



## **Lukasz Tomczyk**

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
Wydział Nauk Technicznych  
Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa  
lukasz.tomczyk@uwm.edu.pl

# **OPTIMALIZACJA DZIAŁAŃ RATOWNICTWA MEDYCZNEGO W ZDARZENIU O CHARAKTERZE MASOWYM**

**Streszczenie:** W niniejszym artykule autor rozpatrzył zagadnienie optymalizacji działań ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia o charakterze masowym. Przedstawiono charakterystykę jakości działania Wojewódzkiego Systemu Ratownictwa (WSR) w przypadku zdarzeń o charakterze masowym. Dokonano analizy zależności wartości składowych przyjętej miary jakości działania ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia o charakterze masowym od jego uwarunkowań i dyslokacji szpitalnych oddziałów ratunkowych oraz środków transportu medycznego WSR. Sformułowano zadanie optymalizacji działań ratownictwa medycznego w zdarzeniu masowym oraz podano metodę jego rozwiązania.

**Słowa kluczowe:** zdarzenie masowe, ratownictwo medyczne, optymalizacja.

## **Wprowadzenie**

Przez zdarzenie o charakterze masowym należy rozumieć takie zdarzenie, które powoduje zagrożenie życia lub zdrowia dużej liczby osób, niestety jednak deficyt sił i środków Wojewódzkiego Systemu Ratownictwa (WSR) nie pozwala na udzielenie w pełnym zakresie i w odpowiednim czasie pomocy medycznej wszystkim osobom poszkodowanym w tym zdarzeniu. W takim przypadku nie wiedza i umiejętności zespołów ratownictwa medycznego (ZRM) przybyłych na miejsce zdarzenia, a organizacja i kierowanie działaniami ratowniczymi mają tu zasadnicze znaczenie [Trzos, 2007].

Od początku lat 90. XX w. można zauważyć wzrost zainteresowania problemem doskonalenia organizacji prowadzenia działań ratownictwa medycznego

podczas zdarzeń masowych. Postęp prac w tym obszarze badawczym w dużej mierze związany jest z postępem techniki. Nowoczesne technologie teleinformatyczne pozwalają na pozyskiwanie i przetwarzanie danych dotyczących zdarzenia masowego w czasie rzeczywistym, a mobilność urządzeń końcowych systemów informatycznych pozwala służbom ratowniczym na pracę w często ekstremalnych warunkach terenu akcji ratowniczej zdarzenia masowego. W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele opracowań dotyczących zagadnienia związanego z optymalizacją działań ratownictwa medycznego w przypadku zdarzeń masowych. Proponowane modele przedstawione zostały m.in. w [Cotta, 2011; Rauner i in., 2012; Mills, 2013; Wilson i in., 2012]. Jednym z ciekawszych rozwiązań optymalnego przydziału sił i środków ratownictwa medycznego osobom poszkodowanym jest model zaproponowany w [Guttinger, Godehardt i Zinnen, 2011]. Autorzy odwzorowują w modelu rzeczywiste uwarunkowania zdarzenia masowego, w którym osoby poszkodowane przybywają do szpitali w określonym odstępie czasu w niewielkich grupach. Poprzez połączenie metody symulowanego wyżarzania z metodą D'Hondta i algorytmem zachłannym wyznaczono przydział środka transportu i docelowego ośrodka leczenia każdej osobie poszkodowanej. Uwzględniono ponadto cząstkowe czasy oczekiwania osób poszkodowanych na obsługę medyczną zarówno na miejscu zdarzenia, jak i w szpitalu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz rozmów z ekspertami medycyny ratunkowej autor identyfikuje potrzebę opracowania zadania optymalizacji działań ratownictwa medycznego w przypadku zdarzeń masowych, w którym uwzględnione są wszystkie najważniejsze kryteria oceny skuteczności działań WSR. W dążeniu do wyznaczenia jak najbardziej wiarygodnej i kompleksowej oceny, poza etycznymi względami dotyczącymi zdrowia i życia osób poszkodowanych uwzględnione zostaną także aspekty ekonomiczne, które nierozłącznie towarzyszą każdej akcji ratunkowej.

Jakość prowadzenia działań WSR opisana została za pomocą wielkości:

$$W = \langle W_1, W_2, W_3, W_4 \rangle, \quad (1)$$

przy czym:

$W_1$  – liczba zgonów wśród osób poszkodowanych w danym zdarzeniu,

$W_2$  – liczba osób dotkniętych trwałym kalectwem,

$W_3$  – koszty przeprowadzenia akcji ratunkowej,

$W_4$  – koszty leczenia i rehabilitacji.

Liczba zgonów oraz liczba osób dotkniętych trwałym kalectwem zależy w głównej mierze od:

- czasu, jaki upłynie od chwili zajścia zdarzenia do momentu rozpoczęcia medycznych czynności ratunkowych oraz leczenia w szpitalnych oddziałach ratunkowych (SOR).
- liczby osób poszkodowanych,
- stanu powypadkowego osób poszkodowanych,
- dyslokacji baz transportowych ratownictwa medycznego (BTRM) i SOR względem miejsca zdarzenia.

Koszt przeprowadzenia akcji ratunkowej zależy przede wszystkim od:

- kosztu transportu medycznego osób poszkodowanych – rodzaju użytych środków transportu,
- kosztu leczenia ratunkowego poszkodowanych w zdarzeniu w SOR.

