

Marek Gubała  
Konsultant Centrum Edukacji Logistycznej

## Optymalizacja wielkości dostawy w arkuszu kalkulacyjnym

W przedsiębiorstwach bardzo często występuje potrzeba przeprowadzenia obliczeń, które nie zawsze są możliwe w zakresie funkcjonalnym działającego w firmie systemu informatycznego. W takim przypadku często można odwołać się do możliwości arkusza kalkulacyjnego, np. Lotus, Excel lub inny. W tym krótkim artykule chciałbym pokazać, jak można wykorzystać możliwości arkusza kalkulacyjnego w ustaleniu optymalnej wielkości dostawy, czyli takiej wielkości, która minimalizuje koszty zapasów.

### Przygotowanie

Zanim jednak przejdziemy do obliczeń w arkuszu kalkulacyjnym, stwórzmy nowy skoroszyt o nazwie logistyka. Możemy to zrobić w trzech krokach.

1. Uruchamiamy arkusz kalkulacyjny klikając dwukrotnie ikonę arkusza na pulpicie lub klikając na *start* w lewym dolnym rogu monitora, wybieramy z listy *programy*, a następnie klikamy nazwę arkusza, w naszym wypadku Excel.
2. W grupie poleceń *Plik* znajdujacej się w górnej części interfejsu Excela klikamy *nowy*.
3. Ostatnim etapem tworzenia jest nadanie nazwy skoroszytowi, co czynimy przez wejście do grupy poleceń *Plik* i wybór polecenia *zapisz jako*. Po uruchomieniu tego polecenia przez kliknięcie pojawia się formatka, w której można nadać nazwę, w naszym przypadku będzie to „logistyka”. Można także między innymi ustalić tutaj lokalizację skoroszytu oraz typ.

Utworzony w ten sposób skoroszyt posiada standardowo trzy arkusze: Arkusz1, Arkusz2, Arkusz3, które graficznie prezentowane są jako zakładki w lewym dolnym rogu arkusza.



Klikając dwukrotnie, wywołuje się kursor, który umożliwia zmianę nazwy arkusza

Klikając dwukrotnie na nazwę Arkusz1, możemy wprowadzić własną nazwę. Proponuję, by była to „EWD”. Tak samo należy postąpić z nazwą Arkusz2 i zmienić ją na WD.

### Wstępne informacje

Przy optymalizowaniu wielkości dostawy koncentrujemy się głównie na kosztach zmiennych gromadzenia i utrzymania, które zapisujemy formułą [1]:

$$Kg_z + KU_z = \frac{PP}{WD} k_u + 0,5 * WD * C * u_o$$

Wykorzystując pierwszą formułę, musimy podstawiać kolejne wielkości dostawy (np. rosnąco, co 10 jednostek) i sprawdzać ich wpływ na sumaryczną wartość kosztów gromadzenia i utrzymania. Aby uniknąć tak żmudnej pracy, z pierwszej pochodnej tego zapisu używamy formułę [2]:

$$EWD = \sqrt{\frac{2PP * k_u}{C * u_o}}$$

gdzie:  
PP – prognozowany popyt  
 $k_u$  – koszt związany z zamówieniem i przyjęciem jednej dostawy  
C – cena zakupu  
 $u_o$  – wskaźnik okresowego kosztu utrzymania zapasu.

minimalizuje zmienne koszty utrzymania i gromadzenia w pierwszym podejściu.

### Arkusz EWD

Mimo że formuła Wilsona pozwala obliczyć optymalną w świetle zmiennych kosztów gromadzenia i utrzymania zapasów wielkość dostawy bez kolejnego podstawiania wielkości dostawy (jak w przypadku formuły pierwszej), to jednak formuła ta nie uwzględnia wszystkich możliwych czynników. W wersji podstawowej składniki są niezmiennymi. W arkuszu EWD chciałbym przedstawić formułę rozbudowaną o inne składniki oraz zaprezentować możliwości arkusza ułatwiające codzienne kalkulacje.

