

Edward Kołodziński, Robert Ropiak,
Łukasz Tomczyk, Piotr Zapert¹

Model cybernetyczny działań ratownictwa medycznego w przypadku zdarzeń masowych w aglomeracji

Abstract. *A cybernetic model of paramedic activities in response to a mass emergency in agglomeration.* The purpose of the rescue undertaking, after a mass event has taken place, is to minimize its post-accident effects. The discussion in this paper was limited to minimization of adverse accident consequences among the event victims. The factors which affect the medical rescue operation efficiency in case of mass events were analyzed. Moreover, the cybernetic model of the Agglomeration Medical Rescue System with respect to mass events was introduced.

1) dr hab. inż. Edward Kołodziński, prof. SGSP Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie,
dr n. med. Robert Ropiak, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie,
mgr Łukasz Tomczyk, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie,
mgr Piotr Zapert, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

Wprowadzenie

Pod pojęciem „*zdarzenia o charakterze masowym*” (w skrócie „*zdarzenia masowego*”) będziemy rozumieli zarówno:

- nagły wypadek, którego następstwem jest duża liczba osób poszkodowanych, którym to nie jesteśmy w stanie jednocześnie zapewnić pomocy medycznej w zakresie wymaganym przez ich stan zdrowia,
- zdarzenie epidemiologiczne o skali uniemożliwiającej jednocześnie zapewnienie pomocy medycznej dotkniętym epidemią w zakresie wymaganym przez stan zdrowia.

Celem przedsięwzięcia ratowniczego po zajściu zdarzenia masowego jest minimalizacja jego skutków powypadkowych. Nasze rozważania ograniczymy do minimalizacji niekorzystnych następstw powypadkowych wśród osób poszkodowanych w zdarzeniu, pod którymi będziemy rozumieli:

- zgony,
- trwałe kalectwa,
- oraz koszty związane z ratownictwem i leczeniem osób poszkodowanych, tj.:
- koszty przeprowadzenia akcji ratunkowej,
- koszty leczenia i rehabilitacji.

Wobec powyższego uważamy za zasadne przyjęcie poniższej czwórki za wielkość charakteryzującą jakość przedsięwzięcia ratowniczego w przypadku zajścia zdarzenia masowego:

$$W = \langle W_1, W_2, W_3, W_4 \rangle, \quad (1.1)$$

przy czym:

- W_1 – liczba zgonów spośród osób poszkodowanych w danym zdarzeniu,
- W_2 – liczba osób dotkniętych trwałym kalectwem,
- W_3 – koszty przeprowadzenia akcji ratunkowej,
- W_4 – koszty leczenia i rehabilitacji.

Zwraca się uwagę, że wszystkie wielkości składowe (1.1) a priori mają charakter losowy. Stąd za wskaźnik jakości przedsięwzięcia ratowniczego po zajściu zdarzenia masowego przyjmujemy ich wartości oczekiwane.

W przedsięwzięciach ratowniczych o charakterze masowym, oprócz sił i środków Państwowego Ratownictwa Medycznego, biorą udział również inne służby, a przede wszystkim Państwowa Straż Pożarna i Policja. Jakość działań ratownictwa w odniesieniu do osób poszkodowanych w danym zdarzeniu zależy zatem od bardzo wielu czynników, a przede wszystkim od:

- struktury służb uczestniczących w przedsięwzięciu ratowniczym,
- organizacji prowadzenia działań przez te służby oraz ich współdziałania,

- przygotowania zawodowego osób funkcyjnych przedsięwzięcia ratowniczego.

Z punktu widzenia opracowania metody wyznaczenia optymalnego sposobu prowadzenia działań ratownictwa w przypadku zdarzenia masowego istotnym zagadnieniem jest sformułowanie zadania optymalizacyjnego.

Sformułowanie zadania optymalizacyjnego poprzedzone zostanie analizą czynników wpływających na skuteczność działania ratownictwa medycznego.

2. Analiza czynników wpływających na skuteczność działania ratownictwa medycznego w przypadku zdarzeń masowych

2.1 Czynniki wpływające na liczbę zgonów oraz trwałego kalectwa spośród osób poszkodowanych w następstwie zdarzenia masowego

Pod pojęciem „trwałe kalectwo” rozumieć będziemy trwałe fizyczne uszkodzenie ciała lub upośledzenie umysłowe osoby poszkodowanej powodujące całkowitą lub częściową niezdolność do wykonywania określonych czynności codziennych.

Liczba zgonów oraz trwałego kalectwa spośród osób poszkodowanych w następstwie zdarzenia masowego zależy w głównej mierze od:

- liczby osób poszkodowanych,
- stanu powypadkowego osób poszkodowanych,
- kondycji fizycznej osób poszkodowanych,
- skuteczności leczenia poszczególnych urazów w SOR,
- czasu jaki upłynie od chwili zajścia zdarzenia do momentu rozpoczęcia medycznych czynności ratunkowych oraz leczenia w SOR.

