 532x_{84} + 411x_{85} \\ \rightarrow \min \end{aligned} \quad (10)$$

co przedstawione jest w dodatku Solver za pomocą formuły:

= SUMA.ILOCZYNÓW (E21:E36; D21:D36) obejmującej maksymalny możliwy rozmiar analizowanego problemu.

Warunki ograniczające są następujące:

- dla dostawcy nr 1 (H21):

$$x_{13} + x_{14} + x_{15} = 7, \text{ w arkuszu: } =\text{SUMA}(E21:E23) \quad (11)$$

- dla dostawcy nr 6 (H22):

$$x_{63} + x_{64} + x_{65} = 2, \text{ w arkuszu: } =\text{SUMA}(E24:E26) \quad (12)$$

- dla dostawcy nr 8 (H23):

$$x_{83} + x_{84} + x_{85} = 3, \text{ w arkuszu: } =\text{SUMA}(E27:E29) \quad (13)$$

- dla odbiorcy nr 3 (H24):

$$x_{13} + x_{63} + x_{83} = 2, \text{ w arkuszu: } =\text{SUMA}(E21;E24;E27) \quad (14)$$

- dla odbiorcy nr 4 (H25):

$$x_{14} + x_{64} + x_{84} = 5, \text{ w arkuszu: } =\text{SUMA}(E22;E25;E28) \quad (15)$$

- dla odbiorcy nr 5 (H26):

$$x_{15} + x_{65} + x_{85} = 5, \text{ w arkuszu: } =\text{SUMA}(\text{E23};\text{E26};\text{E29}) \quad (16)$$

oraz dodatkowy warunek nieujemności zmiennych, który nie znajduje się bezpośrednio w arkuszu, a będzie uwzględniony dopiero podczas rozwiązywania problemu jako:

$$x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{63}, x_{64}, x_{65}, x_{83}, x_{84}, x_{85} \geq 0 \quad (17)$$

Do znalezienia rozwiązania zastosowano dodatek Solver. Po uruchomieniu programu w oknie dialogowym należy w odpowiednie pola wpisać adres funkcji celu i adresy zmiennych decyzyjnych, warunki ograniczające oraz rodzaj optymalizacji – rys. 3. Za pomocą klawisza „opcje” należy uruchomić dodatkowe okno dialogowe, w którym należy wybrać rodzaj modelu liniowego oraz nieujemność zmiennych decyzyjnych. Następnie w oknie dialogowym należy wybrać polecenie „rozwiąż”.

Parametry dodatku Solver

Ustaw cel:

Na: ☐ Maks ☒ Min ☐ Wartość:

Przez zmienianie komórek zmiennych:

Podlegających ograniczeniom:

☒ Ustaw wartości nieujemne dla zmiennych bez ograniczeń

Wybierz metodę rozwiązywania:

Metoda rozwiązywania
W przypadku gładkich nieliniowych problemów dodatku Solver wybierz aparat nieliniowy GRG. Dla liniowych problemów dodatku Solver wybierz aparat LP simpleks, natomiast w przypadku problemów, które nie są gładkie, wybierz aparat ewolucyjny.

Rys. 3. Wypełnione okno dialogowe dodatku Solver

Źródło: opracowanie własne.

W efekcie zostają wypełnione zakropkowane pola w arkuszu „obliczenia”. Z tabeli można odczytać optymalne rozwiązanie, a w komórce E38 znajduje się wartość funkcji celu. Ostatecznie tabele transportowe otrzymują postać przedstawioną w tabeli 5.

Tabela 5

Tabele transportowe z rozwiązaniem optymalnym po uruchomieniu dodatku Solver

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
17	Tabela przewozów z odległościami między dostawcami i odbiorcami pustych środków transportu				Tabela z wartościami popytu i podaży					
18										
19										
20	Dostawca	Odbiorca	Odległość	Przewóz		Punkt tr.	War. ogr.	Podaż	Popyt	
21	a1	b3	184	6		a1	7	7		
22	a1	b4	461	0		a6	2	2		
23	a1	b5	296	1		a8	3	3		
24	a6	b3	143	1		b3	2		2	
25	a6	b4	598	1		b4	5		5	
26	a6	b5	408	0		b5	5		5	
27	a8	b3	282	4			0			
28	a8	b4	532	1			0			
29	a8	b5	411	0						
30				0						
31				0						
32				0						
33				0						
34				0						
35				0						
36				0						
37	Całkowity przebieg pustych środków transportu			3801						
38										
39										

Źródło: opracowanie własne.

4. Podsumowanie

Ostateczne rozwiązanie tego problemu umieszczono niezależnie w arkuszu „rozwiązanie”. W rozpatrywanym problemie optymalny miesięczny plan pustych przebiegów obejmuje:

- 6 pustych przebiegów z Łodzi do Katowic,
- 1 pusty przebieg z Łodzi do Zielonej Góry,
- 1 pusty przebieg z Kielc do Katowic,
- 1 pusty przebieg z Kielc do Świnoujścia,

- 4 puste przebiegi z Warszawy do Katowic,
- 1 pusty przebieg z Warszawy do Świnoujścia.

Gwarantuje on minimalną liczbę wozokilometrów pustych przebiegów wynoszącą 3801.

Z racji wzrastających cen paliw prowadzących jednocześnie do wzrostu kosztów przedsiębiorstwa, minimalizacja pustych przebiegów w transporcie ma za zadanie zmniejszenie tych kosztów, a tym samym przyczynia się do wzrostu zysków firmy.

5. Literatura

1. Bogdanowicz S.: Podatność. Teoria i zastosowanie w transporcie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
2. Józwiak A., Ziółkowski J.: Minimalizacja pustych przebiegów w transporcie wojskowym, Biuletyn WAT nr 2/2014, vol. 63.
3. Kauf S., Tłuczak A.: Optymalizacja decyzji logistycznych, Difin, Warszawa 2016.
4. Nowotyńska I.: Zagadnienie minimalizacji pustych przebiegów w firmie kurierskiej, Modern Management Review nr 1/2014.
5. Pieriegud J.: Polski rynek usług transportu samochodowego i kolejowego – bilans dziesięciolecia w Unii Europejskiej, Logistyka nr 1/2015.
6. Szymczak M. (red.): Decyzje logistyczne z Excelem, Difin, Warszawa 2011.
7. Wasiak M., Jacyna-Golda I.: Transport drogowy w łańcuchach dostaw. Wyznaczanie kosztów, PWN, Warszawa 2016.
8. www.stat.gov.pl, Transport – wyniki działalności w 2016 r., GUS, Warszawa 2014.
9. Zalewski W.: Rachunek kosztów działań w zarządzaniu przedsiębiorstwem transportu drogowego, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2016.