

## 10. Metoda oceny ryzyka uszkodzeń obiektów komunikacyjnych w warunkach kryzysowych

### 10.1. Wprowadzenie

Integralną częścią infrastruktury krytycznej, zgodnie z zapisami *Ustawy o zarządzaniu kryzysowym* (2007), jest system transportowy, który odpowiada za przemieszczanie ładunków pomiędzy stacjonarnymi elementami sieci i systemami logistycznymi (Pyza, 2010). Jednym z elementów tego systemu jest jego infrastruktura, którą tworzą drogi wszystkich gałęzi transportu, punkty transportowe oraz urządzenia pomocnicze służące do bezpośredniej obsługi dróg i punktów transportowych (Kogut, 2012). Nieodzownym elementem dróg zarówno samochodowych, jak i kolejowych są zawsze obiekty mostowe, do których zaliczamy różnego rodzaju mosty, wiadukty, estakady i przepusty. Zagrożenia ze względu na źródło powstania można podzielić na zagrożenia naturalne, techniczne i antropogeniczne (Grocki, 2012). Zagrożenia militarne i terrorystyczne wchodzą w skład zagrożeń antropogenicznych, które są przedmiotem rozważań niniejszego rozdziału.

Podatność obiektu komunikacyjnego na jego celowe uszkodzenie (zniszczenie) można rozpatrywać z punktu widzenia wrażliwości danej konstrukcji na zamierzone działanie człowieka lub stopnia jego znaczenia dla prawidłowego funkcjonowania systemu transportowego na danym obszarze kraju (Kamyk & Szelka, 2008). Pierwsze podejście opiera się na znajomości technicznych właściwości elementów danej konstrukcji mostowej (Ray, 2007; „Recomendation ...”, 2003), gdyż wiedza ta pozwala określić słabe punkty konstrukcji obiektu mostowego oraz sposoby jego ochrony przed ewentualnym sabotażem z użyciem materiałów wybuchowych. Drugie podejście polega natomiast na ocenie konsekwencji zniszczenia danego obiektu mostowego. Przy czym takie podejście przeznaczone jest głównie dla organów zarządzających systemem infrastruktury transportowej na danym obszarze (Kamyk & Szelka, 2008). Zatem wydaje się, że opracowanie ilościowej metody oceny ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych będzie miało użyteczny charakter, ponieważ ich wynik będzie mógł być cenną informacją zamieszczaną na mapach ryzyka (Duchaczek & Skorupka, 2013b).

W Polsce istnieje kilka ośrodków naukowych zajmujących się problematyką związaną z projektowaniem konstrukcji mostów wojskowych. Nie ma jednak ośrodka, w którym prowadzone byłyby badania nad oceną ryzyka uszkodzenia tych obiektów w sytuacjach kryzysowych.

Biorąc pod uwagę, że literatura przedmiotu dotycząca omawianej problematyki jest stosunkowo uboga, zatem dodatkowe opracowanie powinno cieszyć się zainte-

---

<sup>14</sup> Dariusz Skorupka, dr hab. inż., Wydział Zarządzania, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych

<sup>15</sup> Artur Duchaczek, dr inż. Wydział Zarządzania, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych

resowaniem środowiska naukowego. Autorzy podejmowali się już przedmiotowej problematyki (Duchaczek & Skorupka, 2013a,b,c), jednak niniejsze opracowanie jest zbiorczym kompendium dotyczącym metody oceny ryzyka uszkodzeń obiektów komunikacyjnych z uwzględnieniem sytuacji kryzysowych, takich jak np. ataki terrorystyczne.

## 10.2. Metodologia badań

W Polsce obiekty mostowe projektuje się z odpowiednim zapasem bezpieczeństwa. W obliczeniach tych nie są jednak uwzględniane obciążenia wyjątkowe, takie jak np. działania terrorystyczne. Mimo, że mosty mają ustalony okres użytkowania, to istnieje zawsze możliwość wystąpienia sytuacji kryzysowych związanych z ich eksploatacją, których efektem jest zachwianie prawidłowego działania systemu transportowego na danym obszarze kraju. Dlatego też:

*Celem niniejszego opracowania jest stworzenie metody oceny ryzyka uszkodzenia obiektów komunikacyjnych na przykładzie obiektów mostowych.*

Osiągnięcie celu zależy od rozwiązania głównego problemu naukowego w postaci następującego pytania:

*W jaki sposób dokonać ilościowej oceny ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych?*

Ze względu na złożoność problemu głównego zachodziła konieczność rozłożenia jego treści na następujące problemy szczegółowe:

*Jakie kryteria uwzględniać podczas oceny ryzyka uszkodzenia obiektu mostowego i jaką metodą określać wagę tych kryteriów? W jaki sposób określać prawdopodobieństwo i konsekwencję (wielkość strat) uszkodzenia określonego obiektu mostowego?*

Ograniczeniem dotyczącym zakresu czynności badawczych prowadzonych nad problemem naukowym będzie skupienie głównej uwagi na obiektach mostowych występujących na ustalonym obszarze kraju oraz ograniczenie sytuacji kryzysowych do uszkodzenia elementów konstrukcyjnych tych obiektów przy użyciu materiałów wybuchowych.

Dotychczas stosowane metody oceny ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych w większości przypadków określają to tylko w sposób jakościowy, tzn. poprzez opis lub zmienne lingwistyczne. W ocenie jakościowej duże znaczenie ma jednak intuicja oceniającego. Wydaje się, że w ocenie ilościowej istnieje możliwość większego obiektywizmu, gdyż oceniający będzie działał według ściśle określonego algorytmu. W związku z tym sformułowano następującą ogólną hipotezę roboczą:

*Autorska metoda oceny ryzyka umożliwi w sposób kompleksowy ilościową ocenę ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych w kontekście ataków terrorystycznych.*

Założono, że rezultaty pracy będą mogły znaleźć praktyczne zastosowanie w procesie tworzenia map ryzyka na potrzeby planów zarządzania kryzysowego.

Główne założenia tego rozdziału stanowiła dotychczas nagromadzona wiedza na temat technologii budowy i odbudowy obiektów mostowych, projektowania przęseł i podpór, metod określania trwałości konstrukcji stalowych i betonowych, metod optymalizacji wielokryterialnej, metod oceny ryzyka przedsięwzięć budowlanych oraz zasad niszczenia konstrukcji mostowych, a także zasady prac minerskich.

Zasadniczą metodą stosowaną do rozwiązania problemu badawczego była analiza systemowa oraz modelowanie matematyczne. W omawianych badaniach zastosowano również narzędzia badawcze, takie jak wskaźniki liczbowe, arkusze kalkulacyjne, zestawienia liczbowe oraz wzory matematyczne.

### **10.3. Podstawy teoretyczne metody oceny ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych**

#### **10.3.1. Podstawowe założenia dotyczące oceny ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych**

Ryzyko jest terminem ogólnie znanym i często używanym w różnych obszarach działalności człowieka. Podobnie jednak, jak w przypadku planowania, definicja i sposób rozumienia ryzyka są różne. Wydaje się jednak, że przeważa opisowe rozważanie ryzyka nad jego ilościową interpretacją (Skorupka, 2007).

W praktyce pojęcie ryzyka jest różnie rozumiane i definiowane (Regan, 2003; Willet, 1951; Knight, 1921; Pfeffer, 1956; Sienkiewicz, 1994; Kasprówic, 2002). Inaczej rozumieją ryzyko ekonomiści, którzy skupiają się zazwyczaj jedynie na aspektach finansowych, a inaczej inżynierowie odnoszący problem ryzyka do zakłóceń w pracy maszyn, czy procesów produkcyjnych. Żołnierze oceniają ryzyko wykonania zadania, a policjanci traktują pojęcie ryzyka jako zagrożenie dla potencjalnego obywatela. Jeszcze inaczej zwykli pracownicy, którzy często oceniają ryzyko utraty przez siebie pracy (Skorupka, 2007).