Pracę z arkuszem EWD zaczniemy od wprowadzenia i opisanie danych wejściowych. Zrobimy to w arkuszu EWD przez:

- w komórce A2 podanie wartości prognozowanego popytu PP
- w komórce B2 podanie wartości kosztu gromadzenia  $k_u$
- w komórce C2 podanie wartości ceny C
- w komórce D2 podanie wartości współczynnika kosztu utrzymania zapasu  $u_o$

Następnie do komórki E2 w arkuszu EWD wprowadzona będzie formuła [2], która przyjmie zapis:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Popyt	Koszt gromadzenia	Cena	współczynnik kosztu utrzymania	EWD				
2	1815	500	300	0,3	=PIERWIASTEK((2*A2*B2)/(C2*D2))				

Przypomnienie: Każda formuła rozpoczyna się znakiem „=”, bez niego arkusz traktuje zapis jak tekst

\* dane zaczerpnięte z zadania autorstwa dr. S. Krzyżaniaka

Ta postać, zwana formułą Wilsona lub Harrisa na ekonomiczną wielkość dostawy, pozwala znaleźć taką wielkość dostawy, która mi-

W formułach Excela lub innego arkusza kalkulacyjnego należy zwracać uwagę na prawidłowe operowanie nawiasami, ponieważ ich nieprawidłowe użycie może wpłynąć na kolejność działań,

a przez to na wynik końcowy. Na przykład: gdybyśmy opuścili nawiasy w liczniku i mianowniku (kreska ułamkowa czy też znak ilorazu w arkuszu oznaczany jest przez znak „/”) wartość formuły wyniesie 43 szt., gdzie przy tych danych wejściowych prawidłowa wartość to 142 szt.

Możemy także obliczać optymalną wielkość dostawy przy uwzględnieniu:

- kosztów braku zapasu

$$EWD+ = \sqrt{\frac{2 * PP * (ku + kb * (100\% - POK))}{C * u}} \quad [1]$$

- dostaw rozłożonych w czasie

$$EWD+ = \sqrt{\frac{2 * PP * ku}{C * u}} * \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{z}{d}}} \quad [2]$$

- inflacji

$$EWD+ = \sqrt{\frac{2 * PP * ku}{C * u}} * \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{i}{r}}} \quad [3]$$

- marży handlowej.

$$EWD+ = \sqrt{\frac{2 * PP * ku}{C * u}} * \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{fi}{r}}} \quad [4]$$

Do wzoru [1] oprócz wcześniejszych oznaczeń dochodzą symbole:

- kb – koszt braku zapasu
- POK – poziom obsługi klienta definiowany jako prawdopodobieństwo nie wystąpienia niedoboru, wynikiem różnicy 100% - POK jest ryzyko wystąpienia niedoboru.

Do wzoru [2] oprócz wcześniejszych oznaczeń dochodzą symbole:

- z – tempo zużycia
- d – tempo dostaw

Do wzoru [3] oprócz wcześniejszych oznaczeń dochodzą symbole:

- i – stopa inflacji
- r – oprocentowanie kredytów

Do wzoru [4] oprócz wcześniejszych oznaczeń dochodzi symbol:

- f – marży handlowej

W dalszych rozważaniach przyjrzymy się bliżej budowaniu w arkuszu kalkulacyjnym formuły na  $EWD+$  z uwzględnieniem kosztu braku zapasu oraz tempa zużycia i dostaw. Bazą obliczeń będzie odpowiednio rozbudowywana formuła Wilsona, opisana

już we *wstępnych informacjach* i wyliczona w arkuszu EWD w komórce E2. Aby obliczyć ekonomiczną wielkość zamówienia (dostawy) z uwzględnieniem powyższych czynników, dodajemy do danych wejściowych odpowiednio w komórkach:

- F2 – poziom obsługi klienta POK, komórka przyjmuje wartości od 0 do 1
- G2 – koszt braku zapasu kb, komórka przyjmuje wartości większe lub równe zero
- H2 – tempo zużycia z, komórka przyjmuje wartości większe lub równe zero
- I2 – tempo dostaw d, komórka przyjmuje wartości większe lub równe zero.