2.2 Czynniki wpływające na koszt przeprowadzenia akcji ratunkowej podczas zdarzenia masowego

Koszt przeprowadzenia akcji ratunkowej w głównej mierze zależy od:

- liczby osób poszkodowanych w zdarzeniu,
- kondycji fizycznej osób poszkodowanych,
- stanu pourazowego osób poszkodowanych,
- dyslokacji baz transportowych ratownictwa medycznego (BTRM) i szpitalnych oddziałów ratunkowych (SOR) względem miejsca zdarzenia,
- kosztu transportu medycznego osób poszkodowanych - rodzaju użytych środków transportu, warunków dojazdowych do miejsca zdarzenia itp.,

- kosztu leczenia ratunkowego w SOR konkretnych przypadków porażonych.

2.3 Czynniki wpływające na koszt leczenia osób poszkodowanych w następstwie zdarzenia masowego

Koszt leczenia będzie zależał, przede wszystkim, od:

- liczby osób poszkodowanych,
- kondycji fizycznej osób poszkodowanych,
- stanu pourazowego osób poszkodowanych,
- skuteczności i kosztu leczenia konkretnych stanów pourazowych – liczby pozostawionych obrażeń określonego stopnia ciężkości przeznaczonych do dalszej obsługi medycznej.

3. Wielkości charakteryzujące czynniki wpływające na skuteczność działania Systemu Ratownictwa Medycznego w Aglomeracji w przypadku zdarzeń masowych

3.1 Charakterystyka zdarzenia masowego

Zdarzenie masowe opiszemy za pomocą trójki:

$$z \ll z_1, z_2, z_3 \gg, \quad (3.1)$$

gdzie:

z_1 – miejsce zdarzenia;

z_2 – czas, jaki upłynął od momentu zajścia zdarzenia do momentu podjęcia działań przez system ratownictwa medycznego;

z_3 – charakterystyka stanu zdrowia osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym:

$$z_3 = (z_{3,1}, \dots, z_{3,l}, \dots, z_{3,L}) \quad (3.2)$$

gdzie, L – liczba osób poszkodowanych w zdarzeniu,

przy czym, $z_{3,l}$ – stan (charakterystyka) l -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu.

3.2 Charakterystyka stanu osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym

Stan l -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu masowym, zgodnie z [9], będziemy charakteryzować za pomocą szóstki:

$$z_{3,l} = s_l = \langle s_{l,1}, s_{l,2}, s_{l,3}, s_{l,4}, s_{l,5}, s_{l,6} \rangle, l \in L, \quad (3.3)$$

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; _____

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

Zauważmy, że wielkości $s_{l,2}$ i $s_{l,3}$ w (3.3) są pochodnymi stopnia ciężkości stanu urazowego l -tej osoby poszkodowanej, określanego za pomocą wielkości $s_{l,1}$. Opis sposobu ich wyznaczenia podano poniżej.

Ad wyznaczania oceny stopnia ciężkości stanu urazowego (wartości $s_{l,1}$)

Oznaczmy przez:

$U = \{u : u = \overline{1, U}\}$ – zbiór numerów urazów powypadkowych, przy czym,

U – liczba wyróżnianych urazów powypadkowych;

$N = \{n : n = \overline{1, N}\}$ – zbiór numerów stopni ciężkości urazów, przy czym,

N – liczba wyróżnianych stopni ciężkości urazów powypadkowych;

$$U_n = \{u : d_n(u) = 1, u \in U\}, n \in N$$

– zbiór numerów rodzajów urazów powypadkowych o n -tym stopniu ciężkości,

gdzie,

$$d_n(u) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli uraz } u \in U \text{ jest } n\text{-tego stopnia ciężkości,} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym,} \end{cases} \quad (3.4)$$

przy czym, $\bigvee_{m,n \in \mathbf{N}} : m \neq n \Rightarrow \mathbf{U}_m \cap \mathbf{U}_n = \emptyset ; \bigvee_{n \in \mathbf{N}} : \mathbf{U}_n \neq \emptyset$.

W wyniku zdarzenia osoba poszkodowana może ulec kilku urazom. Zatem stan urazowy l -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu określać będzie zbiór:

$$\mathbf{U}_l^{pow} = \{u : d^l(u) = 1, u \in \mathbf{U}\},$$

przy czym,

$$d^l(u) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } l\text{-ta osoba poszkodowana na} \\ & \text{w zdarzeniu uległa danemu urazowi,} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym,} \end{cases} \quad (3.5)$$

Zbiór urazów o n -tym stopniu ciężkości, którym uległa l -ta osoba poszkodowana będzie równy:

$$\mathbf{U}_{l,n}^{pow} = \mathbf{U}_n \cap \mathbf{U}_l^{pow}, l \in \mathbf{L}, n \in \mathbf{N}. \quad (3.6)$$

Przyjęto, że im większa wartość n , tym wyższy stopień ciężkości stanu urazowego l -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu:

$$s_{l,1} = \max_{n \in \mathbf{N}} n : \mathbf{U}_{l,n}^{pow} \neq \emptyset. \quad (3.7)$$

Ad oceny stopnia świadomości l -tej osoby poszkodowanej (wartości $s_{l,2}$)

Stopień świadomości l -tej osoby poszkodowanej ($s_{l,2}$) określany jest według skali Glasgow Coma Scale (GCS), w sposób opisany w [5,9,13].

