

SORDYL Justyna¹
BRZOZOWSKI Krzysztof²

Zastosowanie metody AHP do oceny poszczególnych etapów transportu materiałów niebezpiecznych

*hierarchiczny proces analizy decyzyjnej
etapy transportu
poziom ryzyka*

Streszczenie

Ryzyko transportu materiałów niebezpiecznych uwzględniające poszczególne etapy procesu transportowego może być analizowane ze względu na szereg kryteriów, z czego za istotne kryteria można uznać: potencjalny zakres negatywnego oddziaływania na środowisko, ewentualne szkody w infrastrukturze technicznej transportu oraz potencjalny wpływ na zdrowie i bezpieczeństwo publiczne. W pracy do oceny poszczególnych etapów procesu transportowego w odniesieniu do ryzyka związanego z transportem materiałów niebezpiecznych zaproponowano wykorzystanie metody analitycznego procesu hierarchicznego (AHP). Przedstawiona analiza dotyczy transportu ładunku będącego związkami chemicznymi z grupy chloranów. Proces transportowy podzielono przy tym na pięć zunifikowanych dyskretnych etapów, które oceniano w odniesieniu do przyjętych kryteriów klasyfikacji ryzyka.

AN APPLICATION OF THE AHP METHOD TO EVALUATION OF STAGES OF THE TRANSPORT PROCESS OF HAZARDOUS MATERIALS

Abstract

A risk associated with the particular stages of the transport process of hazardous materials can be analyzed and classified due to a number of criteria. As the essential criteria for the classification one can consider the potential environmental impact, possible damages in the transport infrastructure and the potential impact on public health and safety. In paper an analytic hierarchy process method (AHP) is used in order to evaluate a stages of the hazardous materials transport in terms of the risk. The analysis presented was conducted for transport of chemical species which belong to the chlorates. The transport process was divided in five unified discrete stages, which were ranked on the base of the risk in relation to accepted criteria of classification.

1. WSTĘP

Transport ładunków specjalnych, w tym niebezpiecznych jest podejmowany obecnie powszechnie. Za materiały niebezpieczne uważa się przy tym wszystkie substancje, które ze względu na swoje właściwości chemiczne, fizyczne i biologiczne stwarzają zagrożenie dla ludzi lub środowiska. W związku z możliwymi skutkami uszkodzenia ładunku wprowadzono odpowiednie przepisy określające sposób przewozu materiałów niebezpiecznych i ich przechowywania. Przyczyny losowe, zaniedbania pracowników oraz innego rodzaju nieprawidłowości zaistniałe podczas procesu transportu materiałów niebezpiecznych mogą doprowadzić do uszkodzenia ładunku i mieć poważne skutki dla środowiska i zdrowia ludzi. Usuwanie skutków wypadków z udziałem materiałów niebezpiecznych jest kosztochłonne, wymagające zaangażowania specjalistycznych służb takich jak jednostki ratownictwa chemicznego, nie bez znaczenia są również koszty naprawy uszkodzonej infrastruktury.

Analiza procesów transportu materiałów niebezpiecznych wykonana w ramach pracy dyplomowej [6] wskazuje na zróżnicowany poziom ryzyka związany z zaistnieniem potencjalnych nieprawidłowości na każdym z etapów procesu transportowego. Ten sam etap może się przy tym cechować innym poziomem ryzyka w ramach poszczególnych gałęzi transportu. Dla takich uwarunkowań, uszeregowanie etapów procesu transportowego ze względu na poziom ryzyka przeprowadzić można przy użyciu jednej z metod analizy wielokryterialnej, wykorzystywanych powszechnie do rozwiązywania problemów transportowych [7]. W niniejszej pracy do analizy istotności poszczególnych etapów transportu materiałów niebezpiecznych w odniesieniu do poziomu ryzyka zaproponowano wykorzystanie metody analitycznego procesu hierarchicznego (AHP) [5].

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU W NOTACJI METODY AHP

Ryzyko związane z procesem transportu materiałów niebezpiecznych może być analizowane w odniesieniu do szeregu kryteriów, z czego za najważniejsze można uznać potencjalne szkody w wyniku zaistnienia zdarzenia związanego

¹ Akademia Techniczno- Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Informatyki, Katedra Transportu i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2.
Tel: + 48 33 827-92-85, E-mail: jsordyl@ath.eu

² Akademia Techniczno- Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Informatyki, Katedra Transportu i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2.
Tel: + 48 33 827-92-85, E-mail: kbrzozowski@ath.eu

z uszkodzeniem lub całkowitym zniszczeniem transportowanego ładunku. W tym kontekście, w ramach pracy, za istotne kryteria szeregowania etapów procesu transportowego uznano ocenę ryzyka związanego z potencjalnym:

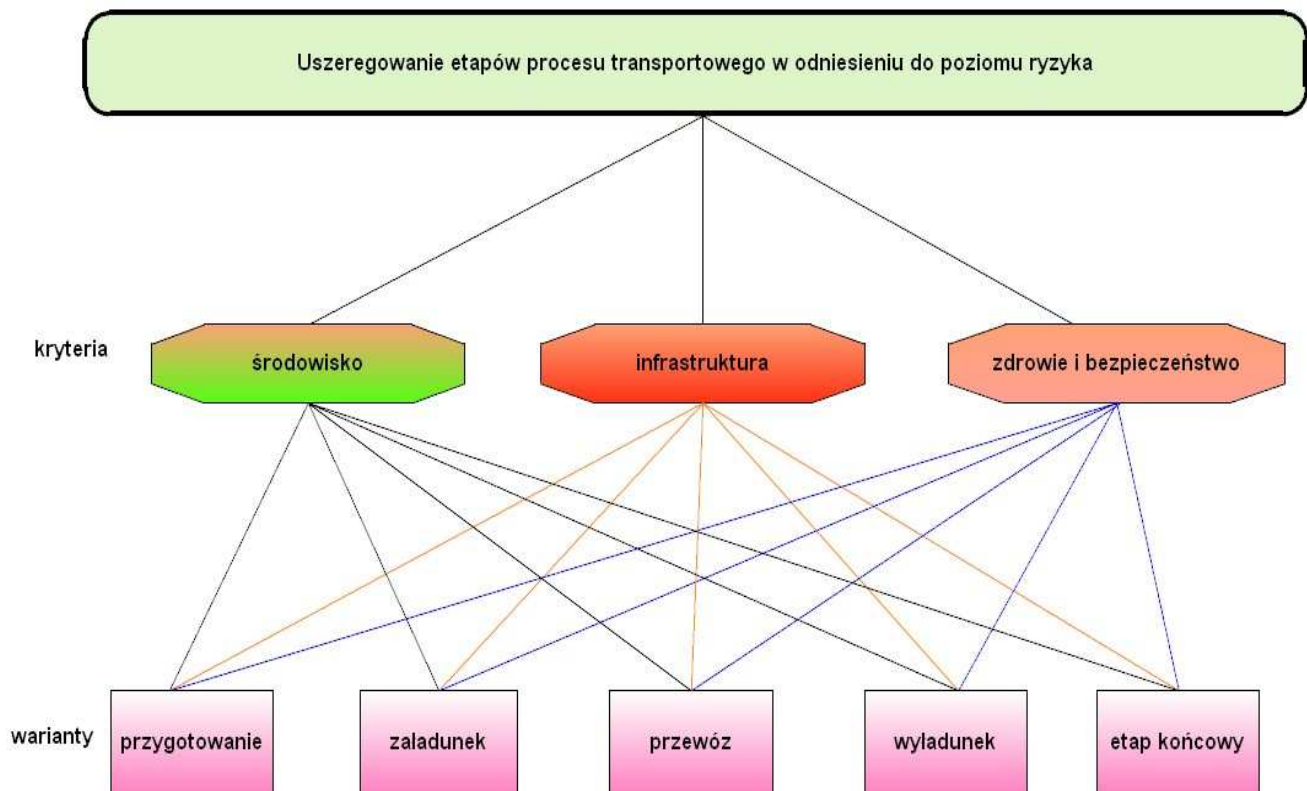
- negatywnym oddziaływaniem na środowisko,
- zakresem szkody w infrastrukturze transportowej,
- wpływem na zdrowie i bezpieczeństwo publiczne.

Metoda analitycznego procesu hierarchicznego umożliwi dekompozycję problemu szeregowania poszczególnych etapów procesu transportowego ze względu na analizowane kryteria oceny ryzyka. Tworzenie finalnego uporządkowania etapów wymaga jednak zdefiniowania poziomu istotności (wagi) każdego z rozpatrywanych kryteriów. Zaletą wykorzystania tej metody jest przede wszystkim możliwość uwzględnienia w procesie analizy zarówno czynników ilościowych jak i jakościowych oraz bezpośrednie odwzorowanie istotności przyjmowanych kryteriów oceny ryzyka.

Szeregowanie poszczególnych etapów transportu materiałów niebezpiecznych ze względu na poziom ryzyka zostało przeprowadzone dla transportu lądowego, w tym zarówno samochodowego jak i kolejowego oraz transportu morskiego. Proces transportowy podzielono przy tym na pięć zunifikowanych dyskretnych etapów:

- 1) Etap wstępny- przygotowanie, obejmujący takie czynności jak: opakowanie, oznakowanie towarów niebezpiecznych (ewentualna odprawa) oraz przygotowanie i kontrolę środka transportowego.
- 2) Załadunek, w tym załadunek środka transportu, działania zabezpieczające ładunek oraz kontrola i podpisanie dokumentacji przewozowej.
- 3) Przewóz, obejmujący również kontrolę środka transportu i ładunku.
- 4) Wyladunek, w tym: rozładunek, kontrola towaru oraz kontrola dokumentacji.
- 5) Etap końcowy obejmujący oczyszczenie i odkażenie środka transportu/ kontenera oraz usunięcie oznakowania środka transportu/ kontenera.

Ponieważ sumaryczne ryzyko związane z poszczególnymi etapami należy przeanalizować osobno dla każdej z trzech rozważanych gałęzi transportu, zaproponowana metodyka postępowania z wykorzystaniem metody AHP prowadzi do sformułowania trzech rozłącznych struktur hierarchicznych o pięciu wariantach i trzech kryteriach. Ogólna postać struktury hierarchicznej reprezentującej rozważne w pracy zagadnienie ma postać jak na rys. 1.



Rys. 1. Schemat dekompozycji zadania szeregowania etapów procesu transportowego w odniesieniu do kryteriów oceny ryzyka związanej z transportem materiałów niebezpiecznych

Przedstawiony na rys. 1 sposób dekompozycji rozważanego w pracy problemu oznacza, że w przedstawionej hierarchii poziom podstawowy stanowią zunifikowane etapy procesu transportowego. Poszczególne etapy są analizowane ze względu na poziom ryzyka w odniesieniu do każdego z elementów poziomu wyższego z osobna. Elementy poziomu wyższego odpowiadają przyjętym kryteriom szeregowania etapów. Ostateczne uszeregowanie etapów procesu transportowego ze względu na ryzyko związane z transportem materiałów niebezpiecznych jest wyznaczane po przyjęciu poziomu istotności rozważanych kryteriów oceny ryzyka.

3. WYZNACZENIE MACIERZY OCEN WZGLĘDNYCH

Ze względu na powiązanie poziomu ryzyka z właściwościami ładunku, zarówno ocenę jak i szeregowanie poszczególnych etapów transportu w odniesieniu do poziomu ryzyka trudno uogólnić przeprowadzając analizę dla ładunku abstrakcyjnego. Wobec powyższego w pracy założono, że transportowanym ładunkiem są związki chemiczne zaliczane do grupy chloranów. Chlorany są substancjami stałymi o własnościach silnie utleniających, rozpuszczalnymi w wodzie, często trującymi. Zalicza się je do klasy materiałów silnie utleniających (nr 5.1 w klasyfikacji towarów niebezpiecznych ADR). Przewożone są w opakowaniach szklanych lub bębnach (czasem ładowanych do kontenerów) [1,4].

