

Marcin M. SMOLARKIEWICZ

ZASTOSOWANIE ZMIENNYCH LINGWISTYCZNYCH ORAZ LOGIKI ROZMYTEJ W ANALIZIE RYZYKA EKSPERCKIEGO

LINGUISTIC VARIABLES AND FUZZY LOGIC IN AN EXPERTS RISK ANALYSIS

Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Cywilnego

Main School of Fire Service, Warsaw
Faculty of Civil Safety Engineering

STRESZCZENIE: W artykule przedstawione zostały rozważania, w których zastosowano teorię logiki rozmytej, zaproponowanej przez L. Zadeha, do analizy ryzyka w obszarze zarządzania kryzysowego i bezpieczeństwem obywateli. Zdefiniowano zmienne lingwistyczne odnoszące się do pojęcia ryzyka i pokazano działanie metody wnioskowania rozmytego na przykładzie. Wykorzystanie proponowanej metody umożliwia uwzględnienie w obliczeniach zarówno ryzyka eksperckiego (w przypadku analizy prawdopodobieństw i skutków), jak również poziomu społecznego wzburzenia, odnoszącego się bezpośrednio do stanu akceptowalności określonego ryzyka

SŁOWA KLUCZOWE: zmienne lingwistyczne, logika rozmyta, analiza ryzyka, zarządzanie kryzysowe

SUMMARY: Fuzzy logic theory, proposed by L. Zadeh, used in the risk analysis in the field of crisis management and society safety is discussed. presented. Linguistic variables related to risk notion were defined. The analytical example of the use of fuzzy logic inference is presented. Described method of inference may be used to analyze both expert's risk (calculated as a multiplication of the loss probability and its quantity) and social aspect of risk, associated with the level of risk acceptance

KEY WORDS: linguistic variables, fuzzy logic, risk analysis, crisis management

Adres do korespondencji: Marcin M. Smolarkiewicz, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Cywilnego, Katedra Badań Bezpieczeństwa, Zakład Badań Sytuacji Kryzysowych, SGSP, 01-629 Warszawa, ul. Słowackiego 52/54, email: mmsmolarkiewicz@sgsp.edu.pl

Wstęp

Zgodnie z piramidą potrzeb Maslowa [4], bezpieczeństwo jest dla człowieka najważniejszą z potrzeb. Analiza ryzyka jest jedną z nielicznych metod inżynierskich pozwalających na określenie stanu bezpieczeństwa środowiska (otoczenia) życia człowieka [11]. W klasycznej analizie ryzyka operuje się ścisłymi liczbami, pomijając fakt, że są one zwykle mierzalne z określoną niepewnością. Logika rozmyta (fuzzy logic) może być stosowana wszędzie tam, gdzie wykorzystanie klasycznej logiki jest trudne lub niemożliwe. Zjawiska, które trudno jest scharakteryzować w sposób binarny, można opisywać za pomocą tzw. zmiennych lingwistycznych (linguistic variable). W analizie ryzyka odnoszącego się do bezpieczeństwa człowieka stosuje się podział na tzw. ryzyko eksperckie, będące iloczynem prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niekorzystnego i jego skutków oraz tzw. społeczne wzburzenie [7] stanowiące niepoliczalny jego aspekt, taki jak np. poziom społecznej akceptacji ryzyka. W przypadku obliczania ryzyka eksperckiego zarówno prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia, jak i jego skutki są wielkościami opisywanymi za pomocą pojedynczych liczb, w praktyce jednak reprezentują one przedziały z uwagi na możliwość wyznaczenia ich jedynie z określoną niepewnością. Poza tym, w obszarze analizy ryzyka (stosując np. hierarchizację), zwykle używa się pojęć, które określają nie jedną, a pewien przedział wartości np. pojęcia „ryzyko małe”, „ryzyko średnie”, „ryzyko duże”. Rozmycie to może być szczególnie widoczne i istotne w przypadku, gdy rozpatruje się społeczne wzburzenie. Biorąc powyższe pod uwagę nasuwa się hipoteza, iż analizę ryzyka powinno ująć się w ramach logiki zbiorów rozmytych, szczególnie stosując zmienne lingwistyczne do opisu matematycznych składowych ryzyka. Niniejszy artykuł jest jedną z pierwszych (jeśli nie pierwszą) próbą zastosowania logiki rozmytej w obszarze analizy ryzyka w aspekcie bezpieczeństwa obywateli. Stanowi on wstęp do głębszych rozważań, w którym przedstawiono w skrócie założenia teorii logiki rozmytej, jak również pokazano zastosowanie fragmentu tej teorii do określenia prognozy akceptowalności ryzyka w aspekcie strat ujętych w postaci zbiorów rozmytych.