Ad oceny stopnia zaburzeń podstawowych czynności życiowych l -tej osoby poszkodowanej ($s_{l,3}$)

Stopień zaburzeń podstawowych czynności życiowych l -tej osoby poszkodowanej ($s_{l,3}$) wyznacza się zgodnie ze stosowaną podczas zdarzeń masowych oceną stanu zdrowia skalą ciężkości urazu TRTS (ang. *Triage Revised Trauma Score*) podaną w [1]. Jest to skala skrócona, która jest pochodną skali ciężkości urazu TS (ang. *Trauma Score*), której algorytm określania opisano w [9]. Ocenę zaburzeń podstawowych czynności życiowych l -tej osoby poszkodowanej charakteryzować będziemy za pomocą dwójki:

$$\underline{s}_{l,3} \ll s_{l,3,1}, s_{l,3,2} > , \quad (3.8)$$

gdzie:

$s_{l,3,1}$ – wielkość określająca liczbę oddechów na minutę l -tej osoby poszkodowanej:

$$s_{l,3,1} = \begin{cases} 4, & \text{jeżeli częstość oddechów wynosi } 10 - 24 \text{ na min,} \\ 3, & \text{jeżeli częstość oddechów wynosi } 25 - 35 \text{ na min,} \\ 2, & \text{jeżeli częstość oddechów jest większa niż } 35 \text{ na min,} \\ 1, & \text{jeżeli częstość oddechów jest mniejsza niż } 10 \text{ na min,} \\ 0, & \text{jeżeli nie oddycha;} \end{cases} \quad (3.9)$$

$s_{l,3,2}$ – wielkość określająca skurcze ciśnienia krwi l -tej osoby poszkodowanej:

$$s_{l,3,2} = \begin{cases} 4, & \text{jeżeli ciśnienie skurczowe krwi jest wyższe niż } 90 \text{ mm Hg,} \\ 3, & \text{jeżeli ciśnienie skurczowe krwi wynosi } 70 - 90 \text{ mm Hg,} \\ 2, & \text{jeżeli ciśnienie skurczowe krwi wynosi } 50 - 70 \text{ mm Hg,} \\ 1, & \text{jeżeli ciśnienie skurczowe krwi jest niższe niż } 50 \text{ mm Hg,} \\ 0, & \text{jeżeli ciśnienie skurczowe krwi nie występuje.} \end{cases} \quad (3.10)$$

Przy wyznaczaniu oceny stopnia zaburzeń podstawowych czynności życiowych ($s_{l,3}$) l -tej osoby poszkodowanej według TRTS, należy dodatkowo uwzględnić stan jej świadomości [1,9,13]. W tym celu wprowadza się wielkość e_l , określoną następującą zależnością:

$$e_l = \begin{cases} 4, & \text{jeżeli } 13 \leq s_{l,2} \leq 15, \\ 3, & \text{jeżeli } 9 \leq s_{l,2} \leq 12, \\ 2, & \text{jeżeli } 6 \leq s_{l,2} \leq 8, \\ 1, & \text{jeżeli } 4 \leq s_{l,2} \leq 5, \\ 0, & \text{jeżeli } s_{l,2} = 3; \end{cases} \quad (3.11)$$

Po wyznaczeniu wielkości (3.11) możemy wyznaczyć ocenę wypadkową stanu zaburzeń podstawowych czynności życiowych ($s_{l,3}$) l -tej osoby

poszkodowanej na podstawie zależności:

$$s_{l3} = e_l + s_{l,3,1} + s_{l,3,2}, \quad (3.12)$$

przy czym, im niższa jest wartość wypadkowej oceny s_{l3} , tym wyższy jest stopień zaburzeń podstawowych czynności życiowych l -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu.

3.3 Zasady kwalifikacji osób poszkodowanych do grup priorytetu obsługi medycznej

Zgodnie z procedurą systemu segregacji START [13], wyróżniamy cztery grupy priorytetu obsługi medycznej osób poszkodowanych na miejscu zdarzenia. Podczas akcji ratunkowej osoby te oznaczane są za pomocą kolorów lub numerów, zgodnie z [1,3,5,13]. Przyporządkowanie do konkretnej grupy odbywa się w oparciu o stan zdrowia poszkodowanych.

Oznaczmy zatem przez:

g – wielkość określającą priorytet obsługi medycznej osoby poszkodowanej – $g = 1, 4$,

przy czym:

$g = 1$ oznacza konieczność udzielenia natychmiastowej pomocy w momencie przybycia na miejsce zdarzenia służb ratownictwa medycznego;

$g = 2$ oznacza konieczność pilnej obsługi medycznej z możliwością ewentualnego jej odroczenia;

$g = 3$ oznacza możliwość odroczenia obsługi medycznej do kilku godzin;

$g = 4$ oznacza rezygnację z obsługi medycznej osoby poszkodowanej. Osoby poszkodowane w zdarzeniu, zakwalifikowane do tej grupy, uznane zostają za nierokujące przeżycia w czasie do 24 godzin od momentu zajścia zdarzenia.