W komórce J2 budowana będzie formuła obliczająca  $EWD+$ , której celem będzie uwzględnienie w obliczeniach maksymalnej ilości wariantów przy dostępnych danych, oznaczana jako formuła plus –  $EWD+$ . Wartości komórek od A2 do E2 (w arkuszu zapis obszaru przyjmuje postać A2:E2) pozostają bez zmian.

W arkuszu EWD w komórce J2 powstała formuła:

Prezentowana powyżej formuła jest formułą złożoną z kilku podfunkcji. Funkcje w arkuszu kalkulacyjnym wpisujemy do paska formuł „z ręki” lub możemy je odnaleźć w zbiorze poleceń *Wstaw*, wybierając z listy *funkcje*. Powinna pojawić się formatka, w której możemy wybrać grupę funkcji, a z niej konkretną funkcję.

Z formuły opisującej „ $EWD+$ ” najistotniejszą jest funkcja *JEŻELI*, zbudowana z trzech argumentów oddzielonych średnikami, wszystkie osadzone są między okrągłymi nawiasami, przed którymi znajduje się klucz funkcyjny, w tym wypadku słowo *JEŻELI*. Model funkcji możemy zapisać następująco:

=*JEŻELI*(*Test\_logiczny*; *Wartość\_jeżeli\_prawda*; *Wartość\_jeżeli\_fałsz*)

Pierwszy argument zwany *testem logicznym* definiuje warunki, które powinny być spełnione. Drugi argument po pierwszym średniku definiuje *Wartość\_jeżeli\_prawda*, czyli co ma uczynić funkcja, jeżeli warunki testu logicznego są spełnione (np. wykonać działanie lub wstawić wartość istniejącej komórki). Trzeci argument po drugim średniku (w nawiasach przypisanych do funkcji *JEŻELI*) definiuje *Wartość\_jeżeli\_fałsz*, czyli co ma uczynić funkcja, jeżeli warunki

```
=JEŻELI(ORAZ(F2>0;G2>0;H2>0;I2>0);PIERWIASTEK((2*A2*(B2+(G2*(1-F2)))/(C2*D2))*PIERWIASTEK(1/(1-(H2/I2)));JEŻELI(LUB(F2=0;G2=0)*ORAZ(H2>0;I2>0);PIERWIASTEK((2*A2*B2)/(C2*D2))*PIERWIASTEK(1/(1-(H2/I2)));JEŻELI(LUB(H2=0;I2=0)*ORAZ(F2>0;G2>0);PIERWIASTEK((2*A2*(B2+(G2*(1-F2)))/(C2*D2))*PIERWIASTEK((2*A2*B2)/(C2*D2))))))
```

Jak pokazują kolejne screeny, formuła uwzględnia różne warianty, jeżeli chodzi o zbiór danych wejściowych:

podane w teście logicznym nie są spełnione. Tu także wszystko może się skończyć wstawieniem wartości innej komórki czy też wartości wpisanej „z ręki” do funkcji lub może też być podane polecenie dowolnego działania. Funkcja typu *JEŻELI* może mieć postać prostą, np. =*JEŻELI*(A1>0;1;0) - taki zapis powoduje, że jeżeli jest spełniony warunek zawarty w argumente *Test\_logiczny*, czyli wartość komórki A1 jest większa od „0”, to funkcja

♣ Umowne oznaczenie formuł poszerzonych

wstawia wartość „1”; jeżeli warunek nie jest spełniony, to funkcja wstawia „0”. Wersja złożona może być przedstawiona za pomocą następującego zapisu:  $=JEŻELI(A1>0;1;JEŻELI(A1<0;-1;0))$ . Jak widać, w złożonej funkcji „JEŻELI” w miejsce argumentu „Wartość jeżeli fałsz” wpisujemy kolejną funkcję „JEŻELI”, działanie takie możemy powtarzać, jest to jednak ograniczone w zależności od wersji Excela.

Często jednak potrzebujemy, by arkusz podejmował działanie lub nie w oparciu o więcej niż jeden warunek; wówczas korzystamy i innych funkcji, np.

