

Sylvia Bęczkowska, Iwona Grabarek, Włodzimierz Choromański

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

MODEL OCENY RYZYKA W DROGOWYM TRANSPORCIE TOWARÓW NIEBEZPIECZNYCH – WYBRANE ZAGADNIENIA

Rękopis dostarczono, maj 2013

Streszczenie: Po drogach naszego kraju codziennie przewożone są paliwa płynne, gazy, chlor, amoniak, cyjanowodor i wiele innych substancji o działaniu toksycznym i wybuchowym [1]. Każdego roku rejestruje się kilkaset kolizji z udziałem pojazdów z towarami niebezpiecznymi, które prowadzą do powstania rozlewisk przenikających do gruntu, wód podziemnych, toków wodnych, powodując degradację życia biologicznego. A zatem zagrożenie bezpieczeństwa jest istotnym problemem, z którymi zmierzyć się muszą nadawcy, odbiorcy i przedsiębiorstwa transportowe. Jednym z elementów działania na rzecz poprawy bezpieczeństwa jest analiza ryzyka. W artykule przedstawiono nowe podejście do oceny ryzyka w drogowym transporcie towarów niebezpiecznych, uwzględniające wpływ czynnika ludzkiego na prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku. Omówiono założenia metody wyboru optymalnej trasy przewozu, z punktu minimalizacji ryzyka ludzkiego, ekologicznego i finansowego.

Słowa kluczowe: towary niebezpieczne, analiza ryzyka, czynnik ludzki

1. WSTĘP

Intensywny rozwój przemysłu chemicznego, w tym szczególnie petrochemicznego, powoduje zwiększenie przewozów produktów, takich jak paliwa płynne, gazy i inne o charakterze toksycznym lub wybuchowym. W Polsce rocznie transportem kolejowym przewozi się około 16 mln ton towarów niebezpiecznych, natomiast transportem drogowym aż 100 mln ton [9], wykorzystując przede wszystkim cysterny drogowe. Z danych (2011r) wynika, że w Polsce wyprodukowano i dopuszczono do eksploatacji ponad 10 000 cystern drogowych. Jednocześnie z roku na rok obserwuje się spadek środków kolejowych do przewozu towarów niebezpiecznych, a produkcja tych środków transportu praktycznie nie istnieje [9,10,11].

Liczba kilkuset kolizji rocznie w porównaniu z liczbą wypadków z udziałem innych użytkowników dróg, np. samochodów osobowych, jest relatywnie mała. Jednak problem tkwi nie w liczebności, a w rozmiarze skutków wypadku. Awarie i katastrofy z udziałem

towarów niebezpiecznych powodują powstanie strat, nie tylko materialnych, ale także ekologicznych i ludzkich. Wśród przyczyn zagrożeń najczęściej wymienia się: [3,10,11,13]:

czynnik ludzki (błąd operatora), zły stan techniczny pojazdu, zły stan techniczny dróg, brak wytyczonych tras przewozu, inne.

Minimalizacja możliwości wystąpienia strat w przewozie towarów wymaga planowania i realizacji działań profilaktycznych o szerokim zakresie. Istotnym elementem w tych działaniach jest dokładna analiza ryzyka, uwzględniająca jak największą liczbę czynników mających potencjalny wpływ na prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego.

2. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH METOD ANALIZY RYZYKA W TRANSPORCIE TOWARÓW NIEBEZPIECZNYCH

Ryzyko w transporcie drogowym jest to „kombinacja prawdopodobieństwa aktywizacji zagrożenia w zdarzeniu niepożądanym i spowodowanych w związku z tym szkód” [10]. W normach (BS 4778) i (PN-IEC 300-3-9) ryzyko jest definiowane jako:

- „kombinacja prawdopodobieństwa lub częstości występowania określonych zagrożeń i wielkości strat, które one mogą spowodować. Jest więc miarą prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego i jego skutków”,
- „kombinacja częstości lub prawdopodobieństwa wystąpienia określonego zdarzenia niebezpiecznego (które może powodować szkodę) i konsekwencji związanych z tym zdarzeniem”.

W odróżnieniu od wielu dziedzin techniki w transporcie drogowym nie jest stosowana jednolita metoda oceny ryzyka. W tym zakresie opracowano [9,12], oraz metodykę zarządzania ryzykiem w tunelach drogowych [11], zakończoną Dyrektywą UE [11], metody oceny ryzyka na sieci dróg w ramach programów: EuroRap (2003) [7], AusRap (2006) [2], Program Poprawy Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego na drogach Krajowych do 2013r, „Gambit” [8]. Natomiast w odniesieniu do przewozu towarów niebezpiecznych nie ustanowiono odrębnej Dyrektywy, ani też nie wypracowano uniwersalnej metody.