Logika rozmyta i zmienne lingwistyczne

W życiu codzienny często korzysta się z pojęć, które odnoszą się do wielkości policzalnych, nie określając ich jednak w sposób ścisły. Typowymi przykładami takich określeń są pewne miary wzrostu, wieku, czy temperatury. Mówiąc „młody człowiek” można mieć na myśli kogoś w wieku 19 lat, jak również w wieku 24 lat. Mówiąc „wysoki człowiek” można mieć na myśli kogoś o wzroście 178 cm, jak również o wzroście 190 cm. Mówiąc „ciepło” można mieć na myśli temperaturę 22°C, jak również temperaturę 27°C. W celu poprawnego wnioskowania oparte go na wielkościach wyrażonych w taki „rozmyty” sposób konieczne jest wprowadzenie innej niż klasyczna logiki. Autorem koncepcji logiki umożliwiającej wnioskowanie oparte na rozmytych określeniach wartości zmiennej – logiki rozmytej – jest Lofti Zadeh, który wprowadził m.in. pojęcia zbiorów rozmytych (fuzzy set) [12] oraz zmiennych lingwistycznych [13].

Zbiorem rozmytym A w przestrzeni rozważań X nazywa się zbiór par postaci:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\} \quad (1)$$

gdzie $\mu_A(x)$ jest nazywana funkcją przynależności (membership function) i definiowana jako:

$$\mu_A: X \longrightarrow [0;1] \quad (2)$$

Funkcja przynależności dla każdego $x \in X$ przyporządkowuje stopień przynależności $\mu_A(x)$ do zbioru rozmytego A zawierający się w przedziale domkniętym $[0;1]$. W przypadku, gdy $\mu_A(x) = 0$, mówi się o braku przynależności x do zbioru A , w przypadku, gdy $\mu_A(x) = 1$, mówi się o pełnej przynależności x do zbioru A , w przypadku, gdy $\mu_A(x) \in (0;1)$, mówi się o częściowej przynależności x do zbioru A .

Aby posługiwać się informacją wyrażoną w sposób niejednoznaczny konieczne jest wprowadzenie pojęcia zmiennej lingwistycznej. Zmienna lingwistyczna przyjmuje jako swe wartości wyrażenia języka naturalnego (wartości rozmyte) oraz języka sztucznego (dyskretne wartości fizyczne) [13]. Zmienną lingwistyczną nazywa się piątkę postaci:

$$X, T(X), U, G, M \quad (3)$$

gdzie:

X jest nazwą zmiennej lingwistycznej (np. wzrost),

$T(X)$ – przestrzenią lingwistyczną zmiennej, czyli zbiorem wartości (określeń) lingwistycznych opisujących zmienną X (np. „bardzo niski”, „niski”, „średniego wzrostu”, „wysoki”, „bardzo wysoki”),

U – przestrzenią rozważań (np. [80;250] cm),

G – gramatyką generującą wartości lingwistyczne $T(X)$ w przestrzeni $T(X)$,

M – znaczeniem, gdzie $M(X)$ jest podzbiorem rozmytym w przestrzeni rozważań U .

Wartość $M(X)$ jest charakteryzowana za pomocą funkcji przynależności, która dla każdej wartości $u \in U$ przyporządkowuje jej przynależność do każdego terminu lingwistycznego ze zbioru $T(X)$ i zawiera się w przedziale $[0;1]$ (np. $u = 185$ może oznaczać „wysoki” z funkcją przynależności 0,85 lub „bardzo wysoki” z funkcją przynależności 0,15). Zwyczajowo, prezentując wartości $M(X)$ stosuje się zapis $T(X)/\mu_A(x)$ (tu „wysoki”/0,85, „bardzo wysoki”/0,15). Dana wartość u może należeć zarówno do jednego, jak i do wielu terminów lingwistycznych. Jeżeli suma funkcji przynależności dla wszystkich wartości u jest równa 1, mówi się, że funkcje przynależności spełniają warunek podziału jedności. W większości przypadków, w których wykorzystuje się logikę rozmytą, dobrze jest korzystać z funkcji spełniających warunek podziału jedności, z uwagi na możliwość uzyskania lepszego modelu. Warunek ten można łatwo spełnić w przypadku funkcji przynależności zbudowanych z odcinków prostych (trójkąty, trapezy), zaś trudno w przypadku funkcji ciągłych (rozkład normalny). Z tego względu, jeżeli sytuacja nie pozawala na wykorzystanie prostych funkcji, może stać się konieczna rezygnacja ze spełnienia warunku podziału jedności.