- Jeżeli chcemy, by działanie było lub nie było podjęte tylko wówczas, kiedy jednocześnie spełnionych jest więcej niż kilka warunków, możemy zastosować funkcję logiczną *ORAZ* i zagnieździć ją w funkcji *JEŻELI* w argumente *Test logiczny*, tak jest to sformułowane w naszej formule:  $JEŻELI(ORAZ(F2>0;G2>0;H2>0;I2>0);...$

- Jeżeli chcemy, by procedura obliczeniowa uruchamiała się lub nie w wypadku, gdy co najmniej jeden warunek nie jest spełniony, wówczas możemy użyć polecenia *LUB* i także dopuszczalne jest zagnieźdzenie tego polecenia w argumente *Test logiczny* funkcji „JEŻELI”:

$LUB(F2=0;G2=0)*ORAZ(H2>0;I2>0);...$

Oczywiście w przedstawionej formule można dokonać pewnych uproszczeń. Na przykład za miast zapisu: „ $PIERWIASTEK((2*A2*B2)/(C2*D2))$ ” można po prostu wstawić *E2*, w której wcześniej wyliczona została wartość EWD według podstawowej formuły Harrisa/Wilsona.

## Arkusz WD

Równie często prezentowane są także warianty poszukiwania optymalnej wielkości dostawy, w których poszczególne elementy są uzmienniane przez ich funkcyjny przebieg względem wielkości dostawy.

W większości źródeł prezentowane są warianty, w których bierze się pod uwagę uzmiennianie:

- ceny zakupu *C* w zależności od wielkości partii zamówienia/dostawy
- koszt gromadzenia  $k_u$  w zależności

od wielkości partii zamówienia/dostawy.

W przypadkach związanych z symulacją minimalizującą koszty utrzymania i gromadzenia (przy uwzględnieniu uzależnienia kosztów transportu (składowej kosztu gromadzenia) oraz ceny zakupu od wielkości dostawy) w związku z zagrożeniem zapętlenia się arkusza kalkulacyjnego, mówiąc inaczej, w związku z groźbą powstania odwołań cyklicznych lepiej zostać przy formule [1].

$$Kg_z + KU_z = \frac{PP}{WD} k_u + 0,5 * WD * C * u_0$$

gdzie:

$$C = f(WD)$$

$$k_u = f(WD)$$

W arkuszu WD wartość komórek z obszaru od A1 do D2 (jeżeli obszar ma więcej niż jeden wiersz i więcej niż jedną kolumnę, wówczas podajemy rozpiętość obszaru od komórki z lewego górnego narożnika obszaru do komórki prawego dolnego narożnika A1:D2) jest identyczny z analogicznym obszarem z Arkusza EWD. W komórce E1 wpisujemy oznaczenie WD, komórki E2 i E3 (do E3 na start wpisujemy 10) będą komórkami zmienianymi, a ich wartość będzie determinowała inne wartości. Dodatkowo dodajemy formuły:

- W komórce F2 i F3 zmienny koszt gromadzenia  $Kg_z$ . Jest on liczony jako iloczyn liczby dostaw *Id* i jednostkowego zmiennego kosztu gromadzenia  $k_u$ . Przy czym liczbę dostaw uzyskujemy przez podzielenie planowanego popytu *PP* przez wielkość dostawy *WD* przybiera to zapis:  $=(A2/E2)*B2$  lub  $=(A3/E3)*B3$ .

- W komórce G2 i G3 zmienny koszt utrzymania  $KU_z$ . Jest on liczony jako iloczyn połowy wielkości dostawy *WD*, ceny *C* i wskaźnika okresowego kosztu utrzymania zapasu  $u_0$ . W Excelu

zapisujemy to następująco =  $0,5*E2*C2*D2$  lub  $=0,5*E3*C3*D3$ :

- W komórce H2 i H3 wpisujemy łączne koszty zmienne  $\text{ŁKZ}$  będące sumą wartości z komórek E2 i F2 lub E3 i F3. W arkuszu będzie to zapisane prostą formułą  $=E2+F2$ .