Wszystkie metody oceny ryzyka można podzielić na dwie grupy: metody ilościowe i jakościowe. Metody jakościowe to, np. Check List – CHL, Process Safety Analysis – PSA, Hazard and Operability Studies - HAZOP. Metody ilościowe, jak np. analiza drzewa błędów FTA, analiza drzewa wydarzeń – ETA, to głównie metody statystyczne i probabilistyczne, które znalazły zastosowanie m.in. w metodzie szwajcarskiej [5], którą posłużono się do oceny ryzyka w drogowym transporcie towarów niebezpiecznych w 2001 r. na autostradzie A-2. Metoda sprowadza się do wyznaczenia prawdopodobieństwa potencjalnej poważnej katastrofy transportowej na szlaku drogowym. Do obliczania prawdopodobieństwa zastosowano wskaźnik wypadków odpowiedni do obciążenia i odcinka drogi, a następnie dostosowano do liczby narażeń lub zdarzeń samochodowych [5]. Ten sposób podejścia do analizy ryzyka wymaga dostępu do

wiarygodnych danych. Na ogół ich fragmentaryczność lub brak powoduje stosowanie metod pośrednich [11].

Wspomniana powyżej metoda nie znalazła szerszego zastosowania w Polsce, ze względu na odmienną w stosunku do Szwajcarii, warunków przewozu towarów niebezpiecznych. Innym podejściem, wartym wymienienia, jest metoda analizy ryzyka oparta na wiedzy eksperckiej, opracowana w Kanadzie. Metodę tę, po modyfikacjach zastosowano do oceny poziomu ryzyka na wybranych trasach w Belgradzie. Metoda łączy w sobie wiele elementów, które mają wpływ na wybór optymalnej trasy dla transportu drogowego towarów niebezpiecznych.

Intensywny rozwój i dostępność technik obliczeniowych spowodowały powstanie wielu programów komputerowych, które wspomagają analizę ryzyka. Można do nich zaliczyć, m.in.: CAFTAN, ORCHARD, FAUNET, HERREX, GASMAL, EFFECTS, DEGADIS, EAHAP [13]. Pierwszym zintegrowanym programem, który zawierał analizę przyczyn był SAFETI [13]. W transporcie drogowym towarów niebezpiecznych stosuje się programy do szacowania skutków zdarzenia niepożądanego, jakim jest wypadek. Zdarzenia awaryjne z substancjami toksycznymi, palnymi bądź wybuchowymi niosą za sobą poważne straty, nie tylko materialne, ale co ważniejsze straty w ludziach. Oszacowanie strat w przypadku tras komunikacyjnych jest skomplikowane, ponieważ nie można wcześniej przewidzieć ani warunków, w których nastąpi awaria środka transportującego substancje niebezpieczne, ani miejsca, w którym wystąpi uwolnienie. Programy, które stosuje się jako narzędzia do szacowania zasięgów stref i skutków uwolnień substancji niebezpiecznych to m.in.: PHAST Micro (DNV), Aloha (U.S. EPA), H-PAC, GasMal P (TNO), Expert (RIZIKON) i Breeze Haz Professional (Trinity Consultants).

Analiza istniejących metod oraz tych, które są wykorzystywane do oceny ryzyka w przewozie towarów niebezpiecznych, pozwoliła na sformułowanie tezy o braku uniwersalnej metody dedykowanej tym zagadnieniom. Powyższe rozważania stały się inspiracją do opracowania autorskiego modelu oceny ryzyka w drogowym transporcie towarów niebezpiecznych. Celem opracowanego modelu było wyznaczenie optymalnych tras przewozu towarów niebezpiecznych z punktu widzenia minimalizacji strat, z możliwością ich rozdzielenia na straty ludzkie, ekologiczne i finansowe.