Duża liczba czynników wpływających na wartości składowych (1) powoduje, że są one wielkościami losowymi. Decyzje o sposobie prowadzenia działań ratowniczych podejmowane są *ex ante*. Zatem za miarę jakości przedsięwzięcia ratowniczego w przypadku zdarzenia masowego powinny być przyjęte wartości oczekiwane wielkości (1):

$$E(W) = \langle E(W_1), E(W_2), E(W_3), E(W_4) \rangle, \quad (2)$$

przy czym:

$E(W_1)$  – wartość oczekiwana liczby zgonów spośród osób poszkodowanych w danym zdarzeniu,

$E(W_2)$  – wartość oczekiwana liczby osób dotkniętych trwałym kalectwem wśród poszkodowanych w danym zdarzeniu,

$E(W_3)$  – wartość oczekiwana kosztów przeprowadzenia akcji ratunkowej po zajściu zdarzenia masowego,

$E(W_4)$  – wartość oczekiwana kosztów leczenia i rehabilitacji.

Zdarzenie o charakterze masowym opisuje się za pomocą trójki:

$$z = \langle z_1, z_2, z_3 \rangle, \quad (3)$$

gdzie:

$z_1$  – miejsce zdarzenia ujęte w postaci współrzędnych geograficznych w zapisie dziesiętnym (DD):

$$z_1 = \langle \varphi^{szer}, \lambda^{dl} \rangle, \varphi^{szer} \in [-90; 90], \lambda^{dl} \in [-180; 180],$$

$z_2$  – czas, który upłynął od momentu zajścia zdarzenia do momentu powiadomienia WSR,

$z_3$  – charakterystyka stanu zdrowia osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym:

$$z_3 = (z_{3,1}, \dots, z_{3,l}, \dots, z_{3,L}), \quad (4)$$

gdzie  $L$  – liczba osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym, przy czym  $z_{3,l}$  – stan (charakterystyka)  $l$ -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu masowym.

Na podstawie analizy przedmiotowej literatury [Ciećkiewicz, 2008; Gugala, 2005; Guła 2007; Jakubaszko, 2007; Zawadzki, 2007] oraz wywiadów przeprowadzonych z ekspertami medycyny ratunkowej przyjęto, że stan  $l$ -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu masowym charakteryzowany będzie za pomocą szóstki:

$$z_{3,l} = s_l = \langle s_{l,1}, s_{l,2}, s_{l,3}, s_{l,4}, s_{l,5}, s_{l,6} \rangle, \quad l \in \mathbf{L}, \quad (5)$$

gdzie:

$s_{l,1}$  – stopień ciężkości stanu urazowego,

$s_{l,2}$  – stopień stanu świadomości,

$s_{l,3}$  – stopień zaburzeń podstawowych czynności życiowych,

$s_{l,4}$  – płeć,

$s_{l,5}$  – istnienie ciąży,

$s_{l,6}$  – wiek,

$\mathbf{L} = \{l : l = \overline{1, L}\}$  – zbiór numerów osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym.

Szczegółowy opis oceny stanu zdrowia osoby poszkodowanej został podany w [Kołodziński i in., 2011].

## 1. Zasady kwalifikacji osób poszkodowanych do grup priorytetu obsługi medycznej

Pierwszym zadaniem organizacyjnym przedsięwzięcia ratownictwa medycznego w odniesieniu do zdarzenia masowego jest ustalenie liczby i stanu zdrowia osób poszkodowanych. Informacje te niezbędne są do określenia:

- 1) priorytetu obsługi medycznej – przeprowadzenia segregacji medycznej osób poszkodowanych w zdarzeniu,
- 2) potrzeb transportowych,
- 3) potrzeb odnośnie do leczenia szpitalnego.

Zgodnie z procedurą systemu segregacji START [Jakubaszko, 2007; Zawadzki, 2007], w zdarzeniu o charakterze masowym wyróżnia się cztery grupy priorytetu obsługi medycznej osób poszkodowanych. Podczas akcji ratunkowej osoby te oznaczane są za pomocą kolorów lub numerów [Jakubaszko, 2007; Zawadzki, 2007]. Kolory (numery) oznaczają ściśle określone priorytety obsługi medycznej i transportu osób poszkodowanych do SOR. Przyporządkowanie osób poszkodowanych do danej grupy priorytetowej dokonywane jest na podstawie oceny stanu ich zdrowia. Niech:

$g$  oznacza wielkość określającą priorytet obsługi medycznej osoby poszkodowanej,  $g = \overline{1, 4}$ ,

przy czym:

$g = 1$  oznacza konieczność udzielenia natychmiastowej pomocy w momencie dotarcia służb ratownictwa medycznego, zgodnie z [Jakubaszko, 2007; Zawadzki, 2007],

$g = 2$  oznacza konieczność pilnej obsługi z możliwością ewentualnego jej odroczenia, zgodnie z [Jakubaszko, 2007],

$g = 3$  oznacza obsługę medyczną z opóźnieniem do kilku godzin, zgodnie z [Jakubaszko, 2007],

$g = 4$  oznacza rezygnację z obsługi medycznej. Do tej grupy priorytetowej przyporządkowane są osoby poszkodowane, które uznane są za nierokujące przeżycia w czasie do 24 godzin od momentu zajścia zdarzenia, zgodnie z [Zawadzki, 2007].

