

Matematyczna analiza ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem aglomeracji

Abstract. Mathematical risk analysis in safety management of agglomeration. This article presents the issue of risk analysis in safety management of agglomeration. It was presented the possibilities of the assessment of the risk of loss when coming to a decision concerning the agglomeration safety. There were presented two approaches to security threats, decision costs and the loss caused by threats: deterministic and under uncertainty conditions.

1) Dr hab. inż. Edward Kołodziński, prof. SGSP Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Mgr Tomasz Lachowicz, Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa WNT Uniwersytetu Warmińsko- Mazurskiego w Olsztynie.

Wprowadzenie

Analizując możliwości oceny skutków decyzji o podejmowanych działaniach zapewnienia aglomeracji bezpieczeństwa funkcjonowania w kategoriach strat i ryzyka, zasadne jest wyróżnienie następujących podejść [1, 4]:

- uwarunkowanie funkcjonowania aglomeracji oraz straty ponoszone przez nią wskutek wystąpienia określonych rodzajów zagrożeń są **zdeterminowane**;

- **niepewność** odnośnie uwarunkowań funkcjonowania aglomeracji oraz strat ponoszonych przez nią wskutek wystąpienia określonych rodzajów zagrożeń. Wielkości je charakteryzujące opisujemy za pomocą zmiennych losowych;

- **nieokreśloność** odnośnie uwarunkowań funkcjonowania aglomeracji oraz strat ponoszonych przez nią wskutek wystąpienia określonych rodzajów zagrożeń. Wielkości je charakteryzujące opisujemy za pomocą zmiennych lingwistycznych - wiedza nasza o uwarunkowaniach i stratach jest **rozmyta** [9,12].

Realizacja decyzji związanych z zapewnieniem aglomeracji pożądanego poziomu bezpieczeństwa wiąże się nierozzerwalnie z koniecznością ponoszenia określonych nakładów finansowych. W praktyce zuboża to nakłady na inne cele. Zatem, w zarządzaniu bezpieczeństwem koszty powinniśmy rozpatrywać jako utracone (niewykorzystane na inne cele) środki, które świadomie decydujemy się przeznaczyć na zwiększenie bezpieczeństwa funkcjonowania aglomeracji.

Jednocześnie zdajemy sobie sprawę, że niezależnie od ponoszonych kosztów, nie jesteśmy w stanie zapewnić aglomeracji bezwzględniego bezpieczeństwa. Musimy liczyć się z możliwością wystąpienia pewnych strat.

Z powyższych spostrzeżeń szczegółowych nasuwa się wniosek, że **zarządzając bezpieczeństwem aglomeracji, powinniśmy minimalizować zarówno wielkość możliwych strat, jak i kosztów zapobiegania ich powstawaniu oraz przygotowania na ewentualność wystąpienia danego rodzaju zagrożeń.**

Dodatkowo należy zauważyć, że w realnych sytuacjach straty mogą być wielorakie (śmierć bądź uszczerbek na zdrowiu ludzi wskutek wypadku, niekorzystne zmiany w środowisku, materialne itp.) i z tego powodu mogą wystąpić trudności sprowadzania ich do jednego miana, a także odnoszenia do kosztów.

Decyzje o działaniach związanych z zapewnieniem aglomeracji bezpieczeństwa, a w tym dziedziny [8], podejmowane są przy określonych założeniach (na podstawie prognozy) odnośnie skali zagrożeń i wynikających z nich uwarunkowań jej funkcjonowania. W rzeczywistości mogą wystąpić uwarunkowania inne od przyjętych. Implikuje to określo-

ne ryzyko decyzji [2] bądź też reguły decyzyjnej w zarządzaniu bezpieczeństwem.

Analiza ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem sprowadza się do oceny możliwości wystąpienia bardziej niekorzystnych następstw niż przyjęto przy wyznaczaniu decyzji (reguły decyzyjnej) o działaniach zapobiegających, przygotowawczych i sposobu reagowania na wypadek wyzwolenia danego rodzaju zagrożenia.

Analiza strat i ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem może być prowadzona w dwóch kategoriach:

- *jakościowych* – jest to domena analiz eksperckich. Ich metody analizy są dość powszechnie stosowane w różnych dziedzinach działalności człowieka [2, 11]. W coraz większym stopniu przenoszone są one na grunt zarządzania bezpieczeństwem. Pomimo licznych publikacji nie doczekały się one jeszcze ugruntowanego ujęcia literaturowego w zastosowaniu do zarządzania bezpieczeństwem.