Można uznać, że ten fakt determinuje potrzebę badania problemu ryzyka. Wydaje się jednak, że najbardziej znanym równaniem umożliwiającym określenie ryzyka uszkodzenia obiektu mostowego może być wyrażenie (10.1) (Skorupka, 2007):

$$R = P \times C \quad (10.1)$$

$P$  - to prawdopodobieństwo ataku terrorystycznego na obiekt mostowy, natomiast  $C$  to konsekwencja jego uszkodzenia lub zniszczenia, również traktowana jako wielkość mierzalna.

Co oznacza, że pojęcie ryzyka można zdefiniować jako prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niekorzystnego (czynnika ryzyka) w trakcie realizacji przedsięwzięcia w iloczyn z konsekwencją jego oddziaływania na wykonywane przedsięwzięcie (Skorupka, 2007).

W niniejszym rozdziale zaproponowano jeden z możliwych przykładów identyfikacji i kwantyfikacji ryzyka uszkodzenia obiektów infrastruktury transportowej na skutek eksplozji ładunku materiału wybuchowego (Duchaczek & Skorupka, 2013b,c). Zaproponowano aby ryzyko  $R_i$  wystąpienia takiego ataku na  $i$ -ty obiekt mostowy na określonym obszarze kraju określić, stosując wyrażenie (2), to jest jako iloczyn prawdopodobieństwa  $p_i$  wystąpienia tego zdarzenia i konsekwencji  $c_i$  wynikających ze zniszczenia tego obiektu podzielony przez sumę tych iloczynów dla wszystkich  $n$  analizowanych mostów (Duchaczek & Skorupka, 2013b,c):

$$R_i = \frac{p_i c_i}{s} \quad (10.2)$$

$$s = \sum_{i=1}^n (p_i c_i). \quad (10.3)$$

przyjmując, że wartość prawdopodobieństwa  $p_i$  i konsekwencji  $c_i$  jest liczbą z przedziału  $\langle 0, 1 \rangle$ .

Zakładając jednocześnie, że suma prawdopodobieństwa  $p$  zniszczenia wszystkich obiektów mostowych, suma konsekwencji  $c$  ich zniszczenia oraz ryzyko  $R$  uszkodzenia  $n$  obiektów mostowych na analizowanym obszarze kraju jest równe jedności.

Do obliczania wartości prawdopodobieństwa  $p_i$  i konsekwencji  $c_i$  zaprezentowano nietypowe zastosowanie dwóch wybranych metod optymalizacji wielokryterialnej. Zaletą zaprezentowanych analiz jest fakt, że przyjętą hierarchię wariantów decyzyjnych będzie można prosto w naukowy sposób wyjaśnić, a nie odwoływać się tylko do swojej wiedzy, doświadczenia i intuicji.

W literaturze przedmiotu zaprezentowano wiele metod optymalizacji wielokryterialnej, które można było zastosować do rozwiązania przedmiotowego zagadnienia. Autorzy licznych prac, między innymi Książek (2011), zaprezentowali zarówno klasyfikację, jak i porównanie tychże metod. Dlatego w niniejszym opracowaniu nie prezentowano już tego materiału. Zdaniem Autorów pracy są dwie cechy, które zdecydowały o wyborze metod optymalizacyjnych. Po pierwsze był to charakter zmiennych (lingwistyczne lub liczbowe), po drugie prostota i przejrzystość danej metody.

O charakterze zmiennych użytych do analiz decydowały kryteria przyjęte przez autorów do obliczania zarówno prawdopodobieństwa  $p_i$ , jak i konsekwencji  $c_i$  omówione w dalszej części pracy. W przypadku użycia czynników niemierzalnych (zmienne lingwistyczne) użyto metody Analitycznego Procesu Hierarchicznego (AHP), natomiast w przypadku użycia czynników mierzalnych (zmienne liczbowe) użyto metody Bellingera (Duchaczek & Skorupka, 2013a,b,c).

Prostota i przejrzystość danej metody jest bardzo ważnym elementem, ponieważ wpływa bezpośrednio na chęć stosowania danej metody w praktyce inżynierskiej. Metoda nawet najlepsza jeżeli jest zbyt skomplikowana i mało przejrzysta nie będzie stosowana przez inżynierów w codziennej praktyce zawodowej.

### **10.3.2. Metody optymalizacji wielokryterialnej wykorzystywane do oceny ryzyka uszkodzenia obiektów infrastruktury transportowej**

#### **Podstawy teoretyczne metody AHP**

W niniejszej pracy do oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia obiektów mostowych zastosowano metodę Analitycznego Procesu Hierarchicznego (AHP).

Metoda AHP została opracowana i opisana przez Saaty'ego (1991; 2001). W oparciu o prace Przybyło i Kręzołka (2003), Gindy (2007), Kastelik-Gindy (2012), Teknomo (2012), a szczególnie pracę Ostregi (2004), autorzy w niniejszym opracowaniu przedstawili tylko najważniejsze założenia teoretyczne metody AHP.

Z założenia metoda ta powinna ułatwiać dokonywanie optymalnych wyborów w przypadku optymalizacji wielokryterialnej, dzięki ich redukcji do serii porównań wykonanych parami. Metoda AHP ma oczywiście wiele zalet, ale za jedną z naji-

stotniejszych należy uznać możliwość jednoczesnego użycia czynników mierzalnych i niemierzalnych (Ostręga, 2004).

Ponieważ cechą charakterystyczną metody jest fakt, że dokonuje się porównania parami każdego elementu z każdym, zatem standardowo używane skale ocen są tu generalnie bardzo mało przydatne. Z tego względu wprowadzono nową 9-cio punktową skalę ocen. Porównując ze sobą dwa elementy ustalamy, który z tych dwóch elementów jest ważniejszy i w jakim stopniu (Przybyło & Krężolek, 2003).

W przypadku porównania elementów, które nie mają charakteru mierzalnego należy stosować tzw. podejście lingwistyczne, w którym zmienna lingwistyczna przyjmuje jako swoje wartości tzw. określenia werbalne. W celu oceny elementów znajdujących się na poszczególnych poziomach analizowanej struktury zbudowano macierz porównań, której stopień równy jest liczbie porównywanych elementów (Ostręga 2004):

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} = 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} = \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} = \frac{1}{a_{1n}} & 1 & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (10.4)$$

$A$  – macierz kwadratowa o elementach  $a_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ), podlegającym następującym zasadom:

a) jeżeli  $a_{ij} = z$ , wtedy  $a_{ji} = \frac{1}{z}$ ,  $z \neq 0$

b) jeżeli kryterium  $C_i$  jest równoważne w stosunku do kryterium  $C_j$ , wtedy  $a_{ij} = 1$  i  $a_{ji} = 1$ , a w szczególności  $a_{ij} = 1$  dla  $i=j$ .

Przy czym macierz  $A$  spełnia również następującą własność:

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Wszystkie elementy analizowanego modelu są porządkowane według ważności wektorów priorytetów  $W = w_1, \dots, w_n$ . Aby dokonać obliczeń wektora priorytetów  $W$  należy w pierwszej kolejności dokonać normalizacji macierzy  $A$  (powstaje wówczas macierz  $B$ ), poprzez podzielenie każdego jej elementu przez sumę elementów kolumny, w której się on znajduje (Ostręga, 2004):

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}. \quad (10.5)$$

Następnie określamy wartości średnie dla każdego wiersza nowej macierzy będące elementami  $w_i$  wektora priorytetów  $W$  (Ostręga, 2004):

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n}, \quad (10.6)$$

$i, j = 1, \dots, n$  przy czym  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . W przypadku wektora priorytetów analizowanych kryteriów używamy symbolu  $k_i$ , natomiast dla wektora priorytetu obiektu  $i$ -tego według kryterium  $j$ -tego stosujemy symbol  $o_{ij}$ .

Wartość współczynnika AHP oznaczonego  $h_i$  określano na podstawie zależności:

$$h_i = \sum_{j=1}^n (k_i o_{ij}), \quad (10.7)$$

$k_i$  to wartość elementu wektora priorytetów dla  $i$ -tego kryterium (tzw. waga  $i$ -tego kryterium), natomiast  $o_{ij}$  to wartość elementu wektora priorytetu  $j$ -tego obiektu pod względem  $i$ -tego kryterium, przy czym  $\sum_{i=1}^n h_i = 1$ .