Szeregowanie etapów transportu chloranów ze względu na poziom ryzyka przy zastosowaniu metody AHP wymaga określenia macierzy względnych ocen istotności każdego z rozważanych etapów. Oceny te powstają poprzez bezpośrednie porównywanie parami wszystkich etapów procesu transportowego w odniesieniu do każdego z przyjętych kryteriów oceny ryzyka stanowiących elementy wyższego poziomu przyjętej hierarchii. Do kwantyfikacji ocen względnych zastosowano skalę Saaty'ego, co w odniesieniu do istniejących relacji pomiędzy poziomem ryzyka związanego z każdym z etapów procesu transportowego, w kontekście rozpatrywanego kryterium, prowadzi do wyróżnienia pięciu podstawowych sytuacji:

- równoważności w przypadku, gdy poziom ryzyka związanego z obu porównywanymi etapami jest identyczny,
- słabej preferencji istniejącej w przypadku, gdy poziom ryzyka związany z jednym z etapów jest tylko nieznacznie większy niż drugiego,
- istotnej preferencji istniejącej w przypadku gdy poziom ryzyka związany z jednym z etapów jest zauważalnie większy niż drugiego,
- wyraźnej preferencji istniejącej w przypadku, gdy poziom ryzyka związany z jednym z etapów jest kilkukrotnie większy niż drugiego,
- bezwzględnej preferencji istniejącej w przypadku, gdy poziom ryzyka związany z jednym z etapów jest wielokrotnie większy niż drugiego.

Każdemu z pięciu wymienionych stanów przypisywana jest odpowiednia wartość liczbową. Jeżeli oznaczyć parę etapów procesu, dla których prowadzi się porównanie jako $\{e_1, e_2\}$, to do kwantyfikacji poszczególnych stanów relacji przyjmuje się wartości liczbowe jak w tabeli 1.

Tab. 1. Wartości liczbowe odpowiadające danej sytuacji dla podstawowej skali Saaty'ego

Stan	równoważności	słabej preferencji	istotnej preferencji	wyraźnej preferencji	bezwzględnej preferencji
wartość relacji $\frac{e_1}{e_2}$	1	3	5	7	9

Na podstawie porównań parami etapów procesu transportowego formułowane są odpowiednie macierze ocen względnych, w sposób przedstawiony w kolejnym rozdziale. Do kwantyfikacji ocen wykorzystywane mogą być przy tym również wartości pośrednie w stosunku do podstawowej skali przedstawionej w tabeli 1.

3.1 Macierze ocen względnych dla kryterium środowiskowego

W pierwszej kolejności rozważono poszczególne etapy procesu transportowego w odniesieniu do kryterium związanego z potencjalnym negatywnym oddziaływaniem na środowisko. Rozpatrując transport samochodowy, za etap najistotniejszy w kontekście ryzyka związanego z powstaniem negatywnego oddziaływania na środowiskowo uznano etap związany z przewozem ładunku. Za mniej istotne uznano etapy załadunku i wyładunku, przy czym etap załadunku został oceniony jako istotniejszy, ze względu na dodatkowe czynności w postaci działań zabezpieczających ładunek w pojeździe oraz kontrolę dokumentacji. Poprawność dokumentacji znacznie przyspiesza i usprawnia ewentualne działania Jednostek Ratownictwa Chemicznego. Etap przygotowania oraz etap końcowy wobec kryterium środowiskowego potraktowano niemal równorzędnie ze wskazaniem na nieznacznie większe znaczenie etapu przygotowania. Do etapu przygotowania należy bowiem oznakowanie towaru oraz przygotowanie i kontrola środka transportowego, a nieprawidłowości na tym etapie są bardziej brzemienne w skutkach niż nieprawidłowości na etapie końcowym. Ustaloną na tej podstawie macierz ocen przedstawiono w postaci tabeli 2.

Tab. 2. Macierz ocen względnych dla transportu drogowego w odniesieniu do kryterium środowiskowego

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	1/6	1/9	1/5	4
Załadunek	6	1	1/4	2	6
Przewóz	9	4	1	5	9
Wyładunek	5	0	1/5	1	5
Etap końcowy	1/4	1/6	1/9	1/5	1

Oceniając teraz ryzyko powiązane z poszczególnymi etapami procesu transportowego realizowanego z wykorzystaniem kolei, w odniesieniu do kryterium środowiskowego, za etap najistotniejszy uznano etap przygotowania

obejmujący m.in. przygotowanie i kontrolę środka transportowego. Zły stan techniczny taboru, czy inne niedopatrzenia na tym etapie zwiększają ogólne ryzyko związane z procesem transportu materiałów niebezpiecznych. Bardzo istotny jest również załadunek, w skład którego wchodzi także zapewnienie bezpieczeństwa ładunków na wagonie i zestawienie składu. Z kolei etap przewozu jest jednym z bezpieczniejszych etapów w transporcie kolejowym ze względu na sposób organizacji ruchu kolejowego i stosunkowo niewielką liczbę punktów kolizyjnych, co w konsekwencji przekłada się na niewielkie ryzyko uszkodzenia ładunku. Etap końcowy uznano za najbezpieczniejszy w transporcie kolejowym. Ustaloną dla transportu kolejowego macierz ocen przedstawiono w postaci tabeli 3.

Tab. 3. Macierz ocen względnych dla transportu kolejowego w odniesieniu do kryterium środowiskowego

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	2	5	3	6
Załadunek	1/2	1	4	2	5
Przewóz	1/5	1/4	1	1/3	2
Wyładunek	1/3	1/2	3	1	4
Etap końcowy	1/6	1/5	1/2	1/4	1

Ocena ryzyka w odniesieniu do poszczególnych etapów dla transportu morskiego ze względu na kryterium środowiskowe pozwoliła na sformułowanie macierzy ocen przedstawionej w postaci tabeli 4.

Tab. 4. Macierz ocen względnych dla transportu morskiego w odniesieniu do kryterium środowiskowego

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	3	1/4	4	5
Załadunek	1/3	1	1/6	2	3
Przewóz	4	6	1	7	8
Wyładunek	1/4	1/2	1/7	1	2
Etap końcowy	1/5	1/3	1/8	1/2	1

W przypadku transportu morskiego uznano, że podobnie jak dla transportu samochodowego, najistotniejszy jest etap przewozu. Etap ten obejmuje zarówno drogę z portu nadania do portu przeznaczenia, a także obciążone większym ryzykiem kolizji przemieszczanie się statku w obrębie basenów i kanałów portowych jak i operacje odbicia i przybicia do nabrzeża. Po analizie pozostałych etapów, za drugi w kolejności etap pod względem istotności uznano etap przygotowania. Nieprawidłowości na tym etapie mogą skutkować zwiększeniem ogólnego poziomu ryzyka związanego z realizacją innych etapów procesu transportowego. Z kolei etap załadunku uznano za nieco istotniejszy niż etap wyładunku ze względu na konieczność działań zabezpieczających ładunek wykonywanych w ramach tego etapu. W odniesieniu do kryterium środowiskowego ocena bezpośredniego ryzyka związanego z tymi etapami, wskazuje, że nieprawidłowości zachodzące podczas tych dwóch etapów z reguły nie przyjmują dużej skali, ponieważ dotyczą przemieszczania pojedynczych kontenerów. Etap końcowy w transporcie morskim uznano za najmniej istotny ze względu na kryterium środowiskowe.