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

$$\mathbf{L}_g = \{l : d_g^{grupa}(l) = 1, l \in \mathbf{L}\} \quad g = \overline{1,4}, \quad (3.13)$$

gdzie,

$$d_g^{grupa}(l) = \begin{cases} 1, \text{ jeżeli } l\text{-ta osoba poszkodowana została} \\ \text{zakwalifikowana do } g\text{-tej grupy,} \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (3.14)$$

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

Ad warunków zakwalifikowania l -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu do pierwszej grupy priorytetu obsługi medycznej ($g=1$)

Podczas akcji ratunkowej l -ta osoba poszkodowana zakwalifikowana będzie do pierwszej grupy ($g = 1$) priorytetu obsługi medycznej, gdy spełniony zostanie co najmniej jeden z poniższych warunków:

Ocena *stopnia ciężkości stanu urazowego* wskazuje na bezpośrednie zagrożenie życia ($s_{l,1} = 3$), ale rokuje przeżycie danej osoby – zgodnie z [1,3,9,12,13],

ocena *stopnia zaburzeń podstawowych czynności życiowych* ($s_{l,3}$) przyjmuje wartości z zakresu od 1 do 10 – zgodnie z [1],

stwierdzono fakt istnienia ciąży ($s_{l,5} = 1$), co zgodnie z przyjętym w [2] rozumowaniem stanowi o bezpośrednim zagrożeniu utraty zdrowia lub życia nie tylko kobiety będącej w ciąży, ale i płodu. Zatem osoby poszkodowane będą co najmniej dwie (w sytuacji, gdy stan kobiety ciężarnej nie rokuje przeżycia – akcją resuscytacyjną podejmuje się pod warunkiem, że ciąża nadaje się do cięcia cesarskiego).

Zatem funkcja (3.14) dla $g = 1$ przyjmie postać:

$$d_1^{grupa}(l) = \begin{cases} 1, \text{ jeżeli } (s_{l,1} = 3) \wedge (s_{l,3} \geq 11) \vee (s_{l,1} \leq 3) \wedge (1 \leq s_{l,3} \leq 10) \vee (s_{l,5} = 1), \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (3.15)$$

przy czym:

$$s_{l,5} = \begin{cases} 1, \text{ gdy } l\text{-ta osoba jest w ciąży,} \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (3.16)$$

Ad warunków zakwalifikowania l -tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu do drugiej grupy priorytetu obsługi medycznej ($g=2$)

l -tą osobę poszkodowaną w zdarzeniu kwalifikuje się do drugiej grupy ($g = 2$) priorytetu obsługi medycznej, gdy stan jej nie jest gorszy od opisanego poniżej:

- gdy zgodnie z oceną *stopnia ciężkości i stanu urazowego* wymaga ona

pilnej pomocy lekarskiej, lecz nie ma bezpośredniego zagrożenia życia ($s_{l,1} = 2$) – zgodnie z [1,3,9,12,13],

- ocena *stopnia zaburzeń parametrów życiowych* ($s_{l,3}$) przyjmuje wartość równą 11 – zgodnie z [1],

- ocena *stopnia stanu świadomości* ($s_{l,2}$) przyjmuje wartość nie mniejszą niż 9 – zgodnie z zależnością (3.11),

na podstawie warunków przydziału do pierwszej grupy priorytetu obsługi medycznej *wyklucza się ciężę* ($s_{l,5} = 0$).

Zatem funkcja (3.14) dla $g = 2$ przyjmie postać:

$$d_2^{grupa}(l) = \begin{cases} 1, \text{ jeżeli } ((s_{l,1} = 2) \wedge (s_{l,3} = 12) \vee (s_{l,1} \leq 2) \wedge (s_{l,3} = 11)) \wedge (s_{l,5} = 0), \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (3.17)$$

Ad warunków przydziału l-tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu do trzeciej grupy priorytetu obsługi medycznej ($g=3$)

Osoba poszkodowana o numerze l zakwalifikowana zostanie do trzeciej grupy ($g = 3$) priorytetu obsługi medycznej, gdy spełnione są wszystkie poniższe warunki:

- ocena *stopnia ciężkości stanu urazowego* nie wskazuje na bezpośrednie zagrożenie życia ($s_{l,1} = 1$), co pozwala na opóźnienie rozpoczęcia udzielania pomocy – zgodnie z [1,3,9,12,13],

- ocena *stopnia zaburzeń parametrów życiowych* ($s_{l,3}$) przyjmuje wartość równą 12 – zgodnie z [1],

- ocena *stopnia stanu świadomości* ($s_{l,2}$) przyjmuje wartość z zakresu od 13 do 15 – zgodnie z zależnością (3.11),

fakt istnienia cięży został wykluczony – warunek w (3.16) nie został spełniony ($s_{l,5} = 0$).