$\mathbf{L}_g$  oznacza zbiór numerów osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym zakwalifikowanych do  $g$ -tej grupy priorytetu obsługi medycznej:

$$\mathbf{L}_g = \{l : d_g^{grupa}(l) = 1, l \in \mathbf{L}\}, g = \overline{1, 4}, \quad (6)$$

gdzie:

$$d_g^{grupa}(l) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } l\text{-ta osoba poszkodowana została} \\ & \text{zakwalifikowana do } g\text{-tej grupy,} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym,} \end{cases} \quad (7)$$

przy czym  $\forall_{g, h \in \mathbf{G}} : g \neq h \Rightarrow \mathbf{L}_g \cap \mathbf{L}_h = \emptyset$ .

Warunki przydziału  $l$ -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu masowym do  $g$ -tej grupy priorytetu obsługi medycznej określono m.in. w [Kołodziński i in., 2011].

## 2. Charakterystyka Wojewódzkiego Systemu Ratownictwa

W [Zawadzki, 2007] stwierdza się, że „szczególne znaczenie podczas katastrofy ma dostępność wolnych bloków operacyjnych, w tym stołów operacyjnych, specjalistycznego personelu medycznego oraz stanowisk intensywnej terapii w szpitalach. (...) Niewłaściwa alokacja poszkodowanych jest jednym z najczęstszych błędów służb ratowniczych w czasie katastrofy i może istotnie ograniczyć możliwości udzielenia specjalistycznej pomocy medycznej poszkodowanym w najcięższym stanie”.

Ośrodki leczenia ratunkowego osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym opisane zostały następująco:

$\mathbf{S}$  – zbiór numerów szpitalnych oddziałów ratunkowych dyslokowanych na obszarze odpowiedzialności WSR:

$$\mathbf{S} = \{s : s = \overline{1, S}\}, \quad (8)$$

przy czym  $S$  – liczba SOR dyslokowanych na obszarze odpowiedzialności WSR.

Aktualne możliwości świadczenia usług ratownictwa medycznego przez SOR o numerze  $s \in \mathbf{S}$  scharakteryzowano za pomocą trójki:

$$h_s = \langle h_{s,1}, h_{s,2}, h_{s,3} \rangle, \quad s \in \mathbf{S}, \quad (9)$$

gdzie:

$h_{s,1}$  – miejsce położenia  $s$ -tego SOR ujęte w postaci współrzędnych geograficznych w zapisie dziesiętnym (DD):

$$h_{s,1} = \langle \varphi^{szer}, \lambda^{dl} \rangle, \quad \varphi^{szer} \in [-90; 90], \quad \lambda^{dl} \in [-180; 180],$$

$h_{s,2}$  – liczba osób poszkodowanych, jaką może obsłużyć  $s$ -ty SOR, przy czym

$$h_{s,2} \geq 0,$$

$h_{s,3}$  – zbiór numerów rodzajów urazów powypadkowych obsługiwanych przez  $s$ -ty SOR,

$$h_{s,3} = \{u : d_s(u) = 1, u \in \mathbf{U}\}, \quad (10)$$

przy czym

$$d_s(u) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } s\text{-ty SOR może przyjąć poszkodowanego z urazem } u \in \mathbf{U}, \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

Siły i środki transportu ratownictwa medycznego charakteryzowane są następująco:

**B** – zbiór numerów baz transportowych ratownictwa medycznego (BTRM) w WSR:

$$\mathbf{B} = \{b : b = \overline{1, B}\}, \quad (11)$$

przy czym **B** – liczba wszystkich BTRM WSR.

Aktualne możliwości świadczenia usług ratownictwa medycznego (na daną chwilę  $t$ ) przez bazę transportową ratownictwa medycznego o numerze  $b \in \mathbf{B}$  charakteryzowane są za pomocą dwójki:

$$a_b = \langle a_{b,1}, a_{b,2} \rangle, \quad (12)$$

gdzie:

$a_{b,1}$  – miejsce położenia  $b$ -tej BTRM ujęte w postaci współrzędnych geograficznych w zapisie dziesiętnym (DD),

$$z_1 = \langle \varphi^{szer}, \lambda^{dl} \rangle, \varphi^{szer} \in [-90; 90], \lambda^{dl} \in [-180; 180],$$

$a_{b,2}$  – charakterystyka środków transportu  $b$ -tej BTRM:

$$a_{b,2} = \langle a_{b,2,1}, \dots, a_{b,2,r}, \dots, a_{b,2,R} \rangle, \quad (13)$$

gdzie:

$a_{b,2,r}$  – liczba  $r$ -tego rodzaju środków transportu RM stacjonujących w  $b$ -tej BTRM, przy czym,  $a_{b,2,r} \geq 0$ ,  $R$  – liczba wyróżnianych rodzajów środków transportu.

### 3. Wyznaczanie wartości składowych miary jakości działania ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia masowego

We wstępie niniejszego artykułu podano postać miary (1) jakości działania ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia masowego. Każda z jej składowych zależy od wielu czynników. W niniejszym punkcie zostanie określona ich zależność od czynników istotnie wpływających na ich wartości.