- *ilościowych*, a przynajmniej wymiernych. Opiera się ona na prognozach uzyskiwanych za pomocą modeli matematycznych: dokładnych, probabilistycznych i lingwistycznych. Rodzaj zastosowanego modelu, a w istocie podejścia analityka do analizy ryzyka w zapewnieniu bezpieczeństwa, zależy od możliwości uzyskania niezbędnej informacji o rozpatrywanym zagrożeniu, podmiocie ochranianym i systemie bezpieczeństwa oraz umiejętności i zakresu wsparcia informatycznego tegoż analityka.

2. Modelowanie matematyczne ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem funkcjonowania aglomeracji

2.1. Czynniki uwzględniane w analizie ryzyka w zagadnieniach bezpieczeństwa

Rozpatrując zagadnienia zapewnienia dziedzinowego i globalnego bezpieczeństwa funkcjonowania aglomeracji, zasadne jest uwzględnianie:

- strat ponoszonych przez aglomerację wskutek wystąpienia określonych rodzajów zagrożeń bezpieczeństwa, przy ustalonych uwarunkowaniach jej funkcjonowania;

- kosztów realizacji decyzji (o podejmowaniu określonych działań), mających na celu zmniejszenie niekorzystnych dla aglomeracji następstw wywołanych zagrożeń. Dotyczą one działań:

- *zapobiegawczych* powstawaniu zagrożeń,

- *przygotowawczych* na wypadek wystąpienia zagrożeń,

- *reagowania* na powstałe zagrożenia,

- strat sumarycznych (łączych), ujmujących straty ponoszone przez aglomerację wskutek wystąpienia określonych rodzajów zagrożeń bez-

pieczeństwa oraz koszty realizacji przedsięwzięć związanych ze zmniejszeniem niekorzystnych dla aglomeracji następstw wywołanych danego rodzaju zagrożeń;

- ryzyka związanego z podejmowanymi (bądź niepodejmowanymi) decyzjami o działaniach związanych z zapewnieniem aglomeracji bezpieczeństwa jej funkcjonowania.

Dla potrzeb dalszych rozważań wprowadzimy oznaczenia [4]:

Z – zmienna określająca rodzaj zagrożenia bezpieczeństwa funkcjonowania aglomeracji,

\mathbf{Z} – zbiór możliwych wartości zmiennej Z : $\mathbf{Z} = \{ z: z = \overline{1, Z} \}$;

$W(z)$ – zmienna charakteryzująca uwarunkowania funkcjonowania aglomeracji, powstałe po wyzwoleniu danego rodzaju zagrożenia $z \in \mathbf{Z}$,

\mathbf{W} – zbiór możliwych wartości zmiennej W ;

A – zmienna określającą decyzję odnośnie rodzaju przedsięwzięć związanych z zapewnieniem pożądanego poziomu bezpieczeństwa dziedzinowego funkcjonowania aglomeracji,

\mathbf{A} – zbiór możliwych wartości zmiennej A ;

$K(a)$ – zmienna określająca wielkość kosztów realizacji decyzji $a \in \mathbf{A}$, $K(a) \in \mathbf{R}^+$;

$S^z(w, a)$ – zmienna określająca wielkość strat ponoszonych przez aglomerację po wyzwoleniu zagrożenia $z \in \mathbf{Z}$. Jej wartości zależą od powstałych uwarunkowań ($W = w$) funkcjonowania aglomeracji przy decyzji $A = a$. Zauważmy, że w szczególnych przypadkach $W(z, a)$ – jej wartości mogą zależeć również od przyjętej decyzji odnośnie sposobu zapewnienia pożądanego poziomu bezpieczeństwa dziedzinowego funkcjonowania aglomeracji.