Zatem funkcja (3.14) dla $g = 3$ przyjmie postać:

$$d_3^{grupa}(l) = \begin{cases} 1, \text{ jeżeli } (s_{l,1} = 1) \wedge (s_{l,3} = 12) \wedge (13 \leq s_{l,2} \leq 15) \wedge (s_{l,5} = 0), \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (3.18)$$

Ad warunków przydziału l-tej osoby poszkodowanej w zdarzeniu do czwartej grupy priorytetu obsługi medycznej ($g=4$)

l-ta osoba poszkodowana w zdarzeniu powinna być przydzielona do czwartej grupy ($g = 4$) priorytetu obsługi medycznej, gdy spełniony zostanie co najmniej jeden z poniższych warunków:

stan urazowy wskazuje na zgon lub na małe prawdopodobieństwo przeżycia w ciągu bieżącej doby ($s_{l,1} = 4$) - zgodnie z [1,3,9,12,13],

stan świadomości ($s_{l,2}$) wskazuje na głęboką śpiączkę (ocena stanu świadomości przyjmuje możliwie najmniejszą wartość równą 3) – zgodnie

z zależnością (3.11),

ocena zaburzeń parametrów życiowych ($s_{l,3}$) przyjmuje wartość równą 0 – zgodnie z [1].

Zatem funkcja (3.14) dla $g = 4$ przyjmie postać:

$$d_4^{grupa}(l) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } (s_{l,1} = 4 \vee s_{l,3} = 0) \wedge s_{l,5} = 0, \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (3.19)$$

3.4 Charakterystyka Szpitalnego Oddziału Ratunkowego [10]

Oznaczmy przez:

$\mathbf{S} = \{s : s = \overline{1, S}\}$ - zbiór numerów Szpitalnych Oddziałów Ratownictwa (SOR) dyslokowanych na obszarze aglomeracji, przy czym,

S – liczba SOR dyslokowanych na obszarze aglomeracji;

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

$$h_s = \langle h_{s,1}, h_{s,2}, h_{s,3} \rangle, \quad s \in \mathbf{S}, \quad (3.20)$$

gdzie:

$h_{s,1}$ - współrzędne położenia s -tego SOR;

$h_{s,2}$ - 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,

$$h_{s,3} = \{u : d_s(u) = 1, u \in \mathbf{U}\}, \quad (3.21)$$

przy czym,

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

3.5 Charakterystyka Baz Środków Transportu Ratownictwa Medycznego [11]

Siły i środki transportu ratownictwa medycznego scharakteryzujemy następująco. Oznaczmy przez:

\mathbf{B} – zbiór numerów Baz Transportowych Ratownictwa Medycznego (BTRM) w RSR:

$$\mathbf{B} = \{b : b = \overline{1, B}\}, \quad (3.22)$$

przy czym, B – liczba wszystkich BTRM RSR.

Aktualne możliwości świadczenia usług ratownictwa medycznego (na daną chwilę t) przez Bazę Transportową Ratownictwa Medycznego o numerze $b \in \mathbf{B}$ scharakteryzujemy za pomocą pary:

$$a_b = \langle a_{b,1}, a_{b,2} \rangle, \quad (3.23)$$

gdzie:

$a_{b,1}$ – współrzędne położenia b -tej BTRM,

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

$$a_{b,2} = \langle a_{b,2,1}, \dots, a_{b,2,r}, \dots, a_{b,2,R} \rangle, \quad (3.24)$$

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.

4. Wskaźnik skuteczności działania ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia masowego

Za wskaźnik oceny jakości przedsięwzięcia ratowniczego w przypadku zdarzenia masowego przyjmiemy wartość oczekiwaną wielkości (1.1):

$$E(W) = \langle E(W_1), E(W_2), E(W_3), E(W_4) \rangle, \quad (4.1)$$

przy czym:

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

$E(W_2)$ – wartość oczekiwana liczby osób poszkodowanych dotkniętych trwałym kalectwem,

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

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

Przydział sił i środków osobom poszkodowanym w zdarzeniu masowym określony zostanie wektorem:

$$x = (x(1), \dots, x(l), \dots, x(L)), l \in \mathbf{L}, \quad (4.2)$$

zaś l -tej osobie poszkodowanej w zdarzeniu przydział sił i środków zostanie określony trójką:

$$x(l) = \langle x_1(l), x_2(l), x_3(l) \rangle, l \in \mathbf{L}, \quad (4.3)$$

przy czym,
 $x_1(l)$ – numer BTRM, z której zostanie wysłany pojazd do transportu l -tej osoby poszkodowanej, $x_1(l) \in \mathbf{B}$;
 $x_2(l)$ – numer SOR, do którego ma zostać przewieziona l -ta osoba poszkodowana, $x_2(l) \in \mathbf{S}$;
 $x_3(l)$ – numer rodzaju środka transportu zadysponowanego do l -tej osoby poszkodowanej, $x_3(l) = \bar{1}, R$.

4.1 Wskaźnik charakteryzujący liczbę zgonów spośród osób poszkodowanych w zdarzeniu

Zgon poszkodowanego w zdarzeniu ma charakter losowy. Zatem za wskaźnik opisujący liczbę zgonów spośród osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym przyjęto jej wartość przeciętną. Będzie ona zależała od rozkładu prawdopodobieństwa zgonu osób w zależności od grupy priorytetu obsługi medycznej, do której zostały zakwalifikowane.