#### 3.1. Postać składowej charakteryzującej liczbę zgonów wśród osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym

Przyjęto oznaczenia:

$W_{1,g}$  – zmienna losowa określająca „zgon osoby poszkodowanej zakwalifikowanej do  $g$ -tej grupy priorytetu obsługi medycznej”,

$$W_{1,g} = \begin{cases} 1, & \text{gdy zakwalifikowana do } g\text{-tej grupy osoba umrze,} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (14)$$

Przeżycie osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym uwarunkowane będzie stopniem ciężkości urazów doznanych przez te osoby, a także możliwościami SOR-ów, do których zostaną one przetransportowane.

Niech:

$\mathbf{S}_l^{uraz}$  – zbiór numerów SOR-ów, które są w stanie skutecznie obsłużyć  $l$ -tego poszkodowanego ze względu na doznane przez niego najcięższe urazy.

Prawdopodobieństwo zgonu  $l$ -tej osoby poszkodowanej w zależności od wartości  $\tau$  określa wzór:

$$f^{zgon}(l, \tau, \mathcal{G}, z_2, s) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } s \notin \mathbf{S}_l^{uraz}, \\ E(W_{1,g} / \tau + \mathcal{G} + z_2), & l \in \mathbf{L}_g, g \in \mathbf{G} \\ \text{w przypadku przeciwnym,} \end{cases} \quad (15)$$

przy czym:

$f^{zgon}(l, \tau, \mathcal{G}, z_2, s) = 1$ , oznacza, że  $l$ -ta osoba nie przeżyje przy transportowaniu jej do  $s$ -tego SOR,

$E(W_{1,g} / \tau + \mathcal{G} + z_2)$  – warunkowa wartość oczekiwana zmiennej losowej  $W_{1,g}$

przy ustalonej wartości  $\tau$ ,  $\mathcal{G}$  oraz  $z_2$ , przy czym:

$z_2$  – czas, który upłynął od momentu zajścia zdarzenia do momentu powiadomienia WSR,

$\tau$  – czas od momentu powiadomienia WSR do momentu dotarcia służb medycznych na miejsce zdarzenia,

$\mathcal{G}$  – czas od momentu dotarcia służb medycznych na miejsce zdarzenia do rozpoczęcia leczenia w SOR.

Warunkowe wartości oczekiwane zmiennej losowej  $W_{1,g}$  przy ustalonej wartości czasu mogą zostać scharakteryzowane przy użyciu funkcji logistycznej [www 1], powszechnie wykorzystywanej do podobnych celów w medycynie. Wartości tej funkcji oszacowane są na podstawie danych statystycznych będących wynikiem zależności prawdopodobieństwa przeżycia osób poszkodowanych w określonym stanie powypadkowym od upływu czasu.

Oznaczmy przez:

$t^{przejazdu}(y, z_1, r)$  – czas potrzebny na przejazd pomiędzy miejscem  $y$  a miejscem zdarzenia  $z_1$  przez środek transportu  $r$ -tego rodzaju:



$$t^{\text{przejazdu}}(y, z_1, r) = \frac{d_{z_1}(r, y)}{V_r}, \quad (16)$$

przy czym:

$d_{z_1}(r, y)$  – droga, którą musi pokonać  $r$ -tego rodzaju środek transportu z miejsca  $y$  do miejsca zdarzenia ( $z_1$ ),

$V_r$  – średnia prędkość  $r$ -tego rodzaju środka transportu RM.

Zatem wartość oczekiwana liczby zgonów z uwzględnieniem czasu, jaki upłynie w chwili dostarczenia kolejnych osób poszkodowanych do SOR, przyjmie postać:

$$EW_1 = \sum_{l \in \mathbf{L}} f^{\text{zgon}}(l, t^{\text{przejazdu}}(a_{b,1}, z_1, r), t^{\text{przejazdu}}(h_{s,1}, z_1, r), z_2, s), \quad (17)$$

przy czym:  $b \in \mathbf{B}$ ,  $s \in \mathbf{S}$ ,  $r = \overline{1, R}$ ;  $z_1, z_2$  – zgodnie z (3).

### 3.2. Postać składowej charakteryzującej liczbę osób dotkniętych trwałym kalectwem po zajściu zdarzenia

Oznaczmy przez:

$W_{2,u}$  – zmienną losową charakteryzującą „doznanie kalectwa przez osobę poszkodowaną z powodu urazu  $u$ -tego rodzaju”:

$$W_{2,u} = \begin{cases} 1, & \text{gdy osoba poprzez doznanie } u\text{-tego rodzaju urazu} \\ & \text{zostanie dotknięta kalectwem,} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (18)$$

$\mathbf{U}_l^{\text{pow,kal}}$  – zbiór urazów powypadkowych, których doznała  $l$ -ta osoba poszkodowana, mogących być przyczyną jej trwałego kalectwa.

Funkcję określającą prawdopodobieństwo doznania trwałego kalectwa przez  $l$ -tą osobę poszkodowaną określa wzór:

$$f^{\text{kal}}(l, \tau, \mathcal{G}, z_2, s) = \begin{cases} 1 & \text{dla } \mathbf{U}_l^{\text{pow,kal}} \not\subset h_{s,3}, \\ \max_{u \in \mathbf{U}_l^{\text{pow,kal}}} E(W_{2,u} / \tau + \mathcal{G} + z_2) & \text{dla } \mathbf{U}_l^{\text{pow,kal}} \subset h_{s,3}, \\ 0 & \text{dla } \mathbf{U}_l^{\text{pow,kal}} = \emptyset. \end{cases} \quad (19)$$

przy czym:

$E(W_{2,u} / \tau + \mathcal{G} + z_2)$  – warunkowa wartość oczekiwana zmiennej losowej  $W_{2,u}$  przy ustalonej wartości  $\tau$ ,  $\mathcal{G}$  oraz  $z_2$ , przy czym:

$z_2$  – czas, który upłynął od momentu zajścia zdarzenia do momentu powiadomienia WSR,

$\tau$  – czas od momentu powiadomienia WSR do momentu dotarcia służb medycznych na miejsce zdarzenia,

$\varrho$  – czas od momentu dotarcia służb medycznych na miejsce zdarzenia do rozpoczęcia leczenia w SOR.