3.2 Macierze ocen względnych dla kryterium związanego z infrastrukturą

Dalsze postępowanie w celu szeregowania etapów wymaga przeprowadzenia porównania etapów procesu transportowego w odniesieniu do kryterium potencjalnych szkód w infrastrukturze. Rozpatrując transport samochodowy za etap najistotniejszy w odniesieniu do ryzyka powstania szkód w infrastrukturze uznano etap przewozu. Duże ryzyko związane z tym etapem jest pochodną znacznego prawdopodobieństwa zaistnienia wypadku, który może powodować powstanie szkody w infrastrukturze. Istotnie wysokie ryzyko spowodowania szkód w infrastrukturze punktowej związane jest również z etapami załadunku i wyładunku. Niemniej jednak etap załadunku uznano za nieco istotniejszy, ze względu na konieczne czynności mające wpływ na dalsze etapy transportu, których zaniedbanie zwiększa ogólny poziom ryzyka. Następnym w kolejności ze względu na poziom ryzyka powstania szkód w infrastrukturze jest etap przygotowania ładunku, a za etap o najmniejszym poziomie ryzyka w odniesieniu do kryterium związanego z infrastrukturą uznano etap końcowy. Macierz ocen ustaloną dla transportu samochodowego przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Macierz ocen względnych dla transportu drogowego w odniesieniu do kryterium związanego z infrastrukturą

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	1/5	1/9	1/4	4
Załadunek	5	1	1/5	2	6
Przewóz	9	5	1	6	9
Wyładunek	4	1/2	1/6	1	5
Etap końcowy	1/4	1/6	1/9	1/5	1

Rozważając istotność poszczególnych etapów transportu kolejowego w odniesieniu do ryzyka zaistnienia szkody w infrastrukturze, za najistotniejsze etapy uznano załadunek i wyładunek. Nieprawidłowości zaistniałe na etapie załadunku mogą doprowadzić do uszkodzenia infrastruktury punktowej ładowni a ponadto inne czynności wchodzące w skład tego

etapu są istotne ze względu na podwyższenie ryzyka związanego z kolejnymi etapami transportu. Za nieco mniej istotny od załadunku ze względu na ryzyko szkód w infrastrukturze uznano etap wyładunku. Istotnym etapem jest również etap przewozu, ponieważ wystąpienie zdarzenia w obszarze punktów eksploatacyjnych sieci kolejowej może doprowadzić do szkód nie ograniczających się wyłącznie do torowiska. Uznano, że najmniej istotnymi w odniesieniu do ryzyka związanego z rozpatrywanym kryterium są etapy: przygotowania i końcowy. Macierz priorytetów lokalnych dla transportu kolejowego przedstawiono w postaci tabeli 6.

Tab. 6. Macierz ocen względnych dla transportu kolejowego w odniesieniu do kryterium związanego z infrastrukturą

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	1/6	1/3	1/5	2
Załadunek	6	1	4	2	7
Przewóz	3	1/4	1	1/3	4
Wyładunek	5	1/2	3	1	6
Etap końcowy	1/2	1/7	1/4	1/6	1

Rozpatrując transport morski, za etapy najistotniejsze a więc związane z największym ryzykiem uszkodzenia infrastruktury uznano etapy załadunku i wyładunku. Przy tym nieco większy poziom istotności przypisano do etapu załadunku, w związku z koniecznością mocowania ładunku. Jako istotne uznano również ryzyko występujące podczas etapu przewozu, ze względu na ruch w obszarze akwatorium oraz operacje odbicia i przybicia do nabrzeża. Za najmniej istotne, a zatem jednocześnie za najbezpieczniejsze etapy w transporcie morskim w odniesieniu do ryzyka uszkodzenia infrastruktury przyjęto etap przygotowania oraz etap końcowy, przy czym uznano, że odpowiednie przygotowanie środka transportu jest bardziej istotne w kontekście ryzyka niż czynności wchodzące w skład etapu końcowego. Ustaloną dla transportu morskiego macierz ocen przedstawiono w tabeli 7.

Tab. 7. Macierz ocen względnych dla transportu morskiego w odniesieniu do kryterium związanego z infrastrukturą

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	1/6	1/2	1/5	2
Załadunek	6	1	5	2	7
Przewóz	2	1/5	1	1/4	3
Wyładunek	5	1/2	4	1	6
Etap końcowy	1/2	1/7	1/3	1/6	1

3.3 Macierze ocen względnych dla kryterium związanego z bezpieczeństwem publicznym i zdrowiem

Macierz ocen względnych etapów ustaloną dla transportu drogowego ze względu na ryzyko w odniesieniu do kryterium bezpieczeństwa publicznego i zdrowia przedstawiono w tabeli 8. Jak można zauważyć, za etap o największym znaczeniu uznano etap przewozu, co wynika wprost z intensywności ruchu drogowego, często w warunkach znacznego zatłoczenia, w przeważającej większości w pobliżu obszarów gęsto zaludnionych. Za istotne w ramach rozpatrywanego kryterium uznano również etap załadunku i wyładunku. Należy jednak zaznaczyć, że potencjalne bezpośrednie skutki wystąpienia nieprawidłowości podczas tych etapów są mniejsze niż podczas etapu przewozu, bo związane z uszkodzeniami pojedynczych sztuk (bębnów lub palet) produktu. Niemniej jednak w przypadku etapu załadunku, nieprawidłowości mogą podwyższać ogólne ryzyko kolejnych etapów transportu. Za istotny uznano również etap przygotowania, ze względu na obejmowanie takich czynności jak: kontrola środka transportowego oraz odpowiednie oznakowanie towaru. Brak oznakowania potencjalnie zwiększa ryzyko eskalacji negatywnych skutków w przypadku zaistnienia zdarzenia poprzez możliwe utrudnienie działań jednostek ratownictwa chemicznego. Etap końcowy związany m.in. z oczyszczeniem pojazdu został oceniony jako najmniej istotny w odniesieniu do rozpatrywanego kryterium.