Dla uproszczenia dalszych zapisów, tam gdzie nie będzie konieczności, przyjmujemy

$$S^z(w, a) \stackrel{ozn}{=} S(w, a),$$

\mathbf{S} - zbiór możliwych wartości zmiennej $S(w, a)$,

2.2. Modelowanie ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem aglomeracji w przypadku deterministycznym

Przyjmujemy, że:

$\mathbf{Z} = \{ z: z = \overline{1, J} \}$;

$\mathbf{W} = \{ w_j: j = \overline{1, J} \}$, przy czym, J - liczba wyróżnionych wartości wielkości charakteryzujących uwarunkowania bezpiecznego funkcjonowania aglomeracji;

$\mathbf{A} = \{ a_i: i = \overline{1, I} \}$, przy czym, I -liczba wyróżnionych decyzji;

$\mathbf{K} = \{ k_m: m = \overline{1, M} \}$, przy czym, M - liczba wyróżnionych wartości

nakładów na zapewnienie pożądanego poziomu bezpieczeństwa funkcjonowania aglomeracji;

$S = \{ s_n : n = \overline{1, N} \}$, przy czym, N - liczba wyróżnionych wartości strat poniesionych przez aglomerację wskutek wystąpienia danego rodzaju zagrożenia bezpieczeństwa jej funkcjonowania.

W przyjętym modelu ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem aglomeracji, straty poniesione przez aglomerację, wskutek wyzwolonych zagrożeń, zależą od:

- przyjętych decyzji $a_i \in A$ odnośnie rodzaju przedsięwzięć związanych z zapewnieniem pożądanego poziomu bezpieczeństwa dziedzinowego funkcjonowania aglomeracji,
- uwarunkowań bezpieczeństwa funkcjonowania aglomeracji $w_j \in W$, wynikających z wystąpienia danego rodzaju zagrożenia $z \in Z$.

Zwraca się uwagę, że wyzwolone (ustalonego rodzaju) zagrożenie może wywoływać różne uwarunkowania bezpieczeństwa funkcjonowania $w_j \in W$. Również straty powstałe przy ustalonych uwarunkowaniach mogą być różne. Powyższe ujmijemy, wprowadzając zmienną:

$S^i(w_j) = S(W = w_j / A = a_i)$ - straty zależą od uwarunkowań $W = w_j$, które z kolei zależą od decyzji $A = a_i$.

Decydent, podejmując decyzję $A = a_i$, powinien uwzględniać nie tylko ewentualne straty poniesione przez aglomerację wskutek wystąpienia danego rodzaju zagrożenia bezpieczeństwa jej funkcjonowania $S(w_j / a_i)$, lecz i koszty $K(a_i)$ tej decyzji. Dla decydenta koszty $K(a_i)$ stanowią wydatek, który będzie uzasadniony (bo zmniejszy straty) tylko wtedy, gdy wystąpi dany rodzaj zagrożenia i na dodatek w prognozowanej skali. Zatem w dalszych rozważaniach będziemy rozpatrywać **warunkowe straty łączne** określone za pomocą wzoru:

$$S_{\Sigma}^i(w_j) = K(a_i) + S^i(w_j),$$

dla $a_i \in A$ przy wystąpieniu $w_j \in W$.

W przypadku $W = w_j$ najmniejsze straty łączne będą przy decyzji $A = a_{i^*}$, dla której: (1)

$$S_{\Sigma}^{i^*}(w_j) = \min_{i=1, I} S_{\Sigma}^i(w_j) = \min_{i=1, I} (K(a_i) + S^i(w_j)) \quad (2)$$

Zauważmy jednak, że gdy decydent podejmie decyzję $A = a_{i^*}$, zakładając wystąpienie uwarunkowań $W = w_j$, to ryzyko tej decyzji wyniesie:

$$R^{i^*}(w_j) = \max_{j=1, J} S_{\Sigma}^{i^*} - S_{\Sigma}^{i^*}(w_j) =$$

$$\max_{j=1, J} \min_{i=1, I} (K(a_i) + S^i(w_j)) - \min_{i=1, I} (K(a_i) + S^i(w_j)) \quad (3)$$

Wynika to z faktu, że w istocie może wystąpić sytuacja, że $W \neq w_j$ - wystąpić inny warunek niż w_j .