Zatem można stwierdzić, że porównania poszczególnych kryteriów oraz analizowanych wariantów dokonuje się poprzez określanie stopnia przewagi jednego elementu nad drugim. Czynność tę realizują specjaliści na podstawie swoich niestety dość subiektywnych opinii. Pomimo swojej wiedzy oni również mogą popełnić błędy w przyznawaniu ocen, wynikające przede wszystkim z braku tzw. konsekwencji przy ocenianiu (Ostręga, 2004).

Jak podaje A. Ostręga (2004) w metodzie AHP sprawdzenie wiarygodności wyników odbywa się przede wszystkim poprzez obliczenie współczynnika konsekwencji  $CR$  obliczanego według zależności:

$$CR = \frac{CI}{RI} 100\%, \quad (10.8)$$

$RI$  to indeks losowy, zależy od stopnia macierzy  $n$ , przybierający wartości od 0÷1,57 (tabela 10.1). Szczegóły dotyczące obliczania wartości indeksu losowego  $RI$  zaprezentował Saaty (1991).

Wskaźnik konsekwencji  $CI$  określamy natomiast z zależności:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (10.9)$$

$\lambda_{max}$  to maksymalna wartość własna macierzy, zawsze większa lub równa stopniowi macierzy  $n$ .

Tabela 10.1. Wartość indeksu losowego  $RI$  (Ostręga, 2004; Kastelik-Ginda, 2012)

Wymiar macierzy	$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Indeks losowy	$RI$	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57

Przybliżoną maksymalną wartość własną macierzy  $\lambda_{max}$  można obliczyć jako wartość sumy iloczynów uśrednionych wierszowo wartości znormalizowanych wag i kolumnowych sum odpowiadających poszczególnym kryteriom, co można zapisać wyrażeniem (Ginda, 2007; Kastelik-Ginda, 2012; Teknomo, 2012):

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \left( w_i \sum_{j=1}^n a_{ij} \right) \quad (10.10)$$

Przyjęto, że wartość współczynnika konsekwencji  $CR$  nie powinna przekraczać 10%, gdyż wówczas należałoby powtórzyć proces oceny (Ostręga, 2004).

## Podstawy teoretyczne metody Bellingera

W niniejszej pracy do oceny konsekwencji uszkodzenia obiektów mostowych zastosowano metodę Bellingera. Skorupka, Duchaczek i Szleszyński (2012), w oparciu o prace Wolnego (2007) i Górnego (2004), przedstawili przejrzysty opis metody Bellingera. Metoda ta swoją nazwę wzięła od nazwiska jej twórcy Bernharda Bellingera. Jest to jedną z metod analizy wielokryterialnej, która porządkuje obiekty na podstawie wartości oceny łącznej wyznaczonej ze zbioru przyjętych kryteriów cząstkowych. P. Górny (2004) przedstawił szczegółowy algorytm obowiązujący w omawianej metodzie, ujmując go w ośmiu etapach. W pierwszym etapie następuje określenie wymagań i ograniczeń dla przyszłych hipotetycznych wariantów rozwiązań analizowanego problemu. Etap drugi to przede wszystkim zdefiniowanie dostępnych w danej sytuacji wariantów decyzyjnych. W etapie trzecim następuje szczegółowe określenie przyjętych kryteriów oceny, przyjęcie jednostek pomiarowych i pożądanego kierunku zmian w obrębie danego kryterium (stymulanty i destymulanty), a także dolnej i górnej granicy zmian dla analizowanych kryteriów cząstkowych. Etap czwarty polega na ustaleniu hierarchii poszczególnych kryteriów, poprzez ustalenie wag jakie nadaje decydent przyjętym kryteriom oceny. W etapie piątym następuje tworzenie macierzy zawierającej rzeczywiste wartości analizowanych kryteriów pod kątem poszczególnych wariantów. Etap szósty obejmuje zaprezentowanie wszystkich liczb z macierzy z etapu piątego jako procentu tzw. *drogi* od stanu najmniej do najbardziej pożądanego. W etapie siódmym mnożymy wszystkie liczby otrzymane w etapie szóstym przez wagi przyjęte w etapie czwartym. Etap końcowy (ósmy), to określenie wariantu najlepszego na podstawie sumy ocen przyznanych poszczególnym wariantom z uwzględnieniem wszystkich analizowanych kryteriów (Górny, 2004). Przedstawiony proces oceny wariantów decyzyjnych przy zastosowaniu metody Bellingera można opisać zależnościami (10.11-10.13).

Odległość pomiędzy kresem górnym i dolnym zbioru wartości  $j$ -tego kryterium oceny wariantów decyzyjnych  $\Delta_j$  określamy z zależności (Skorupka, Duchaczek & Szleszyński 2012):

$$\Delta_j = |\sup_X - \inf_X| \quad (10.11)$$

$\sup_X$  oznacza kres górny zbioru dopuszczalnych wartości  $j$ -tego kryterium, natomiast  $\inf_X$  to kres dolny zbioru dopuszczalnych wartości  $j$ -tego kryterium.

Ocenę  $i$ -tego wariantu decyzyjnego na podstawie  $j$ -tego kryterium oceny  $o_{xij}$  określamy (Skorupka, Duchaczek & Szleszyński 2012):

- dla stymulanty:

$$o_{xij} = \frac{\sup_X - x_i}{\Delta_j} \cdot 100\% , \quad (10.12)$$

- dla destymulanty:

$$o_{xij} = \frac{\inf_X - x_i}{\Delta_j} \cdot 100\% , \quad (10.13)$$

$x_i$  przydzielona przez analityka wartość liczbowa dla  $i$ -tego wariantu decyzyjnego.

Ocena końcowa wariantu decyzyjnego wyznaczana jest na podstawie zależności (14), gdzie uwzględniana jest waga danego kryterium lub preferencja decydenta

(Skorupka, Duchaczek & Szleszyński, 2012):

$$O_{xi} = \sum_{j=1}^m w_j \cdot o_{xij} \quad (10.14)$$

gdzie  $O_{xi}$  to ocena  $i$ -tego wariantu decyzyjnego, natomiast  $w_j$  to waga  $j$ -tego kryterium oceny (preferencja decydenta) o wartość z przedziału  $\langle 0, 1 \rangle$ .

### 10.3.3. Kryteria uwzględniane przy ocenie ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych

Wyznaczając prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu mostowego przyjęto, że jest to wielkość określająca nasze oczekiwania co do możliwości wystąpienia danego zdarzenia. Wielkość ta jest wykorzystywana zatem do wyznaczania (szacowania) możliwości zajścia pewnego „zdarzenia losowego” i przyjmuje wartości z przedziału  $\langle 0; 1 \rangle$ , przy czym suma tych liczb (tzn. całkowita wartość dla wszystkich analizowanych obiektów mostowych) równa jest zawsze jedności. Ponieważ określenie prawdopodobieństwa w oparciu tylko o subiektywne przesłanki i odczucia może być nieprzydatne dla praktyki inżynierskiej, należało zatem określić metodę wyznaczania tegoż prawdopodobieństwa (Duchaczek & Skorupka, 2013a).

Biorąc pod uwagę założenie, że suma prawdopodobieństwa  $P$  zniszczenia obiektów mostowych na danym terenie ma być równa jedności, tzn. zniszczony zostanie tylko jeden obiekt mostowy oraz fakt, że zawsze łatwiej jest porównywać ze sobą tylko dwa warianty, szczególnie kiedy ich hierarchia jest wyrażona zmiennymi lingwistycznymi, do wyznaczania wartości tego prawdopodobieństwa wykorzystano metodę AHP. Przyjęto założenie, że prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu mostowego jest równe współczynnikowi danego wariantu, uzyskanemu w metodzie AHP, przy czym wariantami są tu wszystkie obiekty mostowe zlokalizowane na danym obszarze (Duchaczek & Skorupka, 2013a). Natomiast przy ocenie konsekwencji uszkodzenia obiektów mostowych przyjęto hierarchię tych obiektów wyrażoną zmiennymi liczbowymi, przez co do jej wyznaczania wykorzystano metodę Bellingera (Duchaczek & Skorupka, 2013b).