Warunkowe wartości oczekiwane zmiennej losowej  $W_{2,u}$  przy ustalonej wartości czasu mogą być szacowane na podstawie danych statystycznych dotyczących prawdopodobieństwa dotknięcia trwałym kalectwem osób poszkodowanych z doznanym określonym rodzajem urazu w zależności od upływu czasu.

Zatem wartość oczekiwana liczby osób dotkniętych trwałym kalectwem z uwzględnieniem czasu, jaki upłynie do momentu dotarcia do SOR, przyjmie postać:

$$EW_2 = \sum_{l \in L} f^{kal} \left( l, t^{\text{przejazdu}}(a_{b,1}, z_1, r), t^{\text{przejazdu}}(h_{s,1}, z_1, r), z_2, s \right), \quad (20)$$

przy czym:  $b \in \mathbf{B}$ ,  $s \in \mathbf{S}$ ,  $r = \overline{1, R}$ ;  $z_1, z_2$  – zgodnie z (3).

### 3.3. Postać składowej charakteryzującej koszty przeprowadzenia akcji ratunkowej

Przyjęto oznaczenia:

$W_{3,r}^{BTRM}$  – zmienna losowa określająca „koszty użycia środków transportu  $r$ -tego rodzaju”, rozpatrywane jako regresja pierwszego rodzaju, tj.  $E(W_{3,r}^{BTRM} / \lambda)$ ,  $\lambda$  – czas używania środków transportu.

Zmiana wartości oczekiwanej  $W_{3,r}^{BTRM}$  w odniesieniu do czasu ma charakter liniowy, np. koszt wykorzystania danego rodzaju środka transportu jest liczony według stawki godzinowej.

$W_{3,u}^{SOR}$  – zmienna losowa „koszt leczenia  $u$ -tego rodzaju urazu w SOR”, rozpatrywane jako regresja pierwszego rodzaju, tj.  $E(W_{3,u}^{SOR} / \gamma)$ ,  $\gamma$  – czas od momentu zajścia zdarzenia do momentu dostarczenia osoby poszkodowanej do SOR.

Wraz z upływem czasu skutki obrażeń u osoby poszkodowanej stają się coraz bardziej rozległe. Konsekwencją tego może być nie tylko wydłużenie czasu leczenia osoby poszkodowanej w SOR, ale także potrzeba zaangażowania bar-

dziej wyspecjalizowanego zespołu lekarskiego. Zmiana wartości oczekiwanej  $W_{3,u}^{SOR}$  w odniesieniu do czasu może przyjąć zatem charakter wykładniczy.

Uwzględniając powyższe, wartość oczekiwana kosztów przeprowadzenia akcji ratunkowej podczas zdarzenia określona zostanie następująco:

$$EW_3 = \sum_{l \in \mathbf{L}} \left( E(W_{3,r}^{BTRM} / \lambda) + \sum_{u \in \mathbf{U}_l^{pow} \cap h_{s,3}} E(W_{3,u}^{SOR} / \gamma) \right), \quad (21)$$

gdzie:

$$\lambda = t^{przejazdu}(a_{b,1}, z_1, r) + t^{przejazdu}(h_{s,1}, z_1, r),$$

$$\gamma = z_2 + t^{przejazdu}(a_{b,1}, z_1, r) + t^{przejazdu}(h_{s,1}, z_1, r),$$

$$b \in \mathbf{B}, s \in \mathbf{S}, r = \overline{1, R},$$

$$z_1, z_2 - \text{zgodnie z (3)}.$$

### 3.4. Postać składowej charakteryzującej koszty długotrwałego leczenia

Przyjęto oznaczenia:

$W_{4,n}$  – zmienna losowa określająca „koszty długotrwałego leczenia  $n$ -tego stopnia ciężkości urazu nieskutecznie obsłużonego w SOR”, rozpatrywane jako regresja pierwszego rodzaju, tj.  $E(W_{4,n} / t)$ , gdzie  $t$  – liczba nieskutecznie obsłużonych urazów danego stopnia ciężkości.

Obrażenia nieskutecznie wyleczone w trakcie trwania akcji ratunkowej wymagają w późniejszym czasie bardziej specjalistycznego leczenia, czasem wtórnej operacji, a także zazwyczaj dłuższego czasu rehabilitacji. Zmiana wartości oczekiwanej  $W_{4,n}$  w odniesieniu do czasu może zatem przyjąć charakter wykładniczy.