Maksymalne ryzyko decyzji optymalnej decydenta, bez jakiegokolwiek wiedzy o możliwych zagrożeniach dla bezpieczeństwa funkcjonowania aglomeracji, zależy od jego postawy:

maksymalne ryzyko optymisty będzie równe:

$$R_{opt}^{\max}(a_{i^*}) = \max_{j=1, J} S_{\Sigma}^{i^*} - \min_{j=1, J} S_{\Sigma}^{i^*} =$$

$$\max_{j=1, J} \min_{i=1, I} (K(a_i) + S^i(w_j)) - \min_{j=1, J} \min_{i=1, I} (K(a_i) + S^i(w_j))$$

(4)

maksymalne ryzyko pesymisty będzie równe:

$$R_{pes}^{\max}(a_{i^*}) = \max_{j=1, J} S_{\Sigma}^{i^*} - \max_{j=1, J} S_{\Sigma}^{i^*} = 0. \quad (5)$$

Przykład 1.[8]

Niech podmiotem uszczegóławiającym nasze rozważania nad matematycznymi podstawami analizy ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem będzie aglomeracja miejska rozlokowana na pewnym obszarze, przez który przepływa rzeka. Ze względu na rzeźbę terenu, w którym jest ona dyslokowana, możliwe są zagrożenia powodziowe wskutek wezbrań rzeki przy długotrwałych opadach deszczu. *Przedmiotem naszego zainteresowania będzie zapewnienie bezpieczeństwa aglomeracji przed zagrożeniami powodziowymi.* Zagrożenia powodziowe przepływającej rzeki zależą od wielu czynników, a przede wszystkim od intensywności i długotrwałości opadów deszczu na obszarze tzw. *zlewni rzeki*, ukształtowania terenu, zdolności wchłaniania wody przez grunt, poziomu wód gruntowych itp. Wymienione czynniki są niestety niesterowalne. Nie mamy na nie wpły-

wu. Są to zatem uwarunkowania podejmowanych przez nas decyzji odnośnie działań mających na celu zapewnienie bezpieczeństwa powodziowego aglomeracji.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa aglomeracji przed wylewami powodziowymi przepływającej rzeki, można podjąć, między innymi, następujące działania:

- na etapie *zapobiegania*: budowa zbiorników retencyjnych w górnym biegu rzeki, zwiększanie wysokości obwałowań rzeki, przygotowanie obszarów zalewowych itp.;

- na etapie *przygotowania* na wypadek przekraczania przez rzekę stanu alarmowego- przygotowanie: sił o odpowiednich kwalifikacjach, materiałów do podwyższania poziomu obwałowania (worki, piasek, narzędzia, środki transportu elementów umocnień obwałowania itp.), środków transportu (łódzie, pontony, amfibie itp.), ludności i ich dobytku oraz pomieszczeń, wyżywienia, wody, ubrań itp. dla ludności na ewentualność wystąpienia powodzi. Etap ten mogą objąć również działania związane z przygotowaniem do ewentualnej ewakuacji ludności z domów o dużym prawdopodobieństwie zalania.

Zauważmy, że podjęcie każdej decyzji, dotyczącej zarówno zapobiegania wystąpieniu powodzi, jak i przygotowania aglomeracji na wypadek jej wystąpienia czy też sposobu prowadzenia akcji ratowniczej), odnośnie działań, których celem jest minimalizacja strat, implikuje określone koszty - wymaga określonych nakładów finansowych. Z kolei niepodejmowanie stosownych działań powoduje zwiększone straty.

Wyznaczanie ryzyka związanego z podejmowanymi decyzjami odnośnie zapewnienia bezpieczeństwa dziedzinowego, w deterministycznym ujęciu dyskretnym, przybliżymy na podstawie problemu zapewnienia bezpieczeństwa powodziowego aglomeracji miejskiej położonej w obszarze tzw. *zlewni rzeki*.

Przykład 2.

Niech:

$$\mathbf{W} = \{ w_1, w_2 \},$$

przy czym:

w_1 – mały opad,

w_2 – duży opad ($w_2 \gg w_1$);

$$\mathbf{A} = \{ a_1, a_2 \},$$

przy czym:

$A = a_1$ - decyzja o niepodejmowaniu żadnych dodatkowych przedsięwzięć związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa powodziowego aglomeracji,

$A = a_2$ - decyzja o powiększeniu zbiorników retencyjnych;
 $K(a_1) = k_1 = 0$, $K(a_2) = k_2 = 10$;
 $S = \{0, 1, 2, 20\}$,

$$S^i(w_j) = S(W = w_j / A = a_i) = \begin{cases} 2, & \text{gdy } W = w_1 / A = a_1 \\ 0, & \text{gdy } W = w_2 / A = a_1 \\ 0, & \text{gdy } W = w_1 / A = a_2 \\ 1, & \text{gdy } W = w_2 / A = a_2 \end{cases}$$