Problem, który musimy rozwiązać, można opisać następująco. Należy znaleźć wielkość dostawy, która minimalizowałaby koszty zmienne gromadzenia i utrzymania wiedząc, że:

- Cena zakupu uzależniona jest od wielkości partii zakupu czy inaczej dostawy, relacje ceny i wielkości dostawy przedstawia tabela 1, a zależność uwzględniona jest w komórce C3 za pomocą funkcji *WYSZUKAJ.PIONOWO*. Funkcja *WYSZUKAJ.PIONOWO* ma następującą postać:

*WYSZUKAJ.PIONOWO*(szukana wartość; Tabela tablica; Nr indeksu kolumny;Przeszukiwany zakres)

Jak widzimy, funkcja będąca bazą formuły jest funkcją składającą się z czterech argumentów. Pierwszy argument *szukana wartość* określa, jakiej wartości szukamy w pierwszej kolumnie obszaru. Drugi argument *Tabela tablica* określa obszar szukania. Trzeci argument *Nr indeksu kolumny* określa, z jakiej kolumny ma być wstawiana wartość przypisana do *szukanej wartości*. Jeśli dane w tabeli ułożone są ro-

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Popyt PP	$k_u$	Cena C	Współczynnik kosztu utrzymania $u_0$	Wielkość dostawy WD	Koszt zmienne gromadzenia pasów $Kg_z$	Koszt zmienne utrzymania zapasów $KU_z$	Łączne koszty zmienne
2	2000	500	300	0,3	149,07	6708,2	6708,2	13416,4
3	2000	500	400	0,3	10	100000,0	$=0,5*E3*C3*D3$	

Na początku działań w komórce E2 wpisujemy „z ręki” wartość wyliczoną w oparciu o formułę Harrisa lub inną dowolną dodatnią wielkość mniejszą od wielkości popytu. Robimy tak w celu uniknięcia dzielenia przez zero przy wyliczaniu liczby dostaw.

snąco, pomijamy czwarty argument lub oznaczamy *prawda*, jeżeli jest inaczej, oznaczamy wartość argumentu jako *fałsz*.

Formuła określająca relacje między wielkością zakupu/dostawy a ceną zakupu zapisana w komórce C3 i wykorzystu-

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Popyt PP	$k_u$	Cena C	Współczynnik kosztu utrzymania $u_0$	Wielkość dostawy WD	Koszt zmienne gromadzenia pasów $Kg_z$	Koszt zmienne utrzymania zapasów $KU_z$	Łączne koszty zmienne
2	2000	500	300	0,3	149,07	6708,2	6708,2	13416,4
3	2000	500	400	0,3	10	100000,0	$=0,5*E3*C3*D3$	

jąca funkcję WYSZUKAJ.PIONOWO przyjmie postać: =WYSZUKAJ.PIONOWO(E2; A6:B14;2)

Tab. 1. Zależność wielkość zamówienia / cena – tablica rabatowa

	A	B
5	WD	Cena
6	1	400
7	50	350
8	150	250
9	600	235
10	1000	220
11	1250	205
12	1500	150
13	1750	145
14	2000	140

- Koszt związany z zamówieniem i przyjęciem jednej dostawy  $k_u$  składa się z części stałej  $k_s = 300$  oraz części zależnej od kosztów transportu  $k_t$ , które uzależnione są od wielkości dostawy. Relację tę przedstawia tablica 2., a zależność ta uwzględniona jest w komórce B3 za pomocą funkcji WYSZUKAJ.PIONOWO. Dla komórki B3 przyjmuje ona postać: =WYSZUKAJ.PIONOWO(E2;C6:F13;2) Jak widać, szukaną wartością jest wielkość dostawy E2, natomiast wstawiana jest wartość z kolumny drugiej obszaru, czyli koszt gromadzenia przypisany danemu przedziałowi wielkości partii dostawy. Nie wykorzystaliśmy tu czwartego argumentu, ponieważ mamy do czynienia z szeregiem danych rozdzielczym, a nie punktowym.

Podane warunki ramowe naszych obliczeń zapisujemy w arkuszu WD.

Tab. 2. Relacje kosztów gromadzenia do wielkości dostawy

	A	D	E	F
5	WD	$k_u = k_s + k_t$	$k_s$	$k_t$
6	1	500	300	200
7	50	650	300	350
8	100	700	300	400
9	140	850	300	550
10	300	900	300	600
11	700	1050	300	750
12	1500	1100	300	800
13	2000	1250	300	950

Tablice 1 i 2 umieszczamy w obszarach odpowiednio A5:B14 oraz D5:G13, pozostałe pola zgodnie z rysunkiem.