Przeprowadzenie wnioskowania opartego na logice rozmytej wymaga wprowadzenia algorytmu (modelu) wnioskującego opartego na zbiorze reguł oraz mo-

dułu wnioskowania posiadającego jednocześnie na wejściu moduł tzw. rozmywania (fuzzification) i na wyjściu moduł tzw. wyostrzania (defuzzification). Rozmywanie polega na przyporządkowywaniu „ostrej” wartości wejścia do odpowiedniego podzbioru terminów zmiennej lingwistycznej, z określeniem wartości funkcji przynależności. Wyostrzanie zaś pozwala na obliczenie ostrej wartości wyjścia opartej na wynikowej funkcji przynależności. Wartość ta jest wyliczana za pomocą zdefiniowanych metod obliczeń [10]. Zbiór reguł stanowi zbiór zbudowany ze zdań logicznych z wykorzystaniem operatorów JEŻELI, I/LUB, TO, które opisują zależności pomiędzy wartościami „na wejściu” modelu wnioskującego, a wartościami „na wyjściu” tego modelu. Zwykle stosuje się proste reguły logiczne postaci:

$$\text{Jeżeli } (x \text{ jest } A) \text{ I/LUB } (y \text{ jest } B) \text{ TO } (z \text{ jest } C) \quad (4)$$

gdzie A i B są zbiorami rozmytymi

Wnioskowanie z wykorzystaniem zbioru reguł, pozwalające na wyliczenie wynikowej funkcji przynależności, jest procesem trój etapowym. Na wstępie dokonuje się tzw. agregacji, czyli określa stopień spełnienia poprzedników poszczególnych reguł. Następnie wykonuje się tzw. aktywację, czyli określa się stopień przynależności następnika poszczególnych reguł. Trzecim etapem jest tzw. akumulacja, czyli określenie wynikowej funkcji przynależności na podstawie stopnia aktywacji następników.

Tab. 1. Wybrane t-normy i s-normy
Tab. 1. Selected t-norms and s-norms

t-normy	
Iloczyn algebraiczny (PROD)	$\mu_{A \cap B} = \mu_A \cdot \mu_B$
Iloczyn Hamachera	$\mu_{A \cap B} = \frac{\mu_A \cdot \mu_B}{\mu_A + \mu_B - \mu_A \cdot \mu_B}$
Iloczyn Einsteina	$\mu_{A \cap B} = \frac{\mu_A \cdot \mu_B}{2 - \mu_A - \mu_B + \mu_A \cdot \mu_B}$
s-normy	
Suma algebraiczna	$\mu_{A \cup B} = \mu_A + \mu_B - \mu_A \cdot \mu_B$
Suma Hamachera	$\mu_{A \cup B} = \frac{\mu_A + \mu_B - 2 \cdot \mu_A \cdot \mu_B}{1 - \mu_A \cdot \mu_B}$
Suma Einsteina	$\mu_{A \cup B} = \frac{\mu_A + \mu_B}{1 - \mu_A \cdot \mu_B}$

Źródło: za [5], [6].

Dokonując agregacji wykorzystuje się operatory – odpowiednio zwane t-normami (w przypadku wyznaczania wartości funkcji przynależności dla operatora logicznego I), oraz zwane s-normami (w przypadku wyznaczania wartości funkcji przynależności dla operatora logicznego LUB) – do wyliczenia funkcji przynależności dla wszystkich reguł wnioskowania. Na potrzeby przedstawionych w niniejszym artykule rozważań wykorzystano wybrane t-normy i s-normy zdefiniowane w [5] i [6], których formuły zawarto w tab.1.

Operacja aktywacji ma na celu określenie stopnia spełnienia następnika poszczególnych reguł. Zgodnie z podejściem zaproponowanym przez Zadeha [14] (uogólnioną regułą modus ponens), można założyć że stopień spełnienia poprzednika, określony wartością funkcji przynależności, w jakimś stopniu wpływa na stopień spełnienia następnika. Do określenia wielkości takiej zależności korzysta się z operatorów implikacji rozmytej [5]. Najprostszymi operatorami implikacji rozmytej są: operator Mamdamiego [3] postaci:

$$\mu_{A \rightarrow B} = \min\{\mu_A, \mu_B\} \quad (5)$$

oraz operator iloczynu algebraicznego (tab. 1).

W procesie akumulacji dokonuje się kumulacji w pojedynczy zbiór wyników wnioskowania wszystkich reguł. Akumulacja polega na zastosowaniu odpowiedniego operatora s-normy do zbiorów rozmytych uzyskanych w poszczególnych regułach wnioskowania. Jednym z najprostszych obliczeniowo i często wykorzystywanych przy akumulacji jest operator MAX postaci:

$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A, \mu_B\} \quad (6)$$

Jak wspomniano wcześniej, ostatnim etapem działania algorytmu (modelu) opartego na logice rozmytej jest wyostrzanie. Istnieje wiele metod wyostrzania wynikowego zbioru rozmytego na określoną wartość rzeczywistą, stanowiącą wyjście modelu. Do najbardziej rozpowszechnionych można zaliczyć metody: środka maksimum (MOM), pierwszego maksimum (FOM), ostatniego maksimum (LOM), środka ciężkości (COA, COG) i środka sum (BOA) [10].