Przy przyjętych założeniach otrzymujemy:

$$S_{\Sigma}^i(w_j) = K(a_i) + S^i(w_j) = \begin{cases} 2, & \text{gdy } W = w_1 / A = a_1 \\ 0, & \text{gdy } W = w_2 / A = a_1 \\ 0, & \text{gdy } W = w_1 / A = a_2 \\ 1, & \text{gdy } W = w_2 / A = a_2 \end{cases}$$

W przypadku wystąpienia opadów na poziomie $W = w_1$ najmniejsze straty łączne będą przy decyzji $A = a_1$ i wyniosą:

$$S_{\Sigma}^{i*}(w_1) = \min_{i=1,2} S_{\Sigma}^i(w_1) = \min_{i=1,2} (K(a_i) + S^i(w_1)) = 2.$$

W przypadku wystąpienia opadów na poziomie $W = w_2$ najmniejsze straty łączne będą przy decyzji $A = a_2$ i wyniosą:

$$S_{\Sigma}^{i*}(w_2) = \min_{i=1,2} S_{\Sigma}^i(w_2) = \min_{i=1,2} (K(a_i) + S^i(w_2)) = 11.$$

Zauważmy jednak, że decydent podejmując decyzję $A = a_1$, musi liczyć się z możliwością wystąpienia warunków $W = w_2$, a wówczas straty sumaryczne wyniosą $S_{\Sigma}^1(w_2) = 20$. Podjęcie decyzji $A = a_1$ wiąże się zatem z ryzykiem wynoszącym:

$$R(a_1) = \max_{j=1,2} S_{\Sigma}^1(w_j) - \min_{j=1,2} S_{\Sigma}^1(w_j) = S_{\Sigma}^1(w_2) - S_{\Sigma}^1(w_1) = 20 - 2 = 18,$$

zaś podjęcie decyzji $A = a_2$ wiąże się z ryzykiem wynoszącym:

$$R(a_2) = \max_{j=1,2} S_{\Sigma}^2(w_j) - \min_{j=1,2} S_{\Sigma}^2(w_j) = S_{\Sigma}^2(w_2) - S_{\Sigma}^2(w_1) = 11 - 10 = 1.$$

Decyzja $A = a_1$ obciążona jest ryzykiem $R(a_1) = 18$, zaś decyzja $A = a_2$ obciążona jest ryzykiem $R(a_2) = 1$. W przypadku $A = a_1$ straty są większe o

osiem jednostek niż koszty ich wyeliminowania. W przypadku decyzji $A=a_2$ Decydent mógł zaoszczędzić na kosztach zapobiegania powodzi – wystąpiły przesadne wydatki w stosunku do ewentualnych strat z powodu powodzi.

Uogólniając wynik $R(a_2)$, można stwierdzić, że nie należy za wszelką cenę zapobiegać stratom z powodu możliwości wystąpienia zagrożenia bezpieczeństwa funkcjonowania podmiotu. Działania powinny być racjonalne.

2.3. Modelowanie ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem w przypadku niepewności zagrożeń i ich skutków

W zarządzaniu bezpieczeństwem zazwyczaj mamy pewną wiedzę historyczną o zagrożeniach dziedzinowych. Wynika ona, między innymi, z cykliczności pewnych zjawisk i powodowaniem przez nie określonych zagrożeń (np. powodzi) oraz z relacji przyczynowo-skutkowych między zjawiskami i występowaniem zagrożeń. Na podstawie danych historycznych możemy wyznaczyć charakterystyki probabilistyczne określonych rodzajów zagrożeń, ich wielkości i skutki.

Rozpatrzmy sytuację, gdy warunki $w \in W$ mają charakter losowy o znanym rozkładzie. Losowe występowanie warunków powoduje, że dla ustalonej decyzji „ $A=a$ ” (o sposobie zapobiegania, przygotowania czy też reagowania na wystąpienie zagrożeń), straty poniesione przez aglomerację są również wielkością losową. Wobec tego podstawą do uporządkowania decyzji $a \in A$ może być, na przykład wartość oczekiwana strat, jakie mogą powstać po wystąpieniu danego rodzaju zagrożenia.