Jak wcześniej wspomniano, działanie na formule pierwszej wymaga (w tradycyjnym podejściu) podstawiania kolejnych wielkości dostawy i sprawdzanie wartości łącznych kosztów zmiennych w celu znalezienia minimum. Proces kolejnego podstawiania i porównywania kosztów może ułatwić narzędzie solver, które możemy znaleźć w grupie poleceń Narzędzia.

Jeżeli nie mamy solvera na liście Narzędzi Excela, musimy go dodać, czynimy to przez naciśnięcie na liście narzędzi hasła Dodatki, a następnie wybranie z listy przez zaznaczenie na liście solvera. Po dodaniu i uruchomieniu solvera pojawia się formatka.

W naszym zadaniu wykorzystamy pola: *Komórki zmieniane* – w nim umieścimy komórkę przypisaną do wielkości dostawy WD czyli będzie to \$E\$2

- *Komórka celu* – naszym celem są koszty a dokładnie ich minimalizacja, zatem w polu *Komórka celu* wpisujemy \$H\$3 a poniżej mając do wyboru znaczniki Maks, Min i Wartość zaznaczamy Min.
- *Warunki ograniczające* – tu wpisujemy warunek zapobiegający podstawianiu do komórki E3 wartości ujemnych: \$E\$3 >= \$A\$6

Po takim sparametryzowaniu pól i odpowiednim zdefiniowaniu opcji solvera naciskamy przycisk Rozwiąż, to uruchamia pracę solvera zgodnie z warunkami zdefiniowanymi w polach.

Porównując wartość w komórce E2, gdzie formuła nie uwzględniała uzależnienia ceny oraz kosztów gromadzenia od wielkości dostawy z wartością komórki E3, gdzie zależności te były uwzględnione obserwujemy wzrost wielkości dostawy z 149 do 212.

The screenshot shows the Solver Parameters dialog box with the following settings:
 

- Set Objective: \$H\$3
- To:  Max  Min  Value Of: 0
- By Changing Variable Cells: \$E\$2
- Subject to the Constraints: \$E\$3 >= \$A\$6
- Make Unconstrained Variables Non-Negative:  (checked)
- Select a Solving Method:  GRG Nonlinear engine  LP Simplex LP  Evolutionary (selected)
- Options:  Make a Variable  Make a Constant  Make a Constraint  Make a Scenario
- Help:  Solver Help
- Solving Method: Select a GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are Smooth Nonlinear. Select LP Simplex LP engine for Solver Problems that are Linear Smooth. Select Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.
- Help:  Solver Help

Warunki ograniczające wprowadzamy do solvera przez kliknięcie Dodaj a następnie zdefiniowanie formuły.

Warto też zapoznać się z Opcjami solvera

The screenshot shows the Excel spreadsheet with the following results:
 

- Cell E2 (WD): 212
- Cell H3 (Total Cost): 15968,7
- Cell E3 (Constraint): 212,92

## Podsumowanie

Zdaję sobie sprawę, że przytoczone tu przykłady nie w pełni prezentują możliwości zastosowania Excela w optymalizacji wielkości dostawy czy też w szerszej perspektywie w zarządzaniu zapasami. Celem artykułu było raczej przypomnienie o możliwościach arkusza kalkulacyjnego i ich potencjalnym wykorzystaniu w kalkulacjach logistycznych niż ich kompleksowa prezentacja. Jednakże chęć do pracy z tym narzędziem.

Doskonałym źródłem zagadnień, gotowych problemów do rozwiązania a przez to do wykorzystania Excela jest pozycja dra S. Krzyżaniaka pt. „Podstawy zarządzania zapasami w przykładach”, oraz „Zarządzanie magazynem w przykładach”, autorstwa M. Gubały i J. Popielasa.

Na bazie przytoczonych tam zadań można z powodzeniem konstruować własne modele czy formuły w arkuszach kalkulacyjnych.