Zatem oznaczymy przez:

$W_{1,g}$ - zmienną losową „zgon osoby poszkodowanej zakwalifikowanej do g -tej grupy priorytetu obsługi medycznej”:

$$W_{1,g} = \begin{cases} 1, & \text{gdy zakwalifikowana do } g\text{-tej grupy osoba umrze,} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (4.4)$$

Przeżycie osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym zależeć będzie również od tego czy SOR - y, do których zostaną przewiezione te osoby, będą w stanie skutecznie obsłużyć najcięższe doznane przez nie urazy.

Oznaczmy przez:

S_l^{uraz} - zbiór SOR - ów, które są w stanie skutecznie obsłużyć l -tego poszkodowanego ze względu na doznane przez niego najcięższe urazy ($n \geq 3$):

$$S_l^{uraz} = \left\{ S : U_{l,n}^{pow} \subset h_{s,3} \text{ dla } n \geq 3 \text{ i } s \in S \right\}, l \in \mathbf{L}. \quad (4.5)$$

$E(W_{1,g} / \tau)$ - warunkową wartość oczekiwaną zmiennej losowej $W_{1,g}$ przy ustalonej wartości τ , przy czym τ oznacza upływ czasu od momentu zajścia zdarzenia do momentu przybycia służb medycznych na miejsce jego zajścia.

Prawdopodobieństwo zgonu l -tej osoby poszkodowanej, w zależności od wartości τ , określa wzór:

$$f^{zgon}(l, \tau) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } S_l^{uraz} = \emptyset, \\ E(W_{1,g} / \tau), & \text{w przypadku przeciwnym,} \end{cases} \quad l \in \mathbf{L}_g, g \in \mathbf{G}, \quad (4.6)$$

przy czym,
 $f^{zgon}(l, \tau) = 1$, oznacza, że l -ta osoba nie przeżyje.

Oznaczmy przez:

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

$$t^{przejazdu}(y, z_1, r) = \frac{d_{z_1}(r, y)}{V_r}, \quad (4.7)$$

przy czym,

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

V_r - prędkość średnia r -tego rodzaju środków transportu RM.

Zatem wartość oczekiwana liczby zgonów z uwzględnieniem czasu dojazdu służb ratownictwa będzie wyglądać następująco:

$$EW_1(x) = \sum_{l \in L} f^{zgon}(l, t^{przejazdu}(a_{x_1(l),1}, z_1, x_3(l)) + z_2), \quad (4.8)$$

przy czym, x - zgodnie z (4.2); z_1, z_2 - zgodnie z (3.1).

Wskaźnik charakteryzujący liczbę osób dotkniętych trwałym kalectwem spośród poszkodowanych w zdarzeniu

Liczba osób, które mogą być dotknięte trwałym kalectwem w wyniku zdarzenia masowego zależy od wielu czynników. Ich analizy dokonano w punkcie 2. Duża liczba czynników i losowy ich charakter powodują, że zarówno liczba jak i możliwy rodzaj trwałego kalectwa jest zmienną losową.

Oznaczmy przez:

$W_{2,u}$ - zmienną losową „kalectwo osoby poszkodowanej z powodu doznania u -tego rodzaju urazu”, określoną zależnością:

$$W_{2,u} = \begin{cases} 1, & \text{gdy zakwalifikowana do } g\text{-tej grupy osoba} \\ & \text{zostanie dotknięta kalectwem,} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \quad (4.9)$$

U^{kal} - zbiór urazów mogących być przyczyną trwałego kalectwa osób poszkodowanych w zdarzeniu masowym:

$$U^{kal} = \{u : u \in U_n^{pow} \text{ dla } n \geq 2\}. \quad (4.10)$$

$U_l^{pow, kal}$ - zbiór urazów wypadkowych doznanych przez l -tą osobę poszkodowaną, które mogą być przyczyną trwałego kalectwa:

$$U_l^{pow,kal} = U_l^{pow} \cap U^{kal}. \quad (4.11)$$

$$f^{kal}(l, \tau, \vartheta, s) = \begin{cases} 1 & \text{dla } (f^{zgon}(l, \tau) < 1) \wedge (U_i^{pow,kal} \subset h_{2,3}), \\ \max_{u \in U_i^{pow,kal}} E(W_{2,u} / \tau + \vartheta) & \text{dla } (f^{zgon}(l, \tau) < 1) \wedge (U_i^{pow,kal} \subset h_{2,3}), \\ 0 & \text{dla } U_i^{pow,kal} = \emptyset. \end{cases} \quad (4.12)$$

przy czym, ϑ - chwila rozpoczęcia leczenia w SOR.

Jest to funkcja gęstości prawdopodobieństwa doznania trwałego kalectwa przez l -tą osobę poszkodowaną.