Szacowanie zarówno strat warunkowych jak i ryzyka związanego z podejmowanymi decyzjami dokonywane jest *a priori*. O uwarunkowaniach i stratach występujących przy nich mamy wiedzę *niepewną*. Na podstawie obserwacji dotychczasowych zdarzeń możemy jedynie wnioskować o ich charakterystykach probabilistycznych.

Przyjmujemy, że [4, 8]:

$W(z)$ – jest zmienną losową dyskretną, charakteryzującą uwarunkowania funkcjonowania aglomeracji po wystąpieniu zagrożenia $z \in Z$. Przyjmuje ona wartości dyskretne ze zbioru $W = \{w_j : j = 1, J\}$. Jej charakterystykę probabilistyczną stanowi rozkład prawdopodobieństwa $p_j = P\{W = w_j\}$, $w_j \in W$;

$S^i(w_j)$ – jest zmienną losową dyskretną, określającą wielkość strat ponoszonych przez aglomerację wskutek wystąpienia zagrożeń bezpieczeństwa jej funkcjonowania, dla $A=a_i$ i $W=w_j$;

$S^i = [s_{nj}^i]_{N \times J}$ – macierz wyróżnionych strat $s_{n/j}^i = s_n^i(w_j)$ ponoszonych przez aglomerację wskutek wystąpienia zagrożeń bezpieczeństwa jej

funkcjonowania przy decyzji $A=a_i$;

$\underline{P}^i = [p_{nj}^i]$ - macierz prawdopodobieństw zdarzeń $\{S=s_n / W=w_j\}$ przy decyzji $A=a_i$ ($a_i \in \mathbf{A}$) - $p_{nj}^i = P^i\{S=s_n / W=w_j\}$.

Charakterystykę probabilistyczną możliwych strat podmiotu przy $A=a_i$ stanowi regresja pierwszego rodzaju względem $w_j \in \mathbf{W}$:

$$E(S^i(w_j)) = \sum_{n=1, \bar{N}} s_{n/j}^i p_{n/j}^i. \quad (6)$$

W przypadku $W=w_j$ najmniejsze straty łączne będą przy decyzji $A=a_{i^*}$, dla której:

$$E(S^{i^*}(w_j)) = \min_{i=1, \bar{I}} \sum_{n=1, \bar{N}} s_{n/j}^i, w_j \in \mathbf{W}. \quad (7)$$

Gdybyśmy dla każdego $w_j \in \mathbf{W}$ podejmowali optymalną decyzję $A=a_{i^*}$, to straty wypadkowe przyjętej reguły decyzyjnej byłyby równe:

$$E(S^{i^{**}}) = \sum_{j=1, \bar{J}} (\min_{i=1, \bar{I}} \sum_{n=1, \bar{N}} s_{n/j}^i p_{n/j}^i) P_j, \quad (8)$$

zaś ryzyko takiego postępowania wyniosłoby:

$$R^{i^{**}} = \max_{j=1, \bar{J}} E(S^{i^*}(w_j)) - E(S^{i^{**}}) = \max_{j=1, \bar{J}} (\min_{i=1, \bar{I}} \sum_{n=1, \bar{N}} s_{n/j}^i p_{n/j}^i) - \sum_{j=1, \bar{J}} (\min_{i=1, \bar{I}} \sum_{n=1, \bar{N}} s_{n/j}^i p_{n/j}^i) P_j. \quad (9)$$

Przykład 3.

Przyjmijmy dane z przykładu 2., tj.:

$\mathbf{W} = \{w_1, w_2\}$, przy czym: $p_1 = P\{W = w_1\} = 0.25$, $p_2 = P\{W = w_2\} = 0.75$;

$\mathbf{A} = \{a_1, a_2\}$;

$K(a_1) = k_1 = 0$, $K(a_2) = k_2 = 10$;