3. MODEL OCENY RYZYKA W DROGOWYM TRANSPORCIE TOWARÓW NIEBEZPIECZNYCH

Przewóz towarów niebezpiecznych w Polsce odbywa się po różnych trasach. Z punktu widzenia bezpieczeństwa transportu należałoby wybrać taką trasę, po której transport ten byłby obciążony najmniejszym ryzykiem. Przyjęto, że przewożony towar to materiał ciekły palny, czyli klasa 3 - paliwa płynne, a techniczny środek transportu to cysterna. Dla potrzeb modelu przyjmujemy, że struktura sieci transportowej, którą tworzy układ węzłów i połączeń na danym obszarze, np. województwa, regionu, kraju, odwzorowana będzie grafem nieskierowanym GS, tj.:

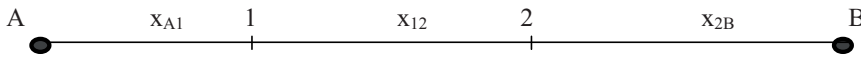
$$GS = \langle W, L \rangle \quad (1)$$

W – jest zbiorem numerów węzłów sieci transportowej (wierzchołków grafu),
L – jest zbiorem połączeń transportowych (łuków w grafie).

W sieci transportowej między każdą parą sąsiednich węzłów mogą istnieć połączenia transportowe. Wierzchołkom (węzłom transportowym) oraz łukom (połączeniom transportowym) grafu nadajemy odpowiednią interpretację. Zatem węzły transportowe mogą mieć interpretacje np. miejscowości, w której występuje terminal przeładunkowy, baza paliw, stacja benzynowa i inne. Połączenie transportowe między dwoma sąsiednimi wierzchołkami (węzłami) będzie miało interpretację odcinka x_{ij} trasy przewozu towarów niebezpiecznych, o różnej długości. Trasa w grafie GS, pomiędzy dwoma wyróżnionymi wierzchołkami (rys.1.) to suma odcinków x_{ij} , o różnych wierzchołkach, należących do trasy.

$$T(A, B) = \sum_{(i,j) \in T(A,B)} x_{ij} \quad (2)$$

Przy czym początek oraz koniec trasy są w zadanych wierzchołkach, początek odcinka trasy jest końcem poprzedniego odcinka a koniec odcinka trasy jest początkiem następnego.



Rys. 1. Przykład trasy przewozu towarów niebezpiecznych pomiędzy wyróżnionymi wierzchołkami A i B

Źródło: opracowanie własne.

Między wyróżnionymi wierzchołkami w rzeczywistej sieci transportowej może istnieć wiele tras. Połączenia transportowe (odcinki x_{ij}) są zapisane w postaci liczb, które interpretuje się jako wartości parametrów, czyli: długość odcinka x_{ij} wyrażoną w km i rzeczywista prędkość na danym rodzaju drogi v_{irzecz} [km/h]. W zależności od zabudowy i rodzaju drogi przyjęto następującą klasyfikację dróg: autostrada, droga ekspresowa jedno lub dwujezdniowa w terenie niezabudowanym, droga dwujezdniowa o co najmniej dwóch pasach w każdym kierunku w terenie niezabudowanym, pozostałe drogi w terenie niezabudowanym, drogi w strefie zamieszkania, drogi w obszarze zabudowanym. W Polsce, odpowiednio do rodzaju drogi, obowiązuje według kodeksu drogowego, dopuszczalna prędkość jazdy v_{idop} , w rzeczywistości nie zawsze możliwa do osiągnięcia, ze względu na natężenie ruchu na drodze. Wprowadzono zatem parametr α , czyli współczynnik redukujący maksymalną prędkość jazdy, który w zależności od natężenia ruchu przyjmuje wartość: $\alpha=1$ - znikome natężenie; $\alpha=0,75$ - małe natężenie ruchu; $\alpha=0,5$ - średnie natężenie ruchu; $\alpha=0,25$ - duże natężenie ruchu. Stąd rzeczywista prędkość pojazdu $v_{irzecz} = \alpha v_{idop}$, czyli zależna jest od typu drogi i rodzaju zabudowy terenu, jaka występuje na danym odcinku oraz natężenia ruchu. Na podstawie w/w parametrów możliwe jest obliczenie czasu przejazdu po danym odcinku w zależności od natężenia ruchu czy rodzaju terenu.