Wartość przeciętną liczby osób dotkniętych trwałym kalectwem w zależności od czasu, jaki upłynie od chwili zajścia zdarzenia do chwili dostarczenia osoby poszkodowanej do SOR, wyznacza się według wzoru:

$$EW_2(x) = \sum_{l \in L} f^{kal}(l, t^{przejazdu}(a_{x_1(l),1}, z_1, x_3(l)) + z_2, t^{przejazdu}(h_{x_2(l),1}, z_1, x_3(l)), x_2(l)) \quad (4.13)$$

przy czym, x - zgodnie z (4.2); z_1, z_2 - zgodnie z (3.1).

4.3 Wskaźnik charakteryzujący koszty przeprowadzenia akcji ratunkowej

Wartość przeciętna kosztów akcji ratunkowej przeprowadzonej podczas zdarzenia masowego w głównej mierze zależy od kosztów wykorzystania środków transportu oraz kosztów leczenia urazów doznanych przez poszkodowanych.

Należy uwzględnić fakt, iż:

- koszt wykorzystania środków transportu określonego rodzaju ma charakter losowy. Oznaczmy zatem przez:

$W_{3,r}^{BTRM}$ - zmienną losową „koszt użycia środków transportu r -tego rodzaju”;

Zależność wartości przeciętnej kosztów użycia środka transportu r -tego rodzaju od czasu λ stanowi regresję pierwszego rodzaju, czyli warunkową wartość oczekiwaną zmiennej losowej $W_{3,r}^{BTRM}$ względem wartości λ , co oznaczmy $E(W_{3,r}^{BTRM} / \lambda)$;

- koszt leczenia urazów doznanych przez osobę poszkodowaną w określonym SOR ma również charakter losowy.

Oznaczmy zatem przez:

$W_{3,u}^{SOR}$ - zmienną losową „koszt leczenia u -tego urazu w SOR”.

Oczekiwane koszty leczenia u -tego urazu w SOR w czasie nieprze-

kraczącym ustalonej wartości γ powinniśmy rozpatrywać jako regresję pierwszego rodzaju, czyli warunkową wartość oczekiwaną zmiennej losowej $W_{3,u}^{SOR}$ przy ustalonej wartości γ , tj. $E(W_{3,u}^{SOR} / \gamma)$, przy czym γ - czas, po którym osoba poszkodowana zostanie przewieziona do SOR.

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

$$EW_3(x) = \sum_{l \in \mathbf{L}} \left(E(W_{3,x_3(l)}^{BTRM} / \lambda) + \sum_{u \in \mathbf{U}_l^{pow} \cap h_{x_2(l),3}} E(W_{3,u}^{SOR} / \gamma) \right), \quad (4.14)$$

$$\lambda = t^{\text{przejazdu}}(a_{x_1(l),1}, z_1, x_3(l)) + t^{\text{przejazdu}}(h_{x_2(l),1}, z_1, x_3(l)),$$

$$\text{gdzie, } \gamma = z_2 + t^{\text{przejazdu}}(a_{x_1(l),1}, z_1, x_3(l)) + t^{\text{przejazdu}}(h_{x_2(l),1}, z_1, x_3(l)),$$

$$x - \text{zgodnie z (4.2),}$$

$$z_1, z_2 - \text{zgodnie z (3.1).}$$

4.4 Wskaźnik charakteryzujący koszty długotrwałego leczenia

Wartość oczekiwana kosztów długotrwałego leczenia osób poszkodowanych zależna będzie od wartości oczekiwanej kosztów związanych z długotrwałym leczeniem każdego z nieobsłużonych w SOR urazów doznanych przez te osoby.

Należy uwzględnić fakt, iż koszt długotrwałego leczenia określonych urazów ma charakter losowy. Oznaczmy przez:

$W_{4,n}$ - zmienną losową „koszt długotrwałego leczenia n -tego stopnia ciężkości urazu nieskutecznie obsłużonego w SOR”.

Oczekiwane koszty długotrwałego leczenia w czasie nieprzekraczającym ustalonej wartości t powinniśmy rozpatrywać jako regresję pierwszego rodzaju, czyli warunkową wartość oczekiwaną zmiennej losowej $W_{4,n}$ przy ustalonej wartości t , tj. $E(W_{4,n} / t)$, gdzie t - liczba nieskutecznie obsłużonych urazów danego stopnia ciężkości.

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

$$f^{\text{liczba_urazow}}(l, n, s) = \sum_{u \in \mathbf{U}_{l,n}^{pow} \cap \mathbf{U}^{kal} \setminus h_{s,3}} d_n(u), \quad l \in \mathbf{L}, n \in \mathbf{N}, s \in \mathbf{S}, \quad (4.15)$$

przy czym,

$d_n(u)$ - funkcja określająca czy u -ty uraz jest n -tego stopnia ciężkości, zgodnie z (3.4).

Zatem wartość oczekiwana kosztów długotrwałego leczenia przyjmie postać:

$$EW_4(x) = \sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{n=1}^{n=s_{l,1}} E(W_{4,n} / f^{\text{liczba_urazów}}(l, n, x_2(l))), \quad (4.16)$$

przy czym, x – zgodnie z (4.2), $s_{l,1}$ – zgodnie z (3.3).