Funkcję określającą liczbę nieskutecznie obsłużonych urazów  $n$ -tego stopnia ciężkości przez  $l$ -tą osobę poszkodowaną określono następująco:

$$f^{\text{liczba\_urazów}}(l, n, s) = \sum_{u \in \mathbf{U}_{l,n}^{pow} \cap \mathbf{U}_l^{pow, kal} \setminus h_{s,3}} d_n(u), l \in \mathbf{L}, n \in \mathbf{N}, s \in \mathbf{S}, \quad (22)$$

przy czym:

$d_n(u)$  – funkcja określająca, czy  $u$ -ty uraz jest  $n$ -tego stopnia ciężkości, zgodnie z (6),

$U_{l,n}^{pow}$  – zbiór urazów powypadkowych  $n$ -tego stopnia ciężkości, których doznała  $l$ -ta osoba,

$U_l^{pow,kal}$  – zbiór urazów powypadkowych, których doznała  $l$ -ta osoba.

Zatem wartość oczekiwana kosztów długotrwałego leczenia przyjmie postać:

$$EW_4 = \sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{n=1}^{n=s_{l,1}} E(W_{4,n} / f^{liczba\_urazow}(l, n, s)), \quad (23)$$

przy czym:  $s \in \mathbf{S}$ ,  $s_{l,1}$  – zgodnie z (5).

#### 4. Sformułowanie zadania optymalizacji działań ratownictwa medycznego w zdarzeniu masowym

Zadanie optymalizacji jakości działań ratownictwa medycznego względem poszczególnych osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym polega na określeniu takiego przydziału sił i środków WSR do obsługi medycznej tych osób, który minimalizuje: liczbę zgonów, liczbę osób dotkniętych trwałym kalectwem, koszt obsługi zdarzenia oraz koszty długotrwałego leczenia. Zadanie to opisano za pomocą czwórki:

$$(X, EW, M(P), H), \quad (24)$$

gdzie:

$X$  – zbiór rozwiązań dopuszczalnych,  $X \subset Q$  :

$$X = \{x_i = (x_i(1), \dots, x_i(l), \dots, x_i(L)) : i = \overline{1, I}, l \in L, \quad (25)$$

przy czym:

$I$  – liczba rozwiązań dopuszczalnych,

$x_i(l)$  –  $i$ -te rozwiązanie dopuszczalne, w którym przypisana zostaje BTRM (z której wysłany zostanie odpowiedniego rodzaju środek transportu przyporządkowany SOR) do przeprowadzenia transportu  $l$ -tej osoby poszkodowanej:

$$x_i(l) = \langle x_{i,1}(l), x_{i,2}(l), x_{i,3}(l) \rangle, l = \overline{1, L}, \quad (26)$$

przy czym:

$x_{i,1}(l)$  –  $i$ -te rozwiązanie przyporządkowania BTRM, z której wysłany zostanie środek transportu przypisany  $l$ -tej osobie poszkodowanej,  $x_{i,1}(l) \in \mathbf{B}$ ,

$x_{i,2}(l)$  –  $i$ -te rozwiązanie przyporządkowania SOR  $l$ -tej osobie poszkodowanej,

$x_{i,2}(l) = s \in \mathbf{S}$ ,

$x_{i,3}(l)$  –  $i$ -te rozwiązanie przyporządkowania środka transportu  $r$ -tego rodzaju  $l$ -tej osobie poszkodowanej,  $x_{i,3}(l) = r$ ;  $r = \overline{1, R}$ ,

$\mathbf{Q}$  – zbiór wszystkich możliwości przyporządkowania, zawierający również przyporządkowania niespełniające ograniczeń  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{X} \subset \mathbf{Q}$ :

$$\mathbf{Q} = \left\{ q_c = (q_c(1), \dots, q_c(l), \dots, q_c(L)) : c = \overline{1, C}, \right\}, l = \overline{1, L}, \quad (27)$$

gdzie:  $q_c(l) = \langle q_{c,1}(l), q_{c,2}(l), q_{c,3}(l) \rangle$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,

przy czym:

$q_{c,1}(l)$ ,  $q_{c,2}(l)$ ,  $q_{c,3}(l)$  definiowanych analogicznie jak  $x_{i,1}(l)$ ,  $x_{i,2}(l)$ ,  $x_{i,3}(l)$  w (2),

$C$  – liczba możliwych rozwiązań,

$EW$  – funkcja ocen wyróżnionych wariantów przyporządkowania sił i środków WSR po zajściu danego zdarzenia masowego:

$$EW : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y} \subset \mathcal{R}^4, \quad (28)$$

gdzie:

$\mathbf{Y}$  – zbiór wartości ocen jakości rozwiązań dopuszczalnych,

$\mathcal{R}$  – zbiór liczb rzeczywistych,

$$EW(x_i) = (EW_1(x_i), EW_2(x_i), EW_3(x_i), EW_4(x_i)), \quad (29)$$

przy czym:  $x_i \in \mathbf{X}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,

$EW_1(x_i)$  – wartość oczekiwana liczby zgonów spośród osób poszkodowanych w danym zdarzeniu przy  $i$ -tym rozdysponowaniu sił i środków,

$EW_2(x_i)$  – wartość oczekiwana liczby osób z trwałym kalectwem przy  $i$ -tym rozdysponowaniu sił i środków,

$EW_3(x_i)$  – wartość oczekiwana kosztów przeprowadzenia akcji ratowniczej podczas zdarzenia masowego przy  $i$ -tym rozdysponowaniu sił i środków,

$EW_4(x_i)$  – wartość oczekiwana kosztów leczenia i rehabilitacji przy  $i$ -tym rozdysponowaniu sił i środków,