$\mathbf{S} = \{0, 1, 2, 20\}$,

oraz, że $\underline{S}^i = [s_{nj}^i]_{N \times J}$ $\underline{S}_{\Sigma}^i = [s_{nj}^i + k_i]_{N \times J}$ $\underline{P}^i = [p_{nj}^i]_{N \times J}$ przyjmują wartości:

dla $i = 1, j = \bar{1}, 2, n = \bar{1}, 4$:

$$\underline{S}^1 = \begin{bmatrix} 00 \\ 10 \\ 22 \\ 020 \end{bmatrix} \quad \underline{S}_{\Sigma}^1 = \begin{bmatrix} 00 \\ 10 \\ 22 \\ 020 \end{bmatrix} \quad \underline{P}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.25 & 0 \\ 0.75 & 0.1 \\ 0 & 0.9 \end{bmatrix};$$

dla $i = 2, j = \overline{1, 2}, n = \overline{1, 4}$:

$$\underline{S}^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{S}_{\Sigma}^2 = \begin{bmatrix} 100 \\ 110 \\ 0 & 12 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{P}^2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Przy decyzji :

A = a₁A = a₁ i:

$$W = w_1: E(S^1(w_1)) = \sum_{n=1}^4 s_n^1(w_1) \cdot p_{n/1}^1 = 1,75$$

$$W = w_2: E(S^1(w_2)) = \sum_{n=1}^4 s_n^1(w_2) \cdot p_{n/2}^1 = 18,2$$

Wartość oczekiwana strat, jakie może spowodować powódź wynosi:

$$E(S^1) = \sum_{j=1}^2 E(S^1(w_j)) \cdot p(w_j) = 14,0875$$

Wartość oczekiwana łącznych strat wyniesie:

$$E(S_{\Sigma}^1) = \sum_{j=1}^2 E(S_{\Sigma}^1(w_j)) \cdot p(w_j) = 14,0875$$

A = a₂A = a₂ i:

$$W = w_1: E(S^2(w_1)) = \sum_{n=1}^4 s_n^2(w_1) \cdot p_{n/1}^2 = 0,5$$

$$W = w_2: E(S^2(w_2)) = \sum_{n=1}^4 s_n^2(w_2) \cdot p_{n/2}^2 = 2$$

Wartość oczekiwana strat, jakie może spowodować powódź wynosi:

$$E(S^2) = \sum_{j=1}^2 E(S^2(w_j)) \cdot p(w_j) = 1,625$$

Wartość oczekiwana łącznych strat wyniesie:

$$E(S_{\Sigma}^2) = \sum_{j=1}^2 E(S_{\Sigma}^2(w_j)) \cdot p(w_j) = 11,625$$

Wartość oczekiwana łącznych strat, związanych z powodzią, dla decyzji:

$$A = a_1 \text{ wyniesie } E(S_\Sigma^1) = 14.0875$$

$$A = a_2 \text{ wyniesie } E(S_\Sigma^2) = 11.625$$

Przy przyjętych danych decyzja $A = a_2$ jest korzystniejsza od $A = a_1$, gdyż:

$$E(S_\Sigma^1) > E(S_\Sigma^2)$$

Czynniki uwzględniane w zagadnieniach decyzyjnych bezpieczeństwa funkcjonowania aglomeracji są zazwyczaj zmiennymi losowymi typu ciągłego. Przyjmujemy, że wielkość W ma rozkład normalny $N(m_w, \sigma_w)$.

W większości przypadków funkcją najlepiej przybliżającą straty aglomeracji wywołane przez wyzwolone zagrożenia jest funkcja logistyczna (rys 1.).

Wartość oczekiwaną strat w aglomeracji wskutek powodzi określa wzór:

$$E(S(w/A=a_i)) = \int_{w \in W} s(w - w^*) dF(w)$$

Gdzie:

$F(w)$ – dystrybuanta rozkładu zmiennej losowej W

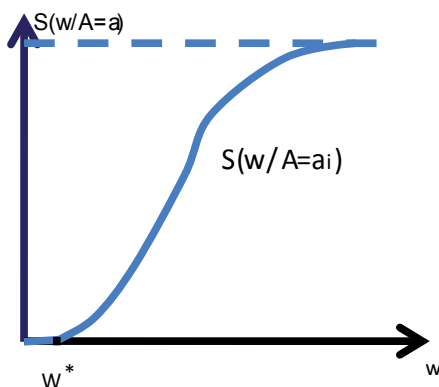
$s(w - w^*)$ - funkcja strat spowodowanych powodzią:

$$s(w - w^*) = \begin{cases} s(w), & \text{dla } w > w^* \\ 0, & \text{dla } w \leq w^* \end{cases}$$

w^* – wartość progowa zmiennej losowej W , od której powstają straty w aglomeracji.