Każdy odcinek trasy x_{ij} charakteryzuje się określonym prawdopodobieństwem wystąpienia wypadku p_{wxij} . Założono, że na wielkość p_{wxij} mają wpływ różne czynniki, które wyselekcjonowano na podstawie literatury oraz badań własnych. Zaliczono do nich czynniki o charakterze: ludzkim, technicznym, środowiskowym. A zatem uzależniono prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku p_{wxij} na danym odcinku od:

1. czynnika ludzkiego (z wyjątkiem zmęczenia), w tym:
 - cech zewnętrznych, kształtowanych przez warunki organizacyjne i techniczne: czas pracy, poziom wykształcenia, drgania, hałas, znajomość procedur,
 - cech wewnętrznych o charakterze psychologicznym i fizjologicznym: stres, wiek, pora jazdy,
 - monotonii,
2. zmęczenia kierowcy - $f(t)$, które zmienia się wraz z upływem czasu,
3. czynnika technicznego /pojazdu/,
4. czynnika drogi, obejmującego :
 - innych użytkowników dróg,
 - natężenie ruchu pojazdów przy bazach paliwowych lub rafineriach, czyli tzw. początek i koniec transportu ładunku

Założono również, że powyższe czynniki na danym odcinku x_{ij} mogą wystąpić z różną intensywnością, którą zdefiniowano jako:

1. Intensywność prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez człowieka λ_L ,
2. Intensywność prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku na skutek zmęczenia λ_Z ,
3. Intensywność prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku na skutek czynnika technicznego λ_T ,
4. Intensywność prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku spowodowanego przez warunki niezależne od kierowcy λ_{NK} , czyli zależne od innych użytkowników dróg,
5. Intensywność prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku w pobliżu baz paliwowych, oznaczonym indeksem λ_{P-K} . Według dostępnych danych statystycznych dużo wypadków występuje w pobliżu baz paliwowych, gdzie natężenie ruchu system drogowych jest bardzo duże. Zasadne zatem na potrzeby modelowania było wprowadzenie tego parametru.

Ad1. W celu wyznaczenia λ_L zbudowano model heurystyczny. Do oceny wpływu błędu kierowcy na intensywność prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego zastosowano modelowanie rozmyte. Modele te opisują działanie człowieka przy użyciu opisu słownego, sformułowanego przez eksperta (często modele rozmyte nazywane są modelami lingwistycznymi). Model heurystyczny czynnika ludzkiego zbudowano w oparciu o cechy, uznane za „ istotne” – wygenerowane z analizy specyfiki pracy układu, wymagań proceduralnych omawianego rodzaju transportu, analizy przyczyn wypadków oraz badań ankietowo-ekspertowych kierowców. Założenia modelu dokładnie opisano w artykule [4]. Model został zaimplementowany numerycznie w środowisku Matlab_Simulink.

Ad2. Wartość intensywności prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku na skutek zmęczenia będzie się zmieniać w zależności od długości przejechanej trasy. Z fizjologii człowieka wynika narastanie zmęczenia wraz z upływem czasu jazdy. Zgodnie z ustawą o prawie drogowym kierowca może jechać 4,5 godziny, a następnie powinien przerwać jazdę. Założono, że odpoczynek wynosi 0,5 godziny. Przyjęto, że intensywność λ_Z osiąga

swoją wartość maksymalną po 4,5 h jazdy, następnie w trakcie wypoczynku następuje regeneracja organizmu i wraz z rozpoczęciem jazdy, λ_z , ponownie narasta. Parametr ten będzie zmienny dla całej trasy, a jego wartość narasta wraz z przebytą drogą.

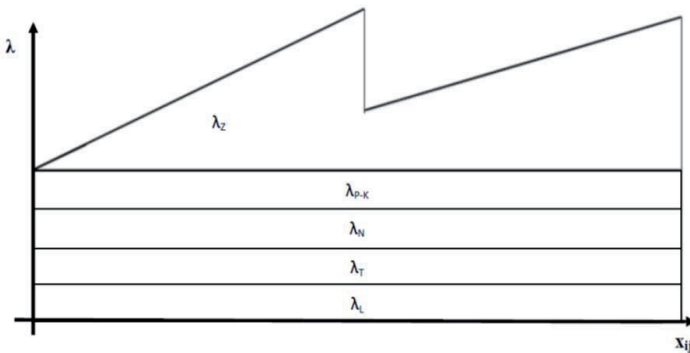
Ad3. Wartość intensywności λ_T wyznaczono na podstawie dostępnych statystyk i przyjęto jako wartość stałą dla całej trasy.

Ad4. Wartość oszacowano na podstawie danych statystycznych i przyjęto jako wartość stałą dla odcinka x_{ij} .

Ad5. Według statystyk wiele wypadków powstaje w pobliżu baz paliwowych, charakteryzujących się dużym zagęszczeniem cystern, co odzwierciedla parametr λ_{p-k} , uwzględniony w budowie modelu. Obliczoną wartość na podstawie danych przyjęto jako stałą, jeżeli na danym odcinku występuje baza paliwowa.