Podsumowanie

Reasumując, wynikiem niniejszej pracy jest rozwiązanie problemu optymalizacji prowadzenia działań ratowniczych w zakresie zdarzeń masowych, która jest jednym z trzech zidentyfikowanych w [6,7] sposobów na doskonalenie skuteczności działania systemu ratownictwa.

Na podstawie analizy literatury, zwłaszcza z zakresu medycyny ratunkowej, zidentyfikowano czynniki wpływające na skuteczność działania systemu ratownictwa w przypadku zdarzeń o charakterze masowym. W oparciu o zdobyte informacje zaproponowano wskaźnik skuteczności z podkreśleniem, iż ma on charakter losowy. Do najważniejszych (ze względów etycznych) jego cząstkowych z pewnością zaliczyć można:

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

Postaci tych funkcji, w miarę zdobywanych doświadczeń i danych pozyskiwanych z kolejnych zdarzeń masowych, powinny być stale uaktualniane.

Sformułowane zadanie optymalnego przydziału sił i środków osobom poszkodowanym w zdarzeniu o charakterze masowym stanowi mocne podłoże do opracowania oprogramowania – symulatora, dzięki któremu będzie można weryfikować skuteczność (jakość działania) istniejących rejonowych systemów ratownictwa w przypadku wystąpienia zdarzenia o charakterze masowym. Zasada działania tego symulatora może opierać się na ustalaniu parametrów zdarzenia. Dzięki takiemu podejściu w prosty sposób można optymalnie dostosować prowadzenie działań systemu w określonych uwarunkowaniach.

Wiarygodność oceny funkcjonowania systemu ratownictwa zależy w głównej mierze od adekwatności modelu do rozpatrywanej rzeczywistości [8]. Zagadnienie adekwatności modelu do badanej rzeczywistości będzie jednym z kierunków dalszych prac.

Bibliografia:

1. Ciećkiewicz J., *Ratownictwo medyczne w wypadkach masowych*, Górnicki Wydawnictwo Medyczne, Wrocław 2008, s. 28,
2. Gugała G., (red.): *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 2005.
3. Guła P., *Postępowanie ratownicze w wypadkach masowych i katastrofach*, Wydawnictwo Medycyna Praktyczna, Kraków 2009.
4. Guła P. (red.): *Ustawa o państwowym ratownictwie medycznym: Komentarz*, Wydawnictwo ABC, Warszawa 2008.
5. Jakubaszko J., (red.): *Ratownik medyczny*. Górnicki Wydawnictwo Medyczne, Wrocław 2007.
6. Kołodziński E., *Doskonalenie skuteczności działania Wojewódzkiego Systemu Ratownictwa w przypadku zdarzeń masowych*, Czasopismo internetowe Zagadnienia Inżynierii Bezpieczeństwa, 2010,
7. <http://www.ptib.pl/component/remository/?func=startdown&id=273>.
8. Kołodziński E., *Doskonalenie skuteczności działania dziedzinowego systemu bezpieczeństwa podmiotu*, Czasopismo internetowe "Zagadnienia Inżynierii Bezpieczeństwa", 2010,
9. <http://www.ptib.pl/component/remository/?func=startdown&id=287>.
10. Kołodziński E., *Symulacyjne metody badania systemów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
11. Kołodziński E., Tomczyk Ł., *Komputerowe wspomaganie kierowania działaniami ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia masowego, cz. I, Komputerowe wspomaganie segregacji medycznej poszkodowanych w zdarzeniu masowym*, Czasopismo internetowe Zagadnienia Inżynierii Bezpieczeństwa, <http://ptib.pl/component/remository/?func=startdown&id=156>, 2009.
12. Kołodziński E., Tomczyk Ł., *Komputerowe wspomaganie kierowania działaniami ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia masowego, cz. II, Metoda określania udziału Szpitalnych Oddziałów Ratunkowych Rejonowego Systemu Ratownictwa w działaniach ratownictwa medycznego po zdarzeniu masowym*, Czasopismo internetowe Zagadnienia Inżynierii Bezpieczeństwa, <http://www.ptib.pl/component/remository/?func=fileinfo&id=191>, 2009.

13. Kołodziński E., Tomczyk Ł., *Komputerowe wspomaganie kierowania działaniami ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia masowego cz. III. Metoda przyporządkowania środków transportu ratownictwa medycznego Rejonowego Systemu Ratownictwa osobom poszkodowanym w zdarzeniu masowym*, Czasopismo internetowe *Zagadnienia Inżynierii Bezpieczeństwa*, <http://www.ptib.pl/component/remository/?func=fileinfo&id=192>, 2009.

14. Kołodziński E., Tomczyk Ł., Ropiak R., *Modelowanie podstawowych etapów działania ratownictwa medycznego w przypadku zdarzenia masowego*, Czasopismo internetowe *Zagadnienia Inżynierii Bezpieczeństwa*, <http://ptib.pl/component/remository/?func=startdown&id=228>, 2010.

15. Zawadzki A., (red.): *Medycyna ratunkowa i katastrof - podręcznik dla studentów uczelni medycznych*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2007

Uwaga: praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy własny nr 0N516313938.