Ocena ryzyka w obszarze bezpieczeństwa obywateli w ujęciu logiki rozmytej

Zarządzanie ryzykiem, a szczególnie analiza ryzyka, jest szeroko stosowanym narzędziem wspomagania procesu decyzyjnego w sytuacjach, w których musimy liczyć się z niepowodzeniem. Niezależnie od tego, czy przebywamy w domu, czy w miejscu pracy, zawsze podlegamy oddziaływaniu szerokiej gamy zagrożeń. Ich realizacja (wystąpienie zdarzenia przynoszącego nam określoną stratę – materialną, zdrowia, czy nawet życia) często określana jest mianem zdarzenia niekorzystnego. Analiza ryzyka występowania zdarzeń niekorzystnych może mieć charakter jakościowy i ilościowy. W tym drugim przypadku jest ona zwykle specyficzną analizą statystyczną, uwzględniającą częstość (prawdopodobieństwo) występowania zdarzeń niekorzystnych, oraz potencjalne skutki tych zdarzeń. Zdarzenia niekorzyst-

ne, w zależności od specyfiki zagrożenia, mogą występować z różną częstością i przynosić różne skutki (straty). Częstość występowania jest rozumiana jako liczba wystąpień określonego zdarzenia w wyznaczonym przedziale czasu. (W analizie ryzyka zwykle wyraża się częstość w odniesieniu do okresu roku np. 10^{-2} oznacza zdarzenie występujące średnio raz na 100 lat.)

Jedną z podstawowych wad metod analizy ryzyka jest ich niepewność wynikająca z probabilistycznej definicji ryzyka, ale również z uwagi na fakt, że wnioskowanie w przestrzeni ryzyka może być wykonywane jedynie z wykorzystaniem czasu przeszłego (historię zdarzeń). W zależności od liczby dostępnych danych (informacji) ryzyko można wyznaczyć z większą lub mniejszą dokładnością. W pracy [9] zaproponowano metodę szacowania niepewności (błędu) ryzyka opartego na estymacji częstości występowania zdarzeń niekorzystnych i przybliżenie za jej pomocą wielkości prawdopodobieństwa tych zdarzeń. Jak pokazano w tej pracy, w przypadku zdarzeń występujących bardzo rzadko, dla których nie dysponuje się wystarczającą statystyką zdarzeń historycznych, wyznaczając częstość zdarzenia można popełnić błąd względny nawet rzędu 50%. Tak duża niepewność wynika również z faktu, że znaczna większość ilościowych metod analizy ryzyka charakteryzuje się ostrą granicą zmiany kategorii ryzyka (np. metoda macierzy czynnika ryzyka [11], czy metoda Risk Score [2]). W metodach tego typu, po wyznaczeniu ilościowej wartości ryzyka, jest ono klasyfikowane do jednej z góry założonych kategorii. Poniżej pewnej punktowej granicy ryzyko jest akceptowane, powyżej jest nieakceptowane. Nasuwa się pytanie, jaką rolę w takim podejściu odgrywa dokładność (błąd, niepewność) wyznaczenia składowych ryzyka – prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niekorzystnego oraz potencjalnych skutków? Pytanie takie zadał sobie m.in. L. A. Cox, który w pracy [1] opisał problemy, jakie mogą się pojawić podczas wykorzystania metody macierzy czynnika ryzyka.

Uogólniając, w przypadku skutków zdarzeń, jeżeli weźmie się pod uwagę tylko skutki materialne, to dysponując odpowiednimi bazami danych oraz narzędziami do ich zarządzania [8], można je wyznaczyć z dużą dokładnością. W przypadku skutków mierzonych liczbą ofiar w ludziach, określenie potencjalnej liczby osób bezpośrednio dotkniętych zdarzeniem jest dużo trudniejsze. W przypadku prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niekorzystnego, błąd względny jego wyznaczenia jest ściśle uzależniony od wielkości populacji zdarzeń, dla której określana jest częstość względną wystąpienia interesującego zdarzenia niekorzystnego.

Kolejny problem to subiektywny odbiór ryzyka. Poziom ryzyka akceptowany dla jednych, nie jest akceptowany przez drugich. Wynika to zarówno z ludzkich preferencji do ponoszenia lub nie ponoszenia ryzyka, jak również względności takich pojęć jak „duże straty” i „małe straty”. Ze względu na silne „rozmycie” granicy między obszarami akceptowanego i nieakceptowanego ryzyka, poniżej przedstawiono zarys metody pozwalającej uwzględnić preferencje społeczne w ocenie położenia tej granicy w przestrzeni strat ludzkich i materialnych, bazującej na metodyce zaczerpniętej z teorii logiki rozmytej.