Tab. 8. Macierz ocen względnych dla transportu drogowego w odniesieniu do kryterium bezpieczeństwa publicznego i zdrowia

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	1/7	1/9	1/6	3
Załadunek	7	1	1/4	2	7
Przewóz	9	4	1	5	9
Wyładunek	6	1/2	1/5	1	6
Etap końcowy	1/3	1/7	1/9	1/6	1

W przypadku transportu realizowanego z wykorzystaniem kolei za etap najistotniejszy w odniesieniu do kryterium bezpieczeństwa publicznego i zdrowia uznano etap przygotowania. Stan taboru zwiększa ogólne ryzyko transportu a niewłaściwe oznakowanie może utrudnić podjęcie skutecznej i sprawnej akcji ratowniczej. Za etapy istotne uznano również etapy załadunku i wyładunku, ze wskazaniem na nieco większe znaczenie etapu załadunku. Potencjalne bezpośrednie skutki wypadku związanego z tymi etapami procesu transportowego niosą ryzyko niebezpieczeństwa dla zdrowia i życia ludzi, jednak o ograniczonym zasięgu przestrzennym. Mniej istotnym etapem przewozu materiałów niebezpiecznych w odniesieniu do kryterium bezpieczeństwa i zdrowia jest etap przewozu, ze względu na rozdzielanie

ruchu towarowego i osobowego oraz dodatkowo uregulowania ruchu w zakresie takich przewozów [2]. Za najmniej istotny ze względu na kryterium bezpieczeństwa i zdrowia ludzi uznano etap końcowy. Sformułowaną dla transportu kolejowego macierz ocen przedstawiono w tabeli 9.

Tab. 9. Macierz ocen względnych dla transportu kolejowego w odniesieniu do kryterium bezpieczeństwa publicznego i zdrowia

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	2	5	3	7
Załadunek	1/2	1	4	2	6
Przewóz	1/5	1/4	1	1/3	3
Wyładunek	1/3	1/2	3	1	4
Etap końcowy	1/7	1/6	1/3	1/4	1

Analiza potencjalnego zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia ludzi w przypadku transportu morskiego wskazuje etap przewozu jako etap najbardziej istotny. W przypadku zaistnienia nieprawidłowości na tym etapie ryzyko w odniesieniu do zdrowia załogi jest znaczące. Z kolei istotność etapu załadunku oceniono jako nieznacznie większą niż etapu wyładunku. Etapy te niosą ryzyko wystąpienia bezpośrednich zdarzeń niebezpiecznych dla pracujących przy nich osób, jednak ze względu na możliwość skutecznej ewakuacji, istotność tych etapów należy ocenić niżej niż w przypadku etapu przewozu. Za stosunkowo mało istotne uznano etapy przygotowania oraz końcowy, ponieważ nie stwarzają one w zasadzie bezpośredniego zagrożenia dla życia ludzi. Wśród tych dwóch etapów za etap bardziej istotny uznano etap przygotowania. Ustaloną dla transportu morskiego macierz ocen przedstawia tabela 10.

Tab. 10. Macierz ocen względnych dla transportu morskiego w odniesieniu do kryterium bezpieczeństwa publicznego i zdrowia

Etapy	Przygotowanie	Załadunek	Przewóz	Wyładunek	Etap końcowy
Przygotowanie	1	1/5	1/6	1/4	2
Załadunek	5	1	1/4	2	5
Przewóz	6	4	1	4	7
Wyładunek	4	1/2	1/4	1	4
Etap końcowy	1/2	1/5	1/7	1/4	1

4. ANALIZA SPÓJNOŚCI UZYSKANYCH MACIERZY OCEN WZGLĘDNYCH

W kolejnym etapie postępowania wyznaczono wektory priorytetów lokalnych (wektory własne macierzy ocen względnych) i sprawdzono spójność ocen dla każdej z uzyskanych macierzy. Przyjmując, że $r_{ij}^{(k)}$ jest względną oceną i -tego etapu w porównaniu z etapem j ze względu na kryterium k , utworzone macierze ocen względnych $R^{(k)}$ dla $k = 1,2,3$ są macierzami kwadratowymi postaci:

$$R^{(k)} = \begin{bmatrix} \gamma_{11}^{(k)} & \dots & \gamma_{15}^{(k)} \\ \vdots & \gamma_{ij}^{(k)} & \vdots \\ \gamma_{51}^{(k)} & \dots & \gamma_{55}^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Każdy z elementów macierzy $R^{(k)}$ odpowiada wartości ilorazu bezwzględnych ocen danych etapów względem k -tego kryterium, tzn. element $r_{ij}^{(k)}$ można przedstawić w postaci:

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{w_i^{(k)}}{w_j^{(k)}}, \quad (2)$$

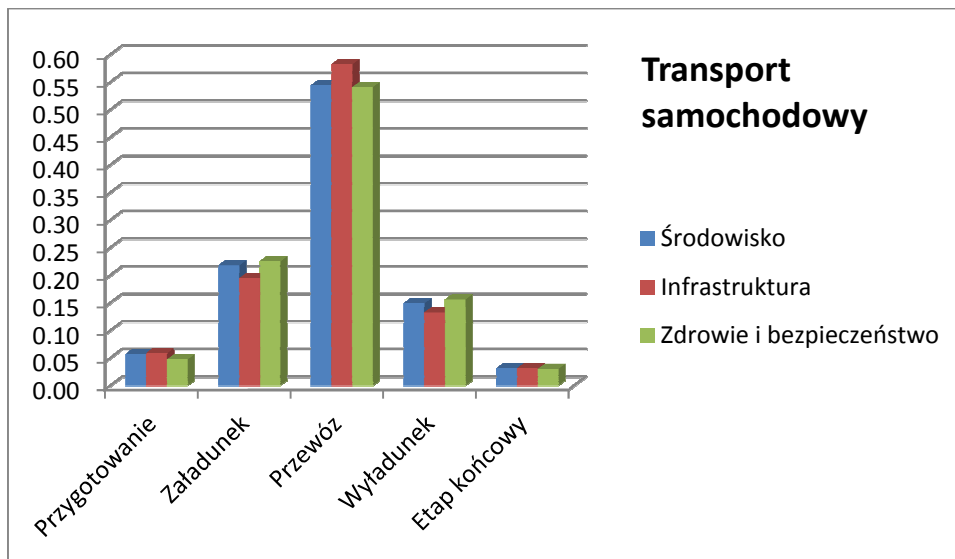
gdzie $w_i^{(k)}, w_j^{(k)}$ stanowią odpowiednio nieznaną bezwzględną ocenę etapów i oraz j względem kryterium k . Wyznaczanie wektora ocen bezwzględnych $W^{(k)}$ wymaga rozwiązania równania macierzowego postaci:

$$R^{(k)}W^{(k)} = \lambda W^{(k)}, \quad (3)$$

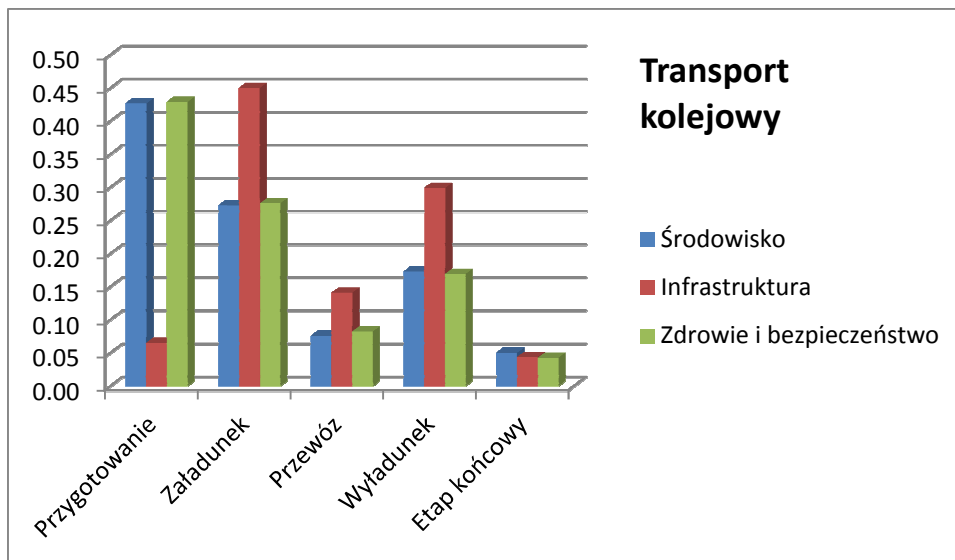
gdzie: $W^{(k)} = [w_1^{(k)}, \dots, w_5^{(k)}]^T$ oraz $\sum_i w_i^{(k)} = 1$.

Wyznaczone wektory priorytetów lokalnych $W^{(k)}$ pozwalają na uszeregowanie poszczególnych etapów procesu transportowego ze względu na istotność danego etapu w odniesieniu do pojedynczego kryterium. W pracy wektory priorytetów lokalnych wyznaczano metodą iteracyjną [3], przyjmując dopuszczalny błąd wyznaczenia wartości składowej wektora nie większy niż $\epsilon=10^{-4}$.

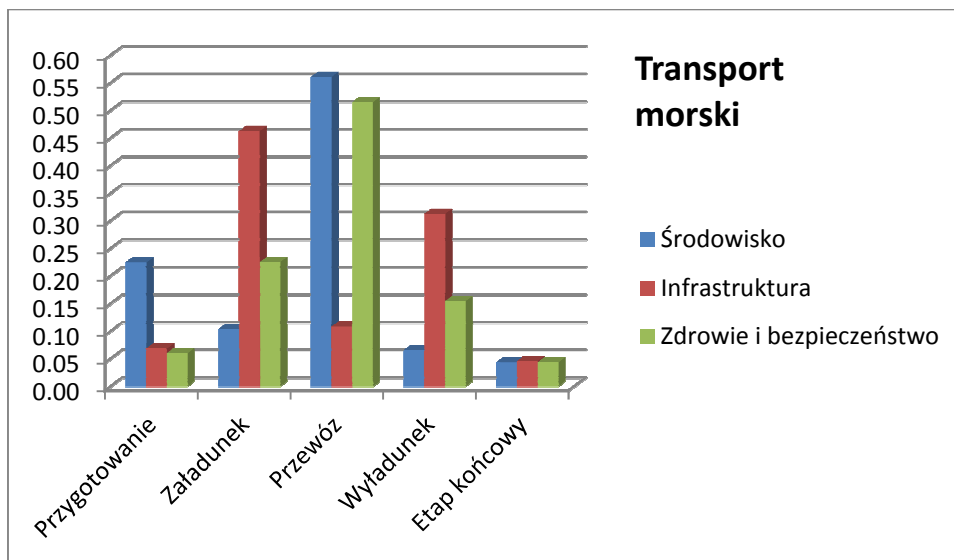
Na rys. 2 przedstawiono zbiorcze zestawienie wartości priorytetów wyznaczonych w odniesieniu do wszystkich trzech rozpatrywanych kryteriów dla poszczególnych etapów procesu transportowego, realizowanego z wykorzystaniem środków transportu samochodowego. Można zauważyć, że bez względu na kryterium, najbardziej istotnym etapem z punktu widzenia poziomu ryzyka związanego z transportem jest etap przewozu, ponadto uszeregowanie etapów ze względu na poziom ryzyka jest takie samo dla każdego z kryteriów. Na rys. 3 i rys. 4 przedstawiono z kolei odpowiednie zestawienie wartości priorytetów dla pozostałych rozpatrywanych gałęzi transportu, odpowiednio dla transportu kolejowego i transportu morskiego. Analiza wartości przedstawionych na wykresach pozwala na stwierdzenie, że zarówno w przypadku transportu kolejowego jak i transportu morskiego wyznaczone uszeregowanie etapów jest zależne od rozpatrywanego kryterium. Dla przykładu, w transporcie morskim, w odniesieniu do potencjalnych szkód w infrastrukturze jako najistotniejsze etapy za względu na ryzyko wyznaczono w kolejności etap załadunku i wyładunku, a w przypadku kryterium środowiskowego odpowiednio etap przewozu i przygotowania.