Obiektywność prowadzonych analiz uzależniona jest zawsze od przyjętych kryteriów. Ponieważ jednak obiekty mostowe to specyficzne budowle, charakteryzujące się zróżnicowaną konstrukcją, to kryteria przyjmowane do obliczeń ryzyka ich uszkodzenia mogą być tak naprawdę każdorazowo różne. Należy być jednak świadomym, że zbyt duża liczba kryteriów zdecydowanie utrudnia prowadzenie przedmiotowych analiz, a jednocześnie tylko w nieznacznym stopniu zwiększa „obiektywizm” otrzymanych wyników (Duchaczek & Skorupka, 2013b).

Analizując możliwości dokonania ataku z użyciem materiałów wybuchowych na obiekty mostowe stwierdzono, że kryteriami oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia takich obiektów jest przede wszystkim lokalizacja obiektu oraz możliwość zniszczenia (uszkodzenia) konstrukcji nośnej obiektu (Duchaczek & Skorupka, 2013a).

W przypadku lokalizacji obiektu mostowego należy uwzględnić takie aspekty jak możliwość ochrony i obrony danego obiektu, co zazwyczaj związane jest z odległością od centrum miasta (K1) oraz natężenie ruchu na moście (K2), co jest związane bezpośrednio z klasą drogi. Można założyć, że obiekty oddalone dalej od centrum



miast nie będą monitorowane ani ochraniać, a zatem prawdopodobieństwo związane np. z wcześniejszym zaminowaniem mostu będzie większe. Jeżeli chodzi o natężenie ruchu to oczywistym jest, że atak na obiekt mostowy związany jest z paraliżem komunikacyjnym na danym obszarze kraju, wydaje się zatem, że obiekty o znacznym natężeniu ruchu powinny być ciekawszym i ważniejszym celem (Duchaczek & Skorupka, 2013a). Szczegóły dotyczące konstrukcji obiektu mostowego należy rozpatrywać w kilku aspektach, m.in. konstrukcji podpór, konstrukcji przęseł oraz rodzaju materiału z jakiego zostały one wykonane. Zgodnie z instrukcją *Prace minerskie i niszczenia* (1995) obiekty mostowe należy niszczyć przede wszystkim w sposób częściowy, który polega na wyborze takich elementów konstrukcji, których uszkodzenie uniemożliwi odtworzenie przejezdności tych obiektów przez położenie przęseł mostów towarzyszących. Za optymalne rozwiązanie częściowego zniszczenia tych obiektów uważa się uszkodzenie przęsła na długości przekraczającej 25 m, znajdującego się nad nurtem rzeki, przy jednoczesnym uniknięciu konieczności burzenia podpór pośrednich.

Analizując konstrukcję mostu pod kątem jego zniszczenia należy ustalić jaki jest typ ustroju nośnego przęseł, gdyż ładunki materiałów wybuchowych powinny znaleźć się na ich elementach nośnych. Mimo, że nie jest to wymóg konieczny, to miejsca przyłożenia materiału wybuchowego powinny znajdować się tam, gdzie występują największe momenty zginające (a przez to i naprężenia) w konstrukcji przęsła. Pamiętając o zasadzie stosowania minimalnej liczby ładunków bardzo często przekroje niszczenia należy ustalić tam, gdzie jest najmniej elementów do przebicia w przekroju poprzecznym przęsła. Zgodnie z instrukcją *Prace minerskie i niszczenia* (1995), w przypadku mostów o przęsłach dłuższych niż 30 m wystarczy zniszczyć tylko przęsła, w innym przypadku należy niszczyć zarówno przęsła jak i podpory pośrednie (K3).

Uwzględniając materiał z jakiego wykonane zostały mosty (K4) stwierdzono, że najłatwiej niszczyć mosty drewniane, kamienne, betonowe, żelbetowe, a następnie dopiero stalowe. Wynika to z faktu, że mosty stalowe mają zazwyczaj dużo więcej nośnych elementów konstrukcyjnych, niż znacznie masywniejsze od nich mosty betonowe, czy żelbetowe. Stal jest również materiałem bardziej plastycznym, zatem w przypadku równego rodzaju pęknięć bezpieczniejsze od materiałów kruchych, jak np. beton.

Uwzględniając samą konstrukcję mostu należy stwierdzić, że zazwyczaj najbardziej wrażliwe na ataki terrorystyczne są mosty wiszące i podwieszane, następnie kratownicowe i belkowe (o małej liczbie belek), a na końcu łukowe i płytowe (K5).

Wydaje się również, że nie bez znaczenia jest wysokość położenia przęsła nad poziomem wody lub gruntu (K6) ponieważ wpływa to bezpośrednio na możliwość zaminowania przęsła od spodu, co dla większości konstrukcji (np. w mostach belkowych i płytowych) jest wskazane ze względu na umiejscowienie elementów rozciąganych.

Autorzy opracowania zaproponowali przyjęcie siedmiu kryteriów oceny konsekwencji uszkodzenia obiektów mostowych, a mianowicie: długość przęsła, liczba pasów ruchu na moście, liczba podpór pośrednich, wysokość przęsła nad powierzchnią lustra wody, natężenie ruchu, występowanie alternatywnego przejazdu oraz możliwość szybkiego usunięcia uszkodzonego przęsła (Duchaczek & Skorupka,

2013b). Założono, że im dłuższe przęsło tym większe konsekwencje jego zniszczenia, gdyż odbudowa analizowanego obiektu związana jest z czasem i ze znacznymi kosztami odbudowy (K1).

Przyjęto, że liczba pasów ruchu na moście wpływa bezpośrednio na konsekwencję jego zniszczenia (K2). Związane jest to z faktem, że w przypadku mostów jednokierunkowych (z jednym pasem ruchu) możliwość jego tymczasowej odbudowy jest znacznie łatwiejsza i szybsza niż w przypadku przęseł z kilkoma pasami ruchu.

Następnie uwzględniono liczbę podpór pośrednich (K3). W przypadku występowania bowiem podpór pośrednich istnieje także niebezpieczeństwo ich zniszczenia, co pociąga za sobą dodatkowe nakłady czasu pracy i kosztów związanych z ewentualną ich odbudową.

Kryterium czwartym (K4) była wysokość położenia przęsła nad powierzchnią lustra wody lub terenu wyrażana w metrach. Przyjęto, że w przypadku mostów niskowodnych istnieje więcej środków technicznych umożliwiających odbudowę ich przęseł, niż przy tzw. mostach wysokowodnych. Przyjmuje się zatem, że wysokość położenia przęsła nad powierzchnią lustra wody jest wielkością wprost proporcjonalną do konsekwencji jego zniszczenia.

Jednym z najważniejszych kryteriów było oczywiście natężenie ruchu (K5). Założono, że wraz ze wzrostem natężenia ruchu na przęsle konsekwencje jego zniszczenia są bardziej uciążliwe.

Występowanie alternatywnego przejazdu, wyrażane w procentach, było kryterium szóstym (K6). Zaproponowano aby w przypadku braku alternatywnego przejazdu przyjąć 0%, zaś gdy występuje przejazd spełniający idealnie warunki techniczne dla obiektu pierwotnego wówczas przyjąć 100%. Uzasadnione jest to faktem, że możliwość wykonania alternatywnego objazdu przeszkody wodnej lub terenowej zmniejsza zdecydowanie konsekwencje zniszczenia pierwotnego obiektu mostowego.

Równie istotnym kryterium (K7) wydawała się możliwość szybkiego usunięcia uszkodzonego przęsła wyrażana w procentach. Zaproponowano wartość bliską 100% w przypadku prostych (leżajowych) przęseł drewnianych, 50% dla przęseł mostów stalowych o nieskomplikowanej konstrukcji (np. mostów belkowych lub niewysokich kratownic) oraz 0% w przypadku masywnych obiektów betonowych i żelbetowych. Przyjmuje się, że materiał budowlany z jakiego wykonano przęsło wpływa bezpośrednio na łatwość usunięcia przęsła z osi podłużnej mostu, a przez to na czas udrożnienia miejsca budowy nowego przęsła (Duchaczek & Skorupka, 2013b).

#### **10.4. Przykład oceny ryzyka uszkodzenia obiektu mostowego**

W pracy zaprezentowano praktyczne zastosowanie proponowanej metody określania ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych na określonym obszarze kraju. Przeanalizowano sześć mostów znajdujących się w okolicy Wrocławia. Wybrane mosty charakteryzowały się zarówno różnorodną konstrukcją, jak i lokalizacją (tabela 10.2 i tabela 10.11).