Przyjmijmy, że w ocenie ryzyka eksperckiego prawdopodobieństwo zdarzenia niekorzystnego jest równe jedności, tzn. założmy, że zdarzenie o niezerowym prawdopodobieństwie właśnie zaszło. Jakie straty materialne i jaką liczbę ofiar można uznać za akceptowane? (Należy zwrócić uwagę, że w przypadku jednostkowego

prawdopodobieństwa, ryzyko eksperckie, będące iloczynem start i prawdopodobieństwa, jest wyrażane przez straty. Zatem straty w takim wypadku można utożsamiać z ryzykiem). Ze względów etycznych żadne ofiary w ludziach nie są akceptowalne. Stosując podejście w ujęciu kategoryzacji zdarzeń do zdarzeń typowych (których skutki mogą być minimalizowane przez działający na danym terenie system bezpieczeństwa) oraz zdarzeń o charakterze kryzysowym (takich, z którymi istniejący na danym terenie system bezpieczeństwa nie jest sobie w stanie poradzić) ważne jest określenie granicy między jednym i drugim zbiorem. Jeżeli w wypadku drogowym ginie człowiek, zaś dwie osoby zostają ranne, funkcjonujące na poziomie powiatu systemy Pogotowia Ratunkowego, Państwowej Straży Pożarnej i Policji są w stanie szybko zadziałać, co skutkuje w krótkim czasie przywróceniem stanu normalnego. Jeżeli dochodzi do katastrofy drogowej, w której ginie wiele osób, a jeszcze więcej jest rannych, systemy bezpieczeństwa poziomu powiatowego nie są w stanie same poradzić sobie z takim problemem.

Założmy, że rozważamy zagadnienie poważnego wypadku w ruchu drogowym. Jeżeli zapytać obywateli jakie straty materialne i jaką liczbę ofiar w tego typu zdarzeniach można uznać za akceptowalne, uzyskało by się wiele różnych odpowiedzi (w pewnych przypadkach można grupę respondentów zawęzić do specjalistów z obszaru zarządzania kryzysowego). Przyjmijmy, że wypowiedzi te, po ich kategoryzacji, można przedstawić w postaci histogramu i przybliżyć rozkładem normalnym o równaniu:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

gdzie μ jest wartością oczekiwaną tego rozkładu, zaś σ jego odchyleniem standardowym.

Założmy, że przy opisie ściśle określonego zdarzenia, gdzie zawężono straty materialne i liczbę ofiar do pewnych przedziałów, uzyskano histogramy wielkości strat uważanych za nieakceptowane, przybliżone rozkładami normalnymi:

- strat materialnych (X), o wartości oczekiwanej $\mu_x = 150000$ PLN i odchyleniu standardowym $\sigma_x = 30000$ PLN,
- liczba ofiar (Y), o wartości oczekiwanej $\mu_y = 2$ i odchyleniu standardowym $\sigma_y = 0,5$.

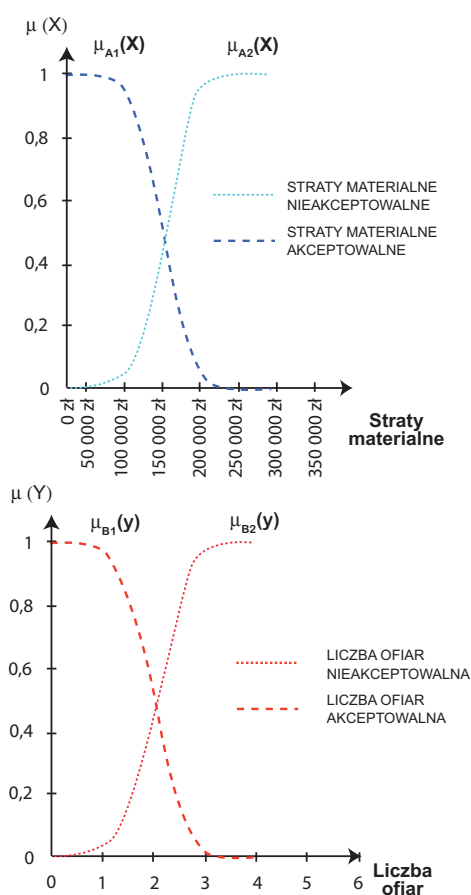
Zawężenie obszarów strat nie jest niczym nietypowym. Jeżeli np. przyjmijmy, że rozważamy wypadek drogowy samochodu osobowego, 5-miejscowego, bez udziału innych użytkowników drogi ani pieszych, to liczba ofiar nie powinna przekroczyć 5 (choć wiadomo, że zdarza się, że w takim samochodzie jedzie więcej osób), zaś straty materialne nie powinny przekroczyć wartości auta (powiększonych ewentualnie o koszt uszkodzenia/zniszczenia obiektu z jakim dane auto się zdarzyło – drzewo, budynek itp.).

Dystrybuanty rozkładów strat $F(x)$ i $F(y)$ interpretują prawdopodobieństwa, że straty w danym zdarzeniu „nie większe niż” zostaną przez grupę obywateli uznane za próg ich nieakceptowalności. Zauważymy dodatkowo, że funkcje postaci:

$$P(x)=1-F(x) \text{ i } R(y)=1-F(y) \quad (8)$$

interpretują prawdopodobieństwa, że straty w danym zdarzeniu „nie większe niż” zostaną przez grupę obywateli uznane za próg ich akceptowalności.