Rys. 2. Zestawienie wartości priorytetów lokalnych dla transportu samochodowego



Rys. 3. Zestawienie wartości priorytetów lokalnych dla transportu kolejowego



Rys. 4. Zestawienie wartości priorytetów lokalnych dla transportu morskiego

Z kolei sprawdzenie spójności polega na obliczeniu dla każdej macierzy ocen względnego indeksu spójności CR według zależności:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (4)$$

gdzie: RI – losowy indeks spójności (RI = 1,11 dla macierzy ocen 5x5),
CI – indeks spójności obliczany jako:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (5)$$

gdzie: λ_{\max} jest maksymalną wartością własną macierzy,
n – wymiar macierzy.

W tym celu po wyznaczeniu wektorów priorytetów lokalnych, dla każdej z macierzy ocen obliczono λ_{\max} a następnie współczynnik spójności. Uzyskane wartości współczynnika dla poszczególnych macierzy ocen względnych przedstawiono w tabeli 11.

Tab. 11. Zestawienie wartości względnego indeksu spójności CR dla macierzy ocen względnych sformułowanych dla poszczególnych gałęzi transportu w odniesieniu do danego kryterium

Kryterium \ Gałąź transportu	środowisko	infrastruktura	bezpieczeństwo publiczne i zdrowie
transport drogowy	0,100	0,097	0,092
transport kolejowy	0,022	0,031	0,029
transport morski	0,037	0,027	0,058

Analiza wartości względnego indeksu spójności uzyskanego dla każdej z dziewięciu macierzy ocen względnych pozwala łatwo zauważyć, że żadna z wartości nie przekracza 0,1 co oznacza, że wszystkie macierze ocen względnych spełniają kryterium formalne metody AHP [5]. Tym samym, wyznaczone priorytety lokalne wykorzystano do wyznaczenia końcowego uszeregowania etapów procesu transportowego.

5. USZEREGOWANIE KOŃCOWE ETAPÓW PROCESU TRANSPORTOWEGO

Kolejnym, przedostatnim etapem postępowania jest wyznaczenie macierzy ocen względnych w odniesieniu do istotności każdego z trzech rozpatrywanych w pracy kryteriów oceny ryzyka. Postępowanie polegające na ocenie parami powtarzane jest zatem na kolejnym poziomie przyjętej struktury hierarchicznej. Przyjmując istotną preferencję uwzględniania kryterium zdrowia i bezpieczeństwa publicznego w stosunku do kryterium związanego z infrastrukturą oraz wyraźną preferencję w stosunku do kryterium środowiska sformułowano macierz ocen względnych kryteriów przedstawioną w tabeli 12.

Tab. 12. Macierz ocen istotności kryteriów w procesie oceny ryzyka

Kryteria	Środowisko	Infrastruktura	Zdrowie i bezpieczeństwo
Środowisko	1	2	1/4
Infrastruktura	1/2	1	1/8
Zdrowie i bezpieczeństwo	4	8	1

Dla uzyskanej macierzy wyznaczono następnie wektor rozkładu priorytetów poszczególnych kryteriów:

$$\mathbf{K}_r = [k_{r1}, k_{r2}, k_{r3}]^T, \tag{6}$$

Wartości poszczególnych elementów wektora odzwierciedlają znormalizowaną istotność danego kryterium (stanowią więc wagi poszczególnych kryteriów). Obliczone na podstawie przyjętej macierzy ocen względnych wartości wektora rozkładu priorytetów \mathbf{K}_r dla poszczególnych kryteriów oceny ryzyka przedstawiono w tabeli 13.

Tab. 13. Wektor rozkładu priorytetów dla poszczególnych kryteriów \mathbf{K}_r

Kryterium	Wektor rozkładu priorytetów
Środowisko	0,182
Infrastruktura	0,091
Zdrowie i bezpieczeństwo	0,727

Końcowe uszeregowanie etapów procesu transportowego wymaga agregacji wyznaczonych ocen danego etapu w odniesieniu do poszczególnych kryteriów oceny ryzyka (wag priorytetów lokalnych) z uwzględnieniem istotności kryteriów (wag kryteriów). Otrzymane w wyniku procesu agregacji wartości stanowią elementy wektora priorytetów globalnych \mathbf{P} – wyznaczających końcowe uszeregowanie etapów procesu transportowego ze względu na ogólny poziom ryzyka związanego z transportem chloranów. Formalnie wektor priorytetów globalnych wyznacza się jako:

$$\begin{bmatrix} w_1^{(1)} & w_1^{(2)} & w_1^{(3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_5^{(1)} & w_5^{(2)} & w_5^{(3)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{r1} \\ k_{r2} \\ k_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_5 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

Priorytety globalne stanowiące elementy wektora \mathbf{P} wyznaczone poprzez zastosowanie metody AHP dla poszczególnych gałęzi transportu przedstawiono w tabeli 14.