Tabela 10.2. Dane mostów wybranych do analizy („Mosty we Wrocławiu”, 2012)

Wariant	Nazwa mostu	Numer kryterium					
		K1	K2	K3	K4	K5	K6
W1	Bolesława Chrobrego	Słaba	Małe	3 x 25 + 48	Żelbetowy	Łukowa	B. Dobra
W2	Bolesława Krzywoustego	Dobra	B. Duże	3 x 21	Żelbetowy	Belkowa	B. Dobra
W3	Władysława Sikorskiego	Dobra	Duże	2 x 46,5	Stalowy	Kratownicowa	Słaby
W4	Polanowicki	Słaba	B. Małe	ok. 30 m	Stalowy	Belkowa	Dobry
W5	Grunwaldzki	B. Dobra	B. Duże	112,5	Stalowy	Wisząca	Słaby
W6	Milenijny	B. Dobra	B. Duże	68 + 153 + 68	Żelbetowy + Struny stalowe	Wantowa	Dobry

Analizy rozpoczęto od określenia prawdopodobieństwa uszkodzenia wybranych obiektów mostowych przy wykorzystaniu metody AHP. Korzystając ze wzorów (10.4-10.6) określono wartość wektora priorytetów dla przyjętych kryteriów  $k_i$ , które przedstawiono w tabeli 10.3 jako wagi tych kryteriów. Subiektywna ocena wyrażona wartością priorytetu wykazała, że największy wpływ na wartość prawdopodobieństwa uszkodzenia konstrukcji przęsła będą miały natężenie ruchu (K2) i konstrukcja przęsła (K5).

Tabela 10.3. Wagi kryteriów przyjętych do analiz (Duchaczek &amp; Skorupka, 2013a)

Wyszczególnienie		K1	K2	K3	K4	K5	K6	Priorytet $k_i$
Ochrona obiektu	K1	1,00	0,60	0,80	5,00	0,80	6,0	0,201
Natężenie ruchu	K2	1,67	1,00	1,00	6,00	0,80	5,00	0,246
Długość przęsła	K3	1,25	1,00	1,00	3,00	0,90	5,00	0,212
Materiał konstrukcyjny	K4	0,20	0,17	0,33	1,00	0,25	2,00	0,058
Konstrukcja przęsła	K5	1,25	1,25	1,11	4,00	1,00	6,00	0,245
Dostęp do spodu przęsła	K6	0,17	0,20	0,20	0,50	0,17	1,00	0,038
Współczynnik $CR = 2,20\%$								

W tabelach 10.4-10.9 przedstawiono oceny poszczególnych wariantów (rodzajów mostów) według przyjętych sześciu kryteriów. W tym przypadku również w tabelach w ostatniej kolumnie podano wartości wektora priorytetów  $o_{ij}$  dla każdego z wariantów uzyskane także przy zastosowaniu wzorów (10.4-10.6).

Tabela 10.4. Ocena wariantów wg kryt. nr 1 – Ochrona obiektu (Duchaczek &amp; Skorupka, 2013a)

Wyszczególnienie		W1	W2	W3	W4	W5	W6	Priorytet $o_{ij}$
Bolesława Chrobrego	W1	1,00	4,00	4,00	1,00	8,00	8,00	0,366
Bolesława Krzywoustego	W2	0,25	1,00	1,00	0,40	4,00	4,00	0,125
Władysława Sikorskiego	W3	0,25	1,00	1,00	0,40	4,00	4,00	0,125
Polanowicki	W4	1,00	2,50	2,50	1,00	8,00	8,00	0,310
Grunwaldzki	W5	0,13	0,25	0,25	0,13	1,00	1,00	0,036
Milenijny	W6	0,13	0,25	0,25	0,13	1,00	1,00	0,036
Współczynnik $CR = 1,71\%$								

Tabela 10.5. Ocena wariantów wg kryt.nr 2 - Natężenie ruchu (Duchaczek & Skorupka, 2013a)

Wyszczególnienie		W1	W2	W3	W4	W5	W6	Piorytet $o_{i2}$
Bolesława Chrobrego	W1	1,00	0,10	0,50	2,00	0,20	0,10	0,042
Bolesława Krzywoustego	W2	10,00	1,00	3,00	9,00	2,00	1,00	0,327
Władysława Sikorskiego	W3	2,00	0,33	1,00	6,00	0,70	0,60	0,128
Polanowicki	W4	0,50	0,11	0,17	1,00	0,10	0,10	0,025
Grunwaldzki	W5	5,00	0,50	1,43	10,00	1,00	0,90	0,204
Milenijny	W6	10,00	1,00	1,67	10,00	1,11	1,00	0,274
Współczynnik $CR = 2,88\%$								

Tabela 10.6. Ocena wariantów wg kryt. nr 3 - długość przęsła (Duchaczek & Skorupka, 2013a)

Wyszczególnienie		W1	W2	W3	W4	W5	W6	Priorytet $o_{i3}$
Bolesława Chrobrego	W1	1,00	1,50	0,40	0,60	0,20	0,10	0,053
Bolesława Krzywoustego	W2	0,67	1,00	0,30	0,50	0,15	0,09	0,040
Władysława Sikorskiego	W3	2,50	3,33	1,00	3,00	0,70	0,50	0,174
Polanowicki	W4	1,67	2,00	0,33	1,00	0,40	0,20	0,080
Grunwaldzki	W5	5,00	6,67	1,43	2,50	1,00	0,80	0,255
Milenijny	W6	10,00	11,11	2,00	5,00	1,25	1,00	0,398
Współczynnik $CR = 1,68\%$								

Tabela 10.7. Ocena wariantów wg kryt. nr 4 - Materiał konstrukcji (Duchaczek & Skorupka, 2013a)

Wyszczególnienie		W1	W2	W3	W4	W5	W6	Priorytet $o_{i4}$
Bolesława Chrobrego	W1	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	0,334
Bolesława Krzywoustego	W2	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	0,334
Władysława Sikorskiego	W3	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,083
Polanowicki	W4	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,083
Grunwaldzki	W5	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,083
Milenijny	W6	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,083
Współczynnik $CR = 0,00\%$								

Tabela 10.8. Ocena wariantów wg kryt. nr 5 - Konstrukcja przęsła (Duchaczek & Skorupka, 2013a)

Wyszczególnienie		W1	W2	W3	W4	W5	W6	Priorytet $o_{i5}$
Bolesława Chrobrego	W1	1,00	0,80	0,60	0,80	0,40	0,20	0,081
Bolesława Krzywoustego	W2	1,25	1,00	0,80	1,00	0,60	0,40	0,115
Władysława Sikorskiego	W3	1,67	1,25	1,00	1,40	0,80	0,40	0,144
Polanowicki	W4	1,25	1,00	0,71	1,00	0,40	0,20	0,094
Grunwaldzki	W5	2,50	1,67	1,25	2,50	1,00	0,80	0,215
Milenijny	W6	5,00	2,50	2,50	5,00	1,25	1,00	0,351
Współczynnik $CR = 1,22\%$								

Tabela 10.9. Ocena wariantów wg kryt. nr 6 - Dostęp do spodu przęsła (Duchaczek & Skorupka, 2013a)

Wyszczególnienie		W1	W2	W3	W4	W5	W6	Priorytet $o_{i6}$
Bolesława Chrobrego	W1	1,00	1,00	8,00	4,00	8,00	4,00	0,351
Bolesława Krzywoustego	W2	1,00	1,00	8,00	4,00	8,00	4,00	0,351
Władysława Sikorskiego	W3	0,13	0,13	1,00	0,25	1,00	0,25	0,036
Polanowicki	W4	0,25	0,25	4,00	1,00	4,00	1,00	0,113
Grunwaldzki	W5	0,13	0,13	1,00	0,25	1,00	0,25	0,036
Milenijny	W6	0,25	0,25	4,00	1,00	4,00	1,00	0,113
Współczynnik $CR = 2,84\%$								

W tabeli 10.10 zaprezentowano końcowe wyniki obliczeń przeprowadzone według wzoru (10.7). Otrzymane wyniki w jednoznaczny sposób wykazały, że obiektem najbardziej narażonym na ataki terrorystyczne jest most Milenijny (W6), następnie most Bolesława Krzywoustego (W2) i most Grunwaldzki (W5). Oczywiście do takich wniosków można dojść także intuicyjnie, jednak przy użyciu metody AHP uzyskujemy wartości liczbowe, które można wykorzystać do dalszych analiz.