Zmienna X jest zmienną lingwistyczną wejściową mogącą należeć do dwóch zbiorów rozmytych: „straty materialne akceptowane” (A1) i „straty materialne nieakceptowane” (A2) z odpowiadającymi tym zbiorom funkcjami przynależności $\mu_{A1}(x) = P(x)$ i $\mu_{A2}(x) = F(x)$, spełniającymi warunek podziału jedności. Zmienna Y jest zmienną lingwistyczną wejściową mogącą należeć do dwóch zbiorów rozmytych: „liczba ofiar akceptowana” (B1) i „liczba ofiar nieakceptowana” (B2) z odpowiadającymi tym zbiorom funkcjami przynależności $\mu_{B1}(y) = R(y)$ i $\mu_{B2}(y) = F(y)$, również spełniającymi warunek podziału jedności. Na ryc. 1 przedstawiono wy-



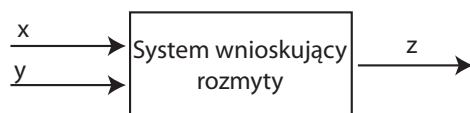
Ryc. 1. Funkcje przynależności $\mu_{A1}(x)$, $\mu_{A2}(x)$, $\mu_{B1}(y)$, $\mu_{B2}(y)$, wyznaczone dla zmiennych lingwistycznych wejściowych X i Y w oparciu o dystrybuanty hipotetycznych rozkładów normalnych liczby ofiar ($\mu_y = 2$, $\sigma_y = 0,5$) i strat materialnych ($\mu_x = 150000$ PLN, $\sigma_x = 30000$ PLN) /opis przykładu w tekście/. Źródło: Opracowanie własne.

Fig. 1. Membership functions $\mu_{A1}(x)$, $\mu_{A2}(x)$, $\mu_{B1}(y)$, and $\mu_{B2}(y)$ for input linguistic variables X and Y, basing on the hypothetic distribution functions of the normal distribution of the number of victims ($\mu_y = 2$, $\sigma_y = 0.5$) and material loss ($\mu_x = 150,000$ PLN, $\sigma_x = 30,000$ PLN) (description of this example in the text). Source: own elaboration.

kresy funkcji przynależności dla opisanych powyżej rozkładów strat materialnych i liczby ofiar wyznaczonych w rozważanym zdarzeniu.

Opierając się na tak zdefiniowanych zmiennych lingwistycznych X i Y można zbudować model wnioskujący rozmyty, o dwóch zmiennych wejściowych i jednej zmiennej wyjściowej Z, określającej poziom ryzyka (ryc. 2).

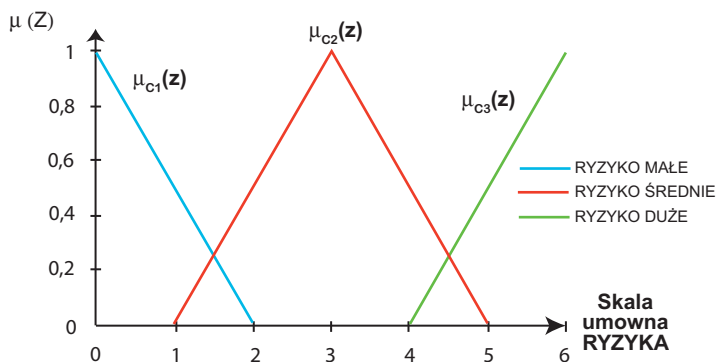
Przyjmijmy, że zmienna wyjściowa Z (wartość ryzyka) może przynależeć do trzech zbiorów rozmytych: „ryzyko małe”, „ryzyko średnie” i „ryzyko duże”. Funkcje przynależności zmiennej wyjściowej $\mu_{C1}(z)$, $\mu_{C2}(z)$, $\mu_{C3}(z)$, odpowiadające poszczególnym zbiorom rozmytym, winny być dobierane w zależności od rodzaju zdarzenia niekorzystnego, obszaru na którym zdarzenie może wystąpić, potencjalnego czasu wystąpienia, przy istotnym udziale wiedzy eksperckiej z zakresu analizy ryzyka i zarządzania kryzysowego.



Ryc. 2. Model systemu wnioskującego o dwóch wejściach i jednym wyjściu (opis przykładu w tekście). Źródło: Opracowanie własne.

Fig. 2. Model of the reasoning system of two inputs and one output (description in the text). Source: own elaboration.

Kształt funkcji przynależności zmiennej wyjściowej może zostać „uwrażliwiony” na te aspekty. Na potrzeby rozważanego przykładu przyjęto dość prostą postać funkcji przynależności zmiennej wyjściowej Z, przedstawioną na ryc. 3.



Ryc. 3. Funkcje przynależności $\mu_{C1}(z)$, $\mu_{C2}(z)$, $\mu_{C3}(z)$, odpowiadające zbiorom rozmytym zmiennej lingwistycznej Z, opisującej stan ryzyka: „ryzyko małe” (C1), „ryzyko średnie” (C2), „ryzyko duże” (C3) /opis przykładu w tekście/. Źródło: Opracowanie własne.