Tab. 14. Priorytety globalne dla poszczególnych gałęzi transportu

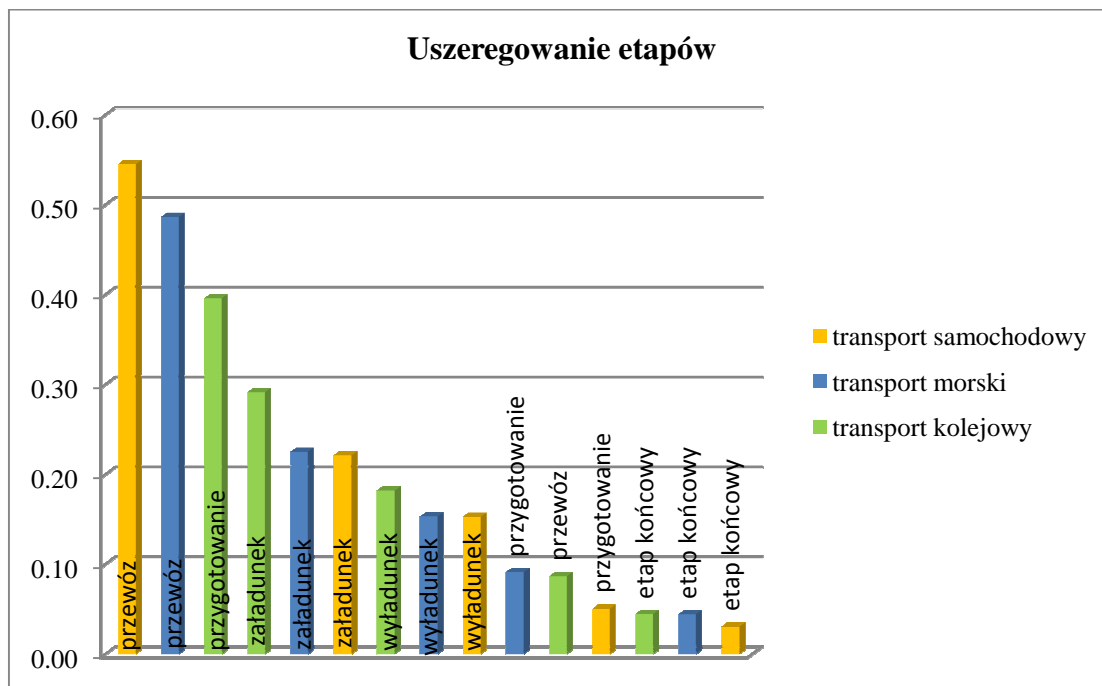
Gałąź transportu Etap	Transport		
	samochodowy	kolejowy	morski
Przygotowanie	0,05	0,40	0,09
Załadunek	0,22	0,29	0,23
Przewóz	0,55	0,09	0,49
Wyładunek	0,15	0,18	0,15
Etap końcowy	0,03	0,04	0,04

6. WNIOSKI

W wyniku zastosowania opisanego w pracy postępowania uszeregowano etapy procesu transportowego w odniesieniu do ogólnego ryzyka transportu materiałów niebezpiecznych jakimi są chlorany. Uszeregowanie to wskazuje na relacje istotności poszczególnych etapów w odniesieniu do ryzyka transportu tych materiałów wyznaczonego z uwzględnieniem trzech kryteriów: potencjalnego oddziaływania na środowisko, szkód w infrastrukturze oraz wpływu na bezpieczeństwo publiczne oraz zdrowie ludzi. Analiza poszczególnych kolumn tabeli 14 pozwala zauważyć, że uzyskana kolejność uszeregowania końcowego etapów dla transportu samochodowego jest taka sama jak kolejność etapów dla transportu morskiego. W obu przypadkach za etap najistotniejszy został wskazany etap przewozu, co równie istotne, w obu przypadkach z wagą ponad dwukrotnie większą niż następny w kolejności etap załadunku. Trzeci w kolejności etap wyładunku uzyskał identyczną wagę dla obu rodzajów transportu. Z kolei odmienne uszeregowanie uzyskano dla transportu kolejowego, w którym za najistotniejszy uznano etap przygotowania. W przypadku tej gałęzi transportu podobnie jak dla pozostałych, drugim w kolejności jest etap załadunku. Jednak w ustalonym rankingu w przypadku transportu kolejowego, waga pierwszego etapu nie jest dwukrotnie większa niż waga drugiego w kolejności etapu.

Ponadto, ponieważ wszystkie wyniki uzyskano dla identycznego wektora wag kryteriów (składowych wektora priorytetów dla kryteriów – stanowiących środkowe poziomy rozpatrywanych hierarchii – tabela 13) przy jednoczesnym stosowaniu tej samej skali ocen względnych, możliwe jest porównanie względne wag poszczególnych etapów

realizowanych w ramach różnych gałęzi transportu. Porównanie względne uzyskanych wartości priorytetów globalnych dla poszczególnych etapów realizowanych przez rozpatrywane gałęzie transportu przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Uszeregowanie etapów procesu transportowego w odniesieniu do poziomu ryzyka związanego z transportem chloranów

Uszeregowanie wariantów od etapu procesu transportowego najbardziej znaczącego ze względu na potencjalne ryzyko po etap najmniej znaczący uzyskane z wykorzystaniem metody AHP pozwala na sformułowanie następujących wniosków dla rozpatrywanego w pracy problemu transportu chloranów:

- etap końcowy w przypadku każdej z rozpatrywanych gałęzi transportu jest zgodnie z intuicją etapem najmniej znaczącym w odniesieniu do poziomu ogólnego ryzyka,
- etap przygotowania jest etapem tym bardziej ważnym, im bezpieczniejszy jest etap przewozu, a w przypadku gdy przewóz charakteryzuje się znacznym prawdopodobieństwem zdarzenia mogącego doprowadzić do uszkodzenia ładunku, istotniejszymi od etapu przygotowania są etap przewozu i etap załadunku.

Na zakończenie przedstawionych rozważań, warto jednocześnie podkreślić, że przedstawione uszeregowanie zależy nie tylko od wykonanej oceny względnej poszczególnych etapów ale również od przyjętej istotności kryteriów oceny ryzyka. Głównym celem przedstawionego w pracy postępowania z wykorzystaniem metody AHP było wskazanie jednego z możliwych podejść do oceny procesu transportu materiałów niebezpiecznych w odniesieniu do ogólnie definiowanego poziomu ryzyka.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] ADR, *Umowa europejska dotycząca międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych*, United Nations Economic for Europe, 2011.
- [2] *Instrukcja o postępowaniu przy przewozie kolejną towarów niebezpiecznych Ir-16*, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2009.
- [3] Ishizaka A., Lusti M.: *How to derive priorities in AHP: a comparative study*, Central European Journal of Operations Research, 2006, Volume 14, Number 4, 387-400.
- [4] Pusty T.: *Przewóz towarów niebezpiecznych. Poradnik kierowcy*, Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2009.
- [5] Saaty T.L.: *Fundamentals of decision making with the Analytic Hierarchy Process*, Pittsburgh, RWS Publications, 2000.
- [6] Sordyl J.: *Analiza zagrożeń związanych z przewozem materiałów niebezpiecznych*, praca magisterska, Bielsko-Biała, Akademia Techniczno-Humanistyczna, 2010.
- [7] Żak J.: *Wielokryterialne wspomaganie decyzji w transporcie drogowym*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2005.