$M(P)$  – wybrany model preferencji decydenta,

$\mathbf{H}$  – zbiór ograniczeń nałożonych na rozwiązania dopuszczalne:

$$\mathbf{H} = \{h_1, h_2, h_3\}, \quad (30)$$

przy czym:

$h_1, h_2, h_3$  to ograniczenia równościowe:

$$h_1(q_c) = h_2(q_c) = h_3(q_c) = 1, q_c \in \mathcal{Q}, \quad (31)$$

gdzie:

$h_1$  – funkcja ograniczenia przyporządkowania poszkodowanych do SOR-ów obsługujących ich najcięższe urazy:

$$h_1(q_c) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } \forall_{l \in L} \left( \mathcal{S}_l^{uraz} \neq \emptyset \wedge s \in \mathcal{S}_l^{uraz} \vee \mathcal{S}_l^{uraz} = \emptyset \wedge \right. \\ & \left. \wedge T^{przejazdu}(h_{s,1}, z_1, r) = \min_{s^* \in \mathcal{S}} T^{przejazdu}(h_{s^*,1}, z_1, r) \right), \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (32)$$

$h_2$  – funkcja ograniczenia liczby środków transportu określonego rodzaju:

$$h_2(q_c) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } \forall_{b \in B} \forall_r (a_{b,2,r} \geq f^{dysp}(q_c, b, r)), \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (33)$$

przy czym:

$f^{dysp}(q_c, b, r)$  – funkcja określająca liczbę rozdysponowanych środków transportu  $r$ -tego rodzaju z  $b$ -tej BTRM w  $c$ -tym rozwiązaniu:

$$f^{dysp}(q_c, b, r) = \sum_{l \in L} d^{BRM}(q_c, b, r, l), \quad (34)$$

$$d^{BRM}(q_c, b, r, l) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } (q_{c,1}(l) = b) \wedge (q_{c,3}(l) = r), \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (35)$$

$h_3$  – funkcja ograniczenia liczby miejsc w SOR:

$$h_3(q_c) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } \forall_{s \in \mathcal{S}} (h_{s,2} \geq f^{dow}(q_c, s)), \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (36)$$

przy czym:

$f^{dow}(q_c, s)$  – funkcja określająca liczbę osób poszkodowanych przewiezionych do  $s$ -tego SOR w  $c$ -tym rozwiązaniu,

$$f^{dow}(q_c, s) = \sum_{l \in L} d^{SOR}(q_c, s, l), \quad (37)$$

$$d^{SOR}(q_c, s, l) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } q_{c,2}(l) = s, \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (38)$$

## 5. Metoda rozwiązania zadania optymalizacji działań ratownictwa medycznego w zdarzeniu masowym

Składowe  $E(W_j)$ , ( $j = \overline{1,4}$ ) mają różne miana i zakresy zmienności. Zatem należy dokonać ich normalizacji zgodnie z poniższą zależnością:

$$\hat{W}_j(x_i) = \frac{EW_j(x_i) - \min_i EW_j(x_i)}{\max_i EW_j(x_i) - \min_i EW_j(x_i)}, \quad i : i = \overline{1,I}, j : j = \overline{1,4}. \quad (39)$$

Wybór najlepszej metody optymalizacji w omawianym problemie stanowi kierunek dalszych prac autora. W niniejszym opracowaniu jako metodę wyznaczania rozwiązań optymalnych przyjęto metodę typu *a priori* „ważonych kryteriów” [Kaliszewski, 2008]. Niech:

$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$  – wektor wag poszczególnych wskaźników oceny rozwiązania dopuszczalnego, przy czym  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$ .

Wagi poszczególnych kryteriów są określane na podstawie decyzji osoby odpowiedzialnej za koordynację działań WSR, czyli Lekarza Koordynatora Ratownictwa Medycznego.

Definiuje się funkcję zastępczą  $Z$ :

$$Z(x) = \sum_{j=1}^4 \hat{W}_j(x) \cdot \alpha_j \rightarrow MIN, \quad (40)$$

gdzie:

$\hat{W}_j(x)$  –  $j$ -ty znormalizowany wskaźnik jakości rozwiązania dopuszczalnego  $x$ .

Zatem rozwiązaniem optymalnym jest takie rozwiązanie  $x \in X$ , dla którego zgodnie z (40) funkcja  $Z$  przyjmuje wartość minimalną.

### Podsumowanie

W ramach niniejszego artykułu przedstawiono opis zdarzenia masowego, który posłużył do sformułowania zadania optymalizacji użycia sił i środków ratownictwa medycznego do realizacji przedsięwzięcia ratownictwa osób poszkodowanych w tym zdarzeniu. Podano procedurę kwalifikacji osób poszkodowanych do wyróżnionych grup priorytetu obsługi medycznej. Określono wielkości charakteryzujące SOR i BTRM, które są uwzględniane przy optymalizacji użycia sił i środków ratownictwa medycznego w zdarzeniu masowym. Podano sposób wyznaczania wartości składowych miary jakości działania ra-

townictwa medycznego w przypadku zdarzenia masowego. Sformułowano zadanie optymalizacji działań ratownictwa medycznego w zdarzeniu masowym, a następnie zaproponowano metodę jego rozwiązania.