Tabela 10.10. Wyniki obliczeń metodą AHP (Duchaczek & Skorupka, 2013a)

Wariant	Nazwa mostu	Współczynnik AHP - $h_i$
W1	Bolesława Chrobrego	0,1476
W2	Bolesława Krzywoustego	0,1751
W3	Władysława Sikorskiego	0,1349
W4	Polanowicki	0,1177
W5	Grunwaldzki	0,1704
W6	Milenijny	0,2543

Następnie przeanalizowano wartości konsekwencji uszkodzenia wybranych obiektów mostowych używając do tego celu metody Bellingera. Tak jak wspomniano wcześniej, w pracy przeanalizowano sześć wybranych mostów znajdujących się w okolicy Wrocławia (tab. 10.11). Przy czym dane w tabeli 10.11 dotyczące natężenie ruchu (K5) oraz wysokości przęsła nad powierzchnią lustra wody (K4) zostały przyjęte tylko orientacyjnie.

Analiza została przeprowadzona na podstawie siedmiu kryteriów K1–K7 opisanych również w tabeli 10.11. Na wstępie przyjęto pożądany kierunek zmian liczbowych oraz dolną i górną granicę zmian dla poszczególnych kryteriów, co przedstawiono w tabeli 10.12. Jako dolną i górną granicę zmian dla poszczególnych kryteriów przyjęto wartość ekstremalną poszczególnych kryteriów.

Tabela 10.11. Dane mostów wybranych do analizy („Mosty we Wrocławiu”, 2012)

Wariant	Nazwa mostu	Numer kryterium						
		K1	K2	K3	K4*	K5*	K6	K7
W1	Bolesława Chrobrego	48	2	3	13	2000	60	25
W2	Bolesława Krzywoustego	21	4	2	3	30000	10	25
W3	Władysława Sikorskiego	46,5	2	1	11	10000	90	50
W4	Polanowicki	30	2	0	2	3000	30	50
W5	Grunwaldzki	112,5	4	0	9	30000	90	50
W6	Milenijny	153	4	2	16	40000	40	50

\* Przyjęto wartości orientacyjne

Tabela 10.12. Pożądaný kierunek zmian liczbowych oraz dolna i górna granica zmian dla poszczególnych kryteriów (Duchaczek & Skorupka, 2013b)

Wartość kryterium	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
pożądana (stymulanta)	112,5	4	3	16	40000	10	50
niepożądana (destymulanta)	21	2	0	2	2000	90	25

Następnie przyjęto wagi dla poszczególnych kryteriów (tabela 10.13) oraz wartości kryteriów dla porównywanych wariantów (tabela 10.14).

Tabela 10.13. Wagi dla poszczególnych kryteriów (Duchaczek & Skorupka, 2013b)

Wyszczególnienie	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Wartość wagi	0,15	0,15	0,10	0,10	0,20	0,20	0,10

Tabela 10.14. Wartości kryteriów dla poszczególnych wariantów (Duchaczek & Skorupka, 2013b)

War./Kryt.	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
W1	48	2	3	13	2000	60	25
W2	21	4	2	3	30000	10	25
W3	46,5	2	1	11	10000	90	50
W4	30	2	0	2	3000	30	50
W5	112,5	4	0	9	30000	90	50
W6	153	4	2	16	40000	40	50

Następnie w tabeli 10.15 przedstawiono liczby z tabeli 10.14 (z etapu V) jako procent *drogi* od stanu najmniej do najbardziej pożądanego. Z kolei w tabeli 10.16 również te liczby ale po uwzględnieniu wag podanych w tabeli 10.13. W tabeli 10.17 dla analizowanego przypadku zaprezentowano wyznaczone oceny łączne uzyskane w wyniku obliczeń. Z przeprowadzonej analizy wynika, że z punktu widzenia preferencji decydenta (wartości wag) oraz przyjętych kryteriów łączną ocenę najwyższą, a mianowicie 95,81 otrzymał Most Milenijny.

Tabela 10.15. Liczby z tabeli 14 jako procent *drogi* od stanu najmniej do najbardziej pożądanego (Duchaczek & Skorupka, 2013b)

War./Kryt.	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
W1	29,5	0,0	100,0	78,6	0,0	37,5	0,0
W2	0,0	100,0	66,7	7,1	73,7	100,0	0,0
W3	27,9	0,0	33,3	64,3	21,1	0,0	100,0
W4	9,8	0,0	0,0	0,0	2,6	75,0	100,0
W5	100,0	100,0	0,0	50,0	73,7	0,0	100,0
W6	144,3	100,0	66,7	100,0	100,0	62,5	100,0

Tabela 10.16. Liczby z tabeli 14 jako procentu *drogi* od stanu najmniej do najbardziej pożądanego z uwzględnieniem wag podanych w tabeli 13 (Duchaczek & Skorupka, 2013b)

War./Kryt.	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
W1	4,4	0,0	10,0	7,9	0,0	7,5	0,0
W2	0,0	15,0	6,7	0,7	14,7	20,0	0,0
W3	4,2	0,0	3,3	6,4	4,2	0,0	10,0
W4	1,5	0,0	0,0	0,0	0,5	15,0	10,0
W5	15,0	15,0	0,0	5,0	14,7	0,0	10,0
W6	21,6	15,0	6,7	10,0	20,0	12,5	10,0

Tabela 10.17. Oceny łączne uzyskane w wyniku obliczeń (Duchaczek &amp; Skorupka, 2013b)

Wariant	Ocena łączna	
	oryginalna – $o_i$	zmodyfikowana, równa konsekwencji – $c_i$
W1	29,78	0,100
W2	57,12	0,192
W3	28,15	0,095
W4	27,00	0,091
W5	59,74	0,201
W6	95,81	0,322

Biorąc pod uwagę fakt, iż założono, że konsekwencja  $c_i$  uszkodzenia poszczególnych mostów jest wielkością z przedziału  $\langle 0; 1 \rangle$ , należało zatem otrzymane wartości oceny łącznej  $o_i$  (przedstawione w drugiej kolumnie tabeli 10.17) w odpowiedni sposób zmodyfikować. Określenia wartości konsekwencji  $c_i$  dla poszczególnych mostów dokonano stosując wyrażenie (Duchaczek & Skorupka, 2013b):

$$c_i = \frac{o_i}{O_w} \quad (10.14)$$

gdzie  $O_w$  to suma wszystkich ocen łącznych  $o_i$ , obliczana jako:

$$O_w = \sum_{i=1}^n o_i \quad (10.15)$$

Analizując dane zaprezentowane w tabeli 10.17, stwierdzono, że po przeprowadzonych obliczeniach Most Milenijny (W6) ma oczywiście nadal największą wartość konsekwencji, a mianowicie  $C_6 = 0,322$ . Oznacza to, że przy założonych warunkach brzegowych uszkodzenie tego mostu powodowałoby największe konsekwencje dla mieszkańców analizowanego obszaru kraju (Duchaczek & Skorupka, 2013b).

Aby dokonać obliczenia ryzyka uszkodzenia wybranych obiektów mostowych wykorzystano dane zaprezentowane w tabeli 10.10, dotyczące oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia tych obiektów. W kolumnie 3 tabeli 10.18 przedstawiono wyniki uzyskane w czasie obliczeń prawdopodobieństwa uszkodzenia mostu przy wykorzystaniu metody AHP. W tabeli tej przedstawiono również wyniki obliczeń ryzyka uszkodzenia wybranych obiektów mostowych (kolumna 5) realizowanych według zależności (10.2–10.3).