Wartość oczekiwana łącznych strat wynosi odpowiednio:

$$E(S_\Sigma(a_i, w)) = K(a_i) + E(S(w/A=a_i)) = K(a_i) + \int_{w \in W} s(w - w^*) dF(w)$$



Rysunek 1. Wykres funkcji przybliżającej zależność strat w aglomeracji przez wzbierającą wodę w rzece od jej poziomu – przy decyzji $A=a_1$

Figure 1. Graph of the function approximating the dependence of losses in the agglomeration caused by the rising water in the river from its level at the decision $A=a_1$

Podsumowanie

Zarządzając dziedzinowym bezpieczeństwem aglomeracji, powinniśmy minimalizować sumę możliwych strat oraz kosztów zapobiegania ich powstawaniu i przygotowania na ewentualność wystąpienia danego rodzaju zagrożeń.

Decyzje o działaniach związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa dziedzinowego aglomeracji podejmowane są przy określonych założeniach odnośnie skali zagrożeń i wynikających z nich uwarunkowań jej funkcjonowania. W rzeczywistości mogą wystąpić uwarunkowania inne od przyjętych. Implikuje to określone ryzyko decyzji bądź reguły decyzyjnej naszego postępowania w zarządzaniu bezpieczeństwem.

Analiza ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem sprowadza się do oceny możliwości wystąpienia bardziej niekorzystnych następstw niż przyjęto przy wyznaczaniu decyzji (reguły decyzyjnej) o działaniach zapobiegających, przygotowawczych i sposobu reagowania na wypadek wyzwolenia danego rodzaju zagrożenia.

W artykule przedstawiono dwa podejścia do analizy ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem aglomeracji: deterministyczne oraz niepewności odnośnie: uwarunkowań i strat powstałych przy wystąpieniu określonego rodzaju zagrożeń i podjętych decyzji o sposobie zapobiegania, przygotowania i reagowania na wyzwolone zagrożenia.

Bibliografia:

1. Ficoń K., *Inżynieria zarządzania kryzysowego. Podejście systemowe*, BEL Studio, Warszawa 2007.
2. Kaczmarek T., *Ryzyko i zarządzanie ryzykiem, Ujęcie interdyscyplinarne*, Difin, Warszawa 2006
3. Kłodziński E., *Wprowadzenie do zarządzania bezpieczeństwem*, 2009, <http://www.ptib.pl/component/remository/?func=fileinfo&id=102>.
4. Kołodziński E., *Modelowanie matematyczne ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem funkcjonowania podmiotu*, Czasopismo internetowe *Zagadnienia Inżynierii Bezpieczeństwa*, 2010, <http://www.ptib.pl/component/remository/?func=fileinfo&id=229>.
5. Kołodziński E., *Symulacyjne metody badania systemów*, PWN, Warszawa 2002.
6. Kołodziński E., Kwiatkowski W., *Teoria decyzji statystycznych i statystyka matematyczna*, Warszawa 1980.
7. Kołodziński E., Piasecki F., *Problemy zapewnienia pożądanego poziomu bezpieczeństwa podmiotu*, V Międzynarodowa Konferencja naukowa *Zarządzanie Kryzysowe nt. Inżynieria bezpieczeństwa- standardy kształcenia*, Gdynia, 25-26maja 2007.
8. Kołodziński E., *Skuteczność i efektywność działania Dzielnicowego Systemu Bezpieczeństwa Podmiotu*, Czasopismo internetowe *Zagadnienia Inżynierii Bezpieczeństwa*, 2009, <http://www.ptib.pl/component/remository/?func=fileinfo&id=104>.
9. Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
10. Piasecki S., *Uwagi o problemach konstruowania miary poziomu bezpieczeństwa obiektu*, 2008.
11. Pritchard C., *Zarządzanie ryzykiem w projektach, teoria i praktyka*, WIG-PRESS, Warszawa 2002.
12. Rutkowski L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, PWN, Warszawa 2009.
13. Wikipedia, <http://pl.wikipedia.org/wiki/Ryzyko>.
14. Wikipedia, <http://pl.wikipedia.org/wiki/Aglomeracja>.

**Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012
jako projekt badawczy własny nr 0N516313938.**