Fig. 3. Membership functions $\mu_{C1}(z)$, $\mu_{C2}(z)$, and $\mu_{C3}(z)$ corresponding to the linguistic variable fuzzy sets Z, describing degree of risk: “low risk” (C1), “medium risk” (C2), and “high risk” C3 (description in the text). Source: own elaboration.

Baza reguł wnioskowania w rozważanym przykładzie może mieć postać:

$$\text{JEŻELI } (X = A1) \text{ I } (Y = B1) \text{ TO } (Z = C1), \quad (9)$$

$$\text{JEŻELI } (X = A2) \text{ I } (Y = B2) \text{ TO } (Z = C3), \quad (10)$$

$$\text{JEŻELI } (X = A1) \text{ I } (Y = B2) \text{ TO } (Z = C2), \quad (11)$$

$$\text{JEŻELI } (X = A2) \text{ I } (Y = B1) \text{ TO } (Z = C2). \quad (12)$$

Wykorzystując zbudowany model rozważmy przypadek następujący: potencjalne zdarzenie niekorzystne, rozważanego powyżej rodzaju, może przynieść średnie straty materialne w wysokości 126 000 PLN ($x = 126\ 000$) i średnią liczbę ofiar śmiertelnych w wysokości 0,8 osoby ($y = 0,8$). (Należy wnieść uwagę, że z powodu uśredniania po wielu zdarzeniach, możliwe są ułamkowe liczby ofiar.) Jaka jest wartość ryzyka (z) w takim przypadku?

Rozmywanie:

Wartość $x = 126000$ odpowiada $\mu_{A1}(x) = 0,788$ i $\mu_{A2}(x) = 0,212$, wartość $y = 0,8$ odpowiada $\mu_{B1}(y) = 0,992$ i $\mu_{B2}(y) = 0,008$.

Agregacja:

Wykorzystując wzór na t-normę Hamachera przedstawiony w tab.1 wyznaczono zagregowane wartości funkcji przynależności na wejściu dla poszczególnych reguł wnioskowania:

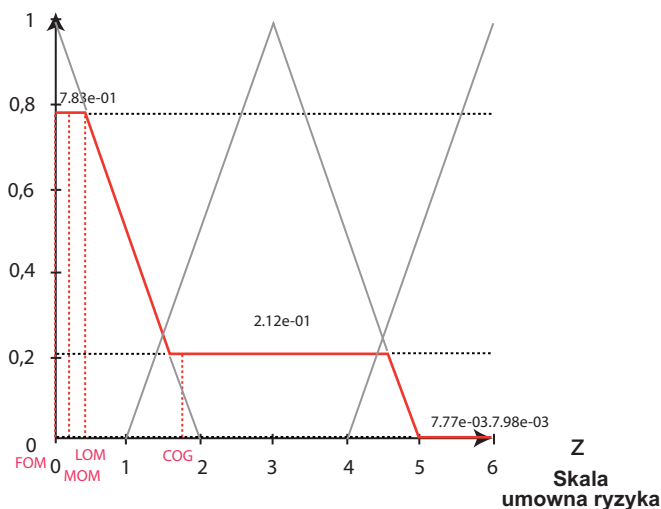
- dla reguły (9) $\mu_{X \cap Y, \text{HAMACHER}} = 7,83e-01$,
- dla reguły (10) $\mu_{X \cap Y, \text{HAMACHER}} = 7,77e-03$,
- dla reguły (11) $\mu_{X \cap Y, \text{HAMACHER}} = 7,98e-03$,
- dla reguły (12) $\mu_{X \cap Y, \text{HAMACHER}} = 2,12e-01$.

Aktywacja i akumulacja:

Podczas aktywacji poszczególnych reguł wnioskowania skorzystano z operatora Mamdamiego (5). W przypadku akumulacji wykorzystano operator MAX (6). Wynik – wynikową, wyjściową funkcję przynależności $\mu(z)$ – przedstawiono na ryc. 4.

Wyostrzenie:

W celu określenia ostrej wartości wyjścia modelu (wartości ryzyka w przyjętej umownej skali ciągłej w zakresie $[0; 6]$) wykorzystano metody obliczeniowe z pracy [10]: środka maksimum (MOM), pierwszego maksimum (FOM), ostatniego maksimum (LOM) i środka ciężkości (COG), otrzymując wyniki: $z_{\text{MOM}} = 0,217$, $z_{\text{FOM}} = 0,0$, $z_{\text{LOM}} = 0,434$, $z_{\text{COG}} = 1,75$.



Ryc. 4. Wynikowa, wyjściowa funkcja przynależności $\mu(z)$ /opis przykładu w tekście/.
Źródło: Opracowanie własne.

Fig. 4. Result, initial membership function $\mu(z)$ (description in the text). Source: own elaboration.