Tabela 10.18. Wyniki obliczeń oceny ryzyka uszkodzenia wybranych obiektów mostowych (Duchaczek &amp; Skorupka, 2013b)

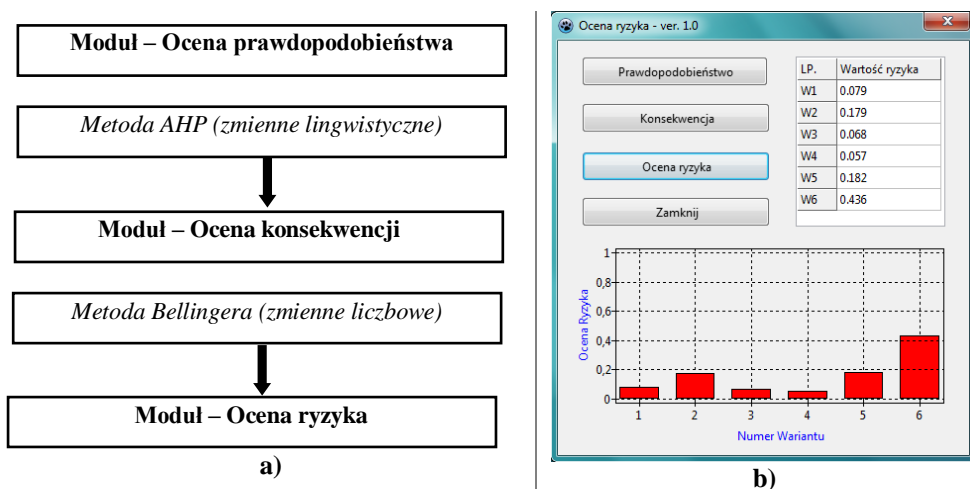
Wariant (most)	Konsekwencja $C_i$	Prawdopodobieństwo $P_i$	Iloczyn $C_i \times P_i$	Ryzyko uszkodzenia obiektu mostowego R
W1	0,1001	0,1476	0,0148	0,0786
W2	0,1919	0,1751	0,0336	0,1789
W3	0,0947	0,1349	0,0128	0,0679
W4	0,0907	0,1177	0,0107	0,0568
W5	0,2007	0,1704	0,0342	0,1820
W6	0,3219	0,2543	0,0819	0,4357
Suma	1,00	1,00	0,18789	1,00

Analizując wyniki zaprezentowane w tabeli 10.18 stwierdzono, że największym ryzykiem uszkodzenia obciążony jest obiekt szósty (W6), tj. Most Milenijny. Przeprowadzone analizy wykazały, że obiekt ten jest ponad dwu i pół krotnie bardziej narażony na ataki z użyciem materiału wybuchowego niż obiekt W2 i W5, natomiast ryzyko uszkodzenia pozostałych obiektów (W1, W3 i W4) jest już nawet kilkukrotnie niższe (Duchaczek & Skorupka, 2013b).

## 10.5. Aplikacja komputerowa do oceny ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych

Zazwyczaj wykonywanie obliczeń przy wykorzystaniu metod optymalizacji wielokryterialnej jest dość pracochłonne. Z tego względu opracowano aplikację „Ocena ryzyka – ver. 1.0”, której schemat blokowy przedstawiono na rys. 10.1a (Duchaczek & Skorupka, 2010).

Pracę z programem rozpoczyna się od okna dialogowego zaprezentowanego na rys. 10.1b. Następnie dokonuje się obliczeń oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia obiektów mostowych używając opcji *Prawdopodobieństwo*. Uruchamia ona moduł „Metoda AHP – ver. 1.0” (rys. 10.2a), w którego oknie dialogowym określa się preferencję poszczególnych kryteriów. Następnie tyle razy ile mamy wariantów rozwiązań (tzn. obiektów mostowych) pojawia się kolejne okno dialogowe umożliwiające ocenę danych obiektów mostowych w odniesieniu do konkretnego kryterium (rys. 10.2b). Przy czym zgodnie z założeniami metody AHP porównań dokonujemy tylko parami (Duchaczek & Skorupka, 2010).



Rys. 10.1. Aplikacja komputerowa do oceny ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych: a) schemat blokowy, b) początkowe okno dialogowe (Duchaczek & Skorupka, 2013c)

Po zakończeniu obliczeń wraca się do pierwszego okna dialogowego (rys. 10.1b), gdzie używając opcji *Konsekwencja* uruchamia się moduł „Metoda Bellingera – ver. 1.0” (rys. 10.3), który umożliwia ocenę konsekwencji uszkodzenia wybranych obiektów mostowych.



Aby zakończyć proces obliczeń uruchamiamy moduł „Ocena ryzyka – ver. 1.0” przy użyciu opcji *Ocena ryzyka*. Otrzymane wyniki obliczeń zastają zaprezentowane wówczas w formie tabelarycznej i graficznej (rys. 10.1b).

## 10.6. Podsumowanie

Zaletą metody zaprezentowanej przez autorów jest możliwość jednoczesnego porównania ryzyka uszkodzenia kilku obiektów pod względem tych samych kryteriów.

Metoda zaprezentowana przez Ray'a (2007) umożliwia szczegółową ocenę ryzyka uszkodzenia elementów konstrukcyjnych wybranego obiektu mostowego pod względem wybranych czynników. Jednak dla osób organizujących zabezpieczenie logistyczne wynikające z realizacji działań kryzysowych na danym obszarze kraju, jest ona mało praktyczna. Wynika to z faktu, że uzyskane oceny ryzyka dla kilku obiektów najprawdopodobniej nie będą uwzględniały tych samych kryteriów, ze względu na zróżnicowanie elementów nośnych poszczególnych mostów, a zatem porównywalność uzyskanych ocen ryzyka będzie niepełna.

Metoda oceny ryzyka uszkodzenia obiektu mostowego zaprezentowana przez Bourdon'a (2010) nawiązuje bezpośrednio do liczby ataków terrorystycznych zrealizowanych w założonym okresie rozliczeniowym, co z praktycznego punktu widzenia wydaje się bardzo uzasadnione i w przyszłości powinno być uwzględnione w prezentowanej przez autorów metodzie.

Celem przedstawionego w rozdziale przykładu było ukazanie możliwości zastosowania metod optymalizacji wielokryterialnej do rozwiązania przedmiotowego problemu. Obiektywność prowadzonych analiz uzależniona jest od ilości i „jakości” przyjętych kryteriów, co zależy już od wiedzy osoby prowadzącej analizę. Obiekty mostowe mają praktycznie niepowtarzalne konstrukcje przez co przyjęcie wszystkich kryteriów uwzględniających ten fakt jest praktycznie niewykonalne. Nie ulega również wątpliwości, że zbyt duża liczba kryteriów zdecydowanie utrudni prowadzenie przedmiotowych ocen i ograniczy ich prowadzenie tylko do wąskiej grupy ekspertów, do których dostęp szczególnie w mniejszych miejscowościach może być ograniczony.

Problematyka oceny ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych w aspekcie ataków z użyciem materiałów wybuchowych oparta na metodach optymalizacji wielokryterialnej, może zostać użyta również w obszarze szeroko rozumianej inżynierii przedsięwzięć budowlanych (Kaplinski & Janusz, 2006; Kasproicz, 2000; Połowski, 2006), jak i samej logistyki budowlanej (Sobotko & Czarnigowska, 2005).

## 10.7. Literatura

- [1] Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. 2007 nr 89 poz. 590).
- [2] Pyza, D. (2010). System transportowy i jego ukształtowanie w systemie logistycznym polski, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport*, 76, 113-129
- [3] Kogut, A. (2012, March 20). Infrastruktura transportowa [Web log message]. Retrieved from [http://mfiles.pl/pl/index.php/Infrastruktura\\_transportowa](http://mfiles.pl/pl/index.php/Infrastruktura_transportowa).