Minimalizację negatywnych skutków zdarzenia masowego realizuje się poprzez dążenie do jak najszybszego rozpoczęcia leczenia i stabilizacji funkcji życiowych osób poszkodowanych na miejscu zdarzenia oraz późniejszego leczenia ratunkowego w SOR. Do najważniejszych kryteriów jakości prowadzenia działań ratownictwa medycznego w przypadku zdarzeń o charakterze masowym, ze względu na etyczne, z pewnością zaliczyć można:

- wartość oczekiwaną liczby zgonów,
- wartość oczekiwaną liczby osób dotkniętych kalectwem.

Charakter funkcji określających zmiany powyżej wymienionych wartości oczekiwanych wraz z upływem czasu w miarę zdobywanych doświadczeń i danych pozyskiwanych z kolejnych zdarzeń masowych powinien być stale uaktualniany.

Sformułowane zadanie optymalnego prowadzenia działań ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia o charakterze masowym stanowiło podstawę do opracowania autorskiego Systemu Teleinformatycznego Wspomagania Kierowania Ratownictwem Medycznym [Kołodziński i Tomczyk, 2012]. W ramach STWKRM opracowano oprogramowanie – symulator, dzięki któremu można weryfikować skuteczność (jakość działania) istniejących Wojewódzkich Systemów Ratownictwa w przypadku zajścia zdarzenia o charakterze masowym. Zasada działania tego symulatora opiera się m.in. na ustalaniu przez użytkownika parametrów zdarzenia masowego. Czas wyznaczenia rozwiązania problemu przez STWKRM jest nieznaczny.

Wiarygodność oceny funkcjonowania systemu ratownictwa zależy w głównej mierze od wierności odwzorowania otaczającej go rzeczywistości. Dlatego też w dalszych pracach będą prowadzone badania zmierzające m.in. do maksymalnego uszczegółowienia charakterystyk elementów Wojewódzkiego Systemu Ratownictwa.

## Literatura

- Ciećkiewicz J. (2008), *Ratownictwo medyczne w wypadkach masowych*, Górnicki Wydawnictwo Medyczne, Wrocław.
- Cotta C. (2011), *Effective patient prioritization in mass casualty incidents using heuristics and the pilot method*, „OR Spectrum”, Vol. 33(3).
- Gugała G. (2005), *Podstawy ratownictwa medycznego dla funkcjonariuszy Państwowej Straży Pożarnej i innych ratowników Krajowego Systemu Ratowniczo-Gaśniczego*, Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Fundacja Edukacja i Technika Ratownictwa, Warszawa.



- Guła P. (2007), *Postępowanie ratownicze w wypadkach masowych i katastrofach*, Wydawnictwo Medycyna Praktyczna, Kraków.
- Guttinger D., Godehardt E., Zinnen A. (2011), *Online strategies for optimizing medical supply in disaster scenarios*, 2011 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI).
- Jakubaszko J. (2007), *Ratownik medyczny*, Górnicki Wydawnictwo Medyczne, Wrocław.
- Kaliszewski I. (2008), *Wielokryterialne podejmowanie decyzji*, WNT, Warszawa.
- Kołodziński E., Ropiak R., Tomczyk Ł., Zapert P. (2011), *Model cybernetyczny ratownictwa medycznego w przypadku zdarzeń masowych* [w:] Z. Mierczyk, R. Ostrowski (red.), *Ochrona przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń*, t. 2, Warszawa.
- Kołodziński E., Tomczyk Ł. (2012), *Use case model of a data communications system for managing medical rescue operations in a mass casualty event* [w:] L. Kiełtyka, W. Jędrzejczyk, R. Kucęba, K. Smoląg (eds.), *Use of selected communication technologies in value management organization*, Częstochowa.
- Mills A.F., Argon N.T., Ziya S. (2013), *Resource-Based Patient Prioritization in Mass-Casualty Incidents*, „Manufacturing & Service Operations Management”, Vol. 15(3).
- Rauner M.S., Schaffhauser-Linzatti M.M., Niessner H. (2012), *Resources planning for ambulance services in mass casualty incidents: a DES-based policy model*, „Health Care Management Science”, Vol. 15(3).
- Trzos A. (2007), *System zarządzania działaniami ratowniczymi w zdarzeniach masowych*, „Na Ratunek”, nr 1.
- Wilson D.T., Hawe G.I., Coates G., Crouch R.S. (2012), *Effective Allocation of Casualties to Hospitals in Mass Casualty Incidents*, 2012 IEEE 3rd International Conference on Emergency Management and Management Sciences (ICEMMS).
- Zawadzki A. (2007), *Medycyna ratunkowa i katastrof – podręcznik dla studentów uczelni medycznych*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa.
- [www 1] <http://www.mp.pl/artykuly/11813> (dostęp: 17.04.2015).

#### THE OPTIMIZATION PROBLEM OF MEDICAL RESCUE ENFORCEMENTS ACTIVITIES DURING MASS CASUALTY INCIDENT

**Summary:** In this elaboration the optimization problem of medical rescue enforcements activities during mass casualty incident was considered. The characteristic of quality of Provincial Rescue System (PRS) functioning in case of mass casualty incident was presented. The relationship between partial values of adopted quality measure of medical rescue operations during mass casualty incident, its conditions and distribution of Hospital Emergency Department (HED) and medical means of transport was analyzed. The optimization problem of medical rescue enforcements activities in case of mass casualty incident was defined and its resolving method.

**Keywords:** rescue system, mass casualty incident, optimization.