Wnioski

Przedstawione rozważania są jednymi z pierwszych, w których zastosowano teorię logiki rozmytej, zaproponowanej przez L. Zadeha, do analizy ryzyka w obszarze zarządzania bezpieczeństwem obywateli. Przedstawiona metoda pozwala na wyznaczenie dokładniejszej wartości ryzyka za pomocą metody ilościowej niż przyporządkowanie do jednej z trzech klas. Co istotniejsze, w zależności od genezy rozkładów wejściowych w modelu wnioskującym, możliwe jest uwzględnienie zarówno ryzyka eksperckiego (w przypadku analizy prawdopodobieństw i skutków), jak również poziomu społecznego wzburzenia, odnoszącego się bezpośrednio do stanu akceptowalności lub nieakceptowalności określonych ryzyk (co zostało przedstawione w przykładzie obliczeniowym). Niniejszy artykuł przedstawia przede wszystkim zastosowanie rozmytej metody wnioskującej, pozwalającej na obliczanie wartości ryzyka, natomiast wiele założeń poczynionych przy analizie przykładu liczbowego nie pozwala jednoznacznie powiedzieć, że tylko takie zastosowanie tej metody jest słuszne. Z drugiej strony stosowanie logiki rozmytej wnosi nowe wartości do analizy ryzyka. Po pierwsze pozwala dokonywać obliczeń dla różnych systemów bezpieczeństwa, gdyż założone w przykładzie rozkłady wejściowych funkcji przynależności mogą być dobierane w zależności od potrzeb i warunków. Po drugie logika ta może być wykorzystywana w zautomatyzowanych systemach wnioskujących (systemy ekspertowe, systemy wspomaganie decyzji), co pozwala na szerokie zastosowanie tej metody na potrzeby wspomaganie działań Centów Zarządzania Kryzysowego.

W dalszych badaniach autor planuje przeprowadzenie prób zbudowania modelu wnioskującego o wielkości ryzyka, korzystającego z logiki rozmytej, opartego na empirycznych przesłankach określających składowe ryzyka oraz wyniki pomiaru poziomu akceptowalności ryzyka (w ujęciu eksperckim i społecznego wzburze-

nia). Dalszym rozważaniom powinna zostać poddana również stosowalność w zakresie analizy ryzyka różnych operatorów logiki rozmytej w procesie wnioskowania, przez porównywanie otrzymywanych wyników, z wynikami działania ogólnie znanych metod oceny ryzyka. Ważnym aspektem jest również ostateczna interpretacja wyniku (wartości obliczonego ryzyka) w kontekście konieczności podjęcia działań go redukujących.

Piśmiennictwo:

1. Cox L.A. Jr.: What's Wrong with Risk Matrices?, *Risk Analysis*, 2008, 28, 2.
2. Kinney G. F., Wiruth A. D.: *Practical Risk Analysis for Safety Management*, US Naval Postgraduate School i Security Department China Lake, Kalifornia 1976.
3. Mamdami E. H.: Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, *IEEE Transactions on Computers*, 1977, C-26, 12, 1181-1182.
4. Maslow A.: *Motywacja i osobowość*, Biblioteka Klasyków Psychologii, Wydawn. PWN, 2005.
5. Piegat A.: *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. Wydawnictwo Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
6. Rutkowski L.: *Metody i techniki sztucznej inteligencji*. Wydawn. PWN, 2006.
7. Sandman P. M.: Responding to Community Outrage: Strategies for effective Risk Communication. *American Industrial Hygiene Association Fairfax Va*, Fourth Printing 1997.
8. Smolarkiewicz M. M., Kępka P. : Zagrożenia pożarowe. [W]: A.Najgebauer (red.): *Modele zagrożeń aglomeracji miejskiej wraz z systemem zarządzania kryzysowego na przykładzie miasta stołecznego Warszawy*. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2009, 199-242.
9. Smolarkiewicz M. M.: Metodyka wyznaczania niepewności określenia ryzyka na potrzeby zarządzania kryzysowego [W]: M.Lisiecki, M. Raczkowska-Lipińska, B.Sitek, W. Pokruszyński: *Bezpieczeństwo wewnętrzne Rzeczypospolitej Polskiej na tle innych państw Unii Europejskiej. Stan obecny oraz perspektywy zmian*.Wydawn.Wyższej Szkoły Gospodarki Euroregionalnej im. Alcide de Gasperi w Józefowie k/Otwocka, Józefów 2009.
10. Van Leekwijck W., Kerre E. E.: *Defuzzification: criteria and classification*, *Fuzzy Sets and Systems* 1999, 108, 159-178.
11. Wolanin J.: *Zarys teorii bezpieczeństwa obywateli*, DANMAR, Warszawa 2005, 165-331.
12. Zadeh L.: Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, 8, 338-353.
13. Zadeh L.: The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning-I. *Information Sciences* 8, American Elsevier Publishing Company, Inc. 1975, 199-249.

14. Zadeh L.: The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning-III. *Information Sciences* 9, American Elsevier Publishing Company, Inc. 1975, 43-80.

Nadesłano: 3.10.2011 r.

Zaakceptowano do publikacji: 04.01.2012 r.