- [4] Grocki, R. (2012). *Zarządzanie kryzysowe. Dobre praktyki*. Warszawa, Wydawnictwo DIFIN S.A.
- [5] Kamyk, Z., Szelka, J. (2008). Wrażliwość obiektów mostowych na ataki terrorystyczne. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej*, 4, 83-93.
- [6] Ray, J. C., (2007). Risk-Based Prioritization of Terrorist Threat Mitigation Measures on Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 12(2), 140-146.
- [7] Recommendations for Bridge and Tunnel Security, Federal Highway Administration (FHWA). FHWA-IF-03-036, Sept. 2003.
- [8] Duchaczek, A., Skorupka, D. (2013a). Evaluation of probability of bridge damage as a result of terrorist attack. *Archives of Civil Engineering*, 2, 215-227
- [9] Duchaczek, A., Skorupka, D. (2013b). Ocena ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych*, 3, 99-109.
- [10] Duchaczek, A., Skorupka, D. (2013c). Zastosowanie metod optymalizacji wielokryterialnej przy ocenie ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych. *Budownictwo i Architektura*, 12, 31-38.
- [11] Skorupka, D. (2007). Metoda identyfikacji i oceny ryzyka realizacji przedsięwzięć budowlanych. Wojskowa Akademia Techniczna. Warszawa.
- [12] Regan, Sean T., (2003). Risk Management Implementation and Analysis, 2003 AACE International Transaction, (CSC.10.1– CSC.10.7), The Association for the Advancement of Cost Engineering, USA, Orlando.
- [13] Willet, A.H. (1951). *The Economic Theory of Risk Insurance*. Philadelphia, University of Pensylwania Press.
- [14] Knight, F. H. (1921). *Risk, Uncertainty and profit*. Boston, University of Boston Press.
- [15] Pfeffer, J. (1956). *Insurances and Economic Theory*. Illinois, Irvin Inc., Homewood.
- [16] Sienkiewicz, P. (1994). *Analiza systemowa (Podstawy zastosowania)*. Warszawa, Wydawnictwo Bellona.
- [17] Kasprowicz, T. (2002). *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych*. Warszawa. Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu.
- [18] Książek, M. (2011). Analiza porównawcza wybranych metod wielokryterialnych oceny przedsięwzięć inwestycyjnych. *Budownictwo i inżynieria środowiska*, 2, 555-561.
- [19] Ginda, G. (2007, April 8). *Prognozowanie na podstawie analizy wieloatrybutowej. Prognozowanie i symulacje. Ćwiczenie laboratoryjne nr 6. Politechnika Opolska*. Retrieved from [http://www.bopis.po.opole.pl/pis06\\_win.pdf](http://www.bopis.po.opole.pl/pis06_win.pdf)
- [20] Kastelik-Ginda, K. (2012, April 6). *Wykorzystanie metody AHP do ustalenia końcoworocznej klasyfikacji ucznia w klasie maturalnej*. Retrieved from [www.kkastelik.scholaris.pl](http://www.kkastelik.scholaris.pl)
- [21] Teknomo, K. (2012, April 6). *Analytic Hierarchy Process. Kardi Teknomo's Homepage*. Retrieved from <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/AHP.htm>

- [22] Saaty, T. L. (1991). Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process. *Behaviormetrika*, 29, 1-9.
- [23] Saaty, T.L., Vargas, L. (2001). *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Boston, Kluwer Academic Publishing.
- [24] Ostreęga, A. (2004). *Sposoby zagospodarowania wyrobisk i terenów po eksploatacji złóż surowców węglanowych na przykładzie Krzemionek Podgórskich w Krakowie*. Rozprawa doktorska. Kraków, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej.
- [25] Przybyło, W., Kręzolek, S. (2003). Zastosowania ahp w budownictwie. VI Konferencja Naukowo-Techniczna. Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa. Olsztyn-Kortowo, 161-170.
- [26] Skorupka, D., Duchaczek, A., Szleszyński, A. (2012). Optymalizacja doboru środków transportowych w logistyce magazynowej materiałów budowlanych, *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych*, 4, 137-145.
- [27] Wolny, M. (2007). *Wspomaganie decyzji kierowniczych w przedsiębiorstwie przemysłowym. Wieloatrybutowe wspomaganie organizacji przestrzennej komórek produkcyjnych z zastosowaniem teorii gier*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [28] Górny, P. (2004). *Elementy analizy decyzyjnej*. Warszawa, Akademia Obrony Narodowej.
- [29] *Prace minerskie i niszczenia* (1995). Warszawa, Sztab Generalny WP, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych.
- [30] Mosty we Wrocławiu (2012, April 6). Retrieved from: [http://pl.wikipedia.org/wiki/Kategoria:Mosty\\_we\\_Wroc%C5%82awiu](http://pl.wikipedia.org/wiki/Kategoria:Mosty_we_Wroc%C5%82awiu).
- [31] Ray J.C., *Risk Based Mitigation Prioritization*. US Army Engineer Research and Development Center (ERDC). Vicksburg, MS. Prezentacja multimedialna.
- [32] Bourdon, S., *Assessing and Conveying Risk in a Capability-Based Framework*. Prezentacja multimedialna z dnia 4 października 2010.
- [33] Kapliński, O., Janusz, L. (2006). Three phases of multifactor modelling of construction processes, *Journal of Civil Engineering and Management*, 12(2), 127-134
- [34] Kasprowicz, T. (2000). Cost-time scheduling of construction works execution, *J. Infrastructure Planning and Management*, 660(IV-49).
- [35] Połośki, M. (2006). The analysis of the reliability of realization cost and investments, time-limits in Warsaw. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities Topic Civil Engineering*, 9(4), #10.
- [36] Sobotka, A., Czarnigowska, A. (2005). Analysis of supply system models for planning construction project logistics. *Journal of Civil Engineering and Management*, 11(1), 73-82.

### **Damage risk assessment method of bridge objects in conditions of crisis**

One element of a transport system is its infrastructure, which is made up of roads and bridge facilities. The bridge facilities include bridges, viaducts, flyovers and culverts. The

destruction of either of them can cause substantial disruptions to transport and logistics. The reduction of the potential effects of such disruptions or their elimination can be ensured by risk identification and assessment. The Act of 26 April 2007 on Crisis Management includes the notion of risk map, defined as a map or a description showing potential negative effects of the impact of risk on people, the environment, property and infrastructure. It can be assumed that the development of the quantitative method of assessing the risk of damage to bridge facilities will be of utilitarian nature, as its result will constitute a valuable piece of information featured on such maps.

The authors suggest that the risk  $R_i$  of a terrorist attack on an  $i$ -th bridge facility in the specified area of the country should be defined as the product of the probability  $p_i$  of the occurrence of that event and the consequences  $c_i$  resulting from its destruction divided by the sum of those products for all the  $n$  analysed bridges. Assuming at the same time that the value of the probability  $p_i$ , the consequence  $c_i$ , and the risk itself  $R_i$  is a number from the set  $\langle 0;1 \rangle$ .

For the assessment of the probability of the risk of damage to bridge facilities the Analytic Hierarchy Process (AHP) was used, a method developed and elaborated by T. L. Saaty. Determining the probability of damage to a bridge facility, it was assumed that it was the value determining our expectations with regard to the possible occurrence of a given event, in this case an act of terror.

Analysing the possibility of a terrorist attack on bridge facilities, it was concluded that the criteria for evaluating the probability of damage to such facilities mainly include the location of the facility and the possibility of destroying (damaging) its load-bearing structure. Ultimately, six such criteria were adopted for calculations.

For the assessment of the consequences of damage to bridge facilities the Bellinger's method was employed, a method which derives its name from the surname of its creator B. Bellinger. It is one of the multiple criteria analysis methods which organises facilities on the basis of the value of the cumulative assessment determined from the set of the adopted partial criteria. At this stage of study the authors suggested the adoption of seven criteria for evaluating the consequences of damage to bridge facilities. Assuming that the consequence  $c_i$  of damage to individual bridges is a value from the set  $\langle 0; 1 \rangle$ , it was necessary to properly recalculate the obtained values of the cumulative assessment  $o_i$ .

Analysing the presented results, it was concluded that the highest risk of damage is posed to Facility 6 (W6), i.e. the Milenijny Bridge. Obviously, such conclusions can also be drawn intuitively; however, with the use of selected multi criteria optimisation methods specific numerical values are obtained, which can then be used for further analyses conducted on a larger scale.

The example presented in the article was supposed to show the possible employment of multiple criteria optimisation methods to solving the problem under discussion. The use of the AHP method to evaluate the probability of a terrorist attack and the Bellinger's method to assess the consequences of damage to bridge facilities certainly does not exclude highly subjective experts' assessments, yet it does make it easier for them to formulate such an assessment.