Intensywność prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku z powodu w/w czynników określana jest w oparciu o dane dotyczące liczby wypadków spowodowanych z winy określonego czynnika (w ciągu założonego przedziału czasowego – od 1 roku do kilku lat) i odpowiadającej im liczbie przejechanych kilometrów w ciągu tego samego przedziału czasowego przez wszystkie zarejestrowane cysterny.

Zdefiniowane intensywności analizowane na danym odcinku x_{ij} składają się na model pasmowy przedstawiony na rys.2. Z danych wartości intensywności obliczono prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku w transporcie towarów niebezpiecznych na odcinku x_{ij} .



Rys. 2. Model pasmowy oceny ryzyka
Źródło: opracowanie własne

$$P_{wxij} = \begin{cases} \int_0^{x_{ij}} (\lambda_L + \lambda_T + \lambda_N + \lambda_{p-k} + \lambda_z(x)) dx \\ 1 \text{ gdy } \int_0^{x_{ij}} (\lambda_L + \lambda_T + \lambda_N + \lambda_{p-k} + \lambda_z(x)) dx > 1 \end{cases} \quad (3)$$

Kolejnym kluczowym elementem przypisanym do odcinka x_{ij} , to wielkość strat. Straty uzależniono od scenariusza zdarzeń, jaki może zaistnieć na danym odcinku x_{ij} . Scenariusz zdarzeń na potrzeby modelowania interpretuje się jako: przewrócenie pojazdu bez dodatkowych konsekwencji, przewrócenie pojazdu i wyciek, przewrócenie pojazdu i wyciek z pożarem, przewrócenie pojazdu i wyciek z wybuchem. Prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza zdarzeń potraktowano jako prawdopodobieństwa niezależne, a ich wartość przyjęto arbitralnie ze względu na brak danych lub ich fragmentaryczność. Suma prawdopodobieństw scenariuszy dla danego odcinka przyjmuje wartość 1.

Zdefiniowane w modelu straty, poniesione w wypadkach drogowych z udziałem towarów niebezpiecznych, zostały uszczegółowione. W przypadku strat o charakterze ludzkim wzięto pod uwagę liczbę ofiar śmiertelnych, liczbę obrażeń i zatruc. W przypadku strat ekologicznych - padłą zwierzynę, powierzchnię skażonej gleby i wód. Straty finansowe potraktowano jako całkowity koszt szkód. Wprowadzono również pięciostopniową skalę zagrożeń, jakie może spowodować zdarzenie niebezpieczne, tzn.: drobny incydent, małe zagrożenie, średnie zagrożenie, duże zagrożenie, katastrofa. W ten sposób otrzymano tabelę wielkości strat. Na podstawie której obliczono wskaźniki:

- strat ofiar śmiertelnych - $W_{SLoś}$,
- strat obrażeń i zatruc - W_{SLoz} ,
- strat ekologicznych padłych zwierząt - $W_{SEpż}$,
- strat skażonej gleby i wód - W_{Sesg} ,
- strat finansowych - W_{SF} .

Każdemu odcinkowi x_{ij} przypisano właściwą wielkość każdego z ww. wskaźników strat.

Dla każdego odcinka x_{ij} oszacowano ryzyko cząstkowe. Ryzyko całkowite uzyskuje się, sumując wartości ryzyka cząstkowego, odpowiadającego odcinkom składającym się na daną trasę.

Ryzyko cząstkowe dla odcinka trasy x_{ij} określono zgodnie ze wzorem:

$$R_{kx_{ij}} = p_{znx_{ij}} \cdot S_{kx_{ij}} \quad (4)$$

$$p_{znx_{ij}} = p_{wx_{ij}} p_{sc} \quad (5)$$

gdzie:

$k \in \{L, E, F\}$

$p_{znx_{ij}}$ - prawdopodobieństwo zdarzenia niebezpiecznego na odcinku x_{ij}

$p_{wx_{ij}}$ – prawdopodobieństwo wypadku na odcinku x_{ij}

p_{sc} – prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza

$S_{Lx_{ij}}$ - straty ludzkie na odcinku x_{ij}

$S_{Ex_{ij}}$ - straty ekologiczne na odcinku x_{ij}

$S_{Fx_{ij}}$ - straty finansowe na odcinku x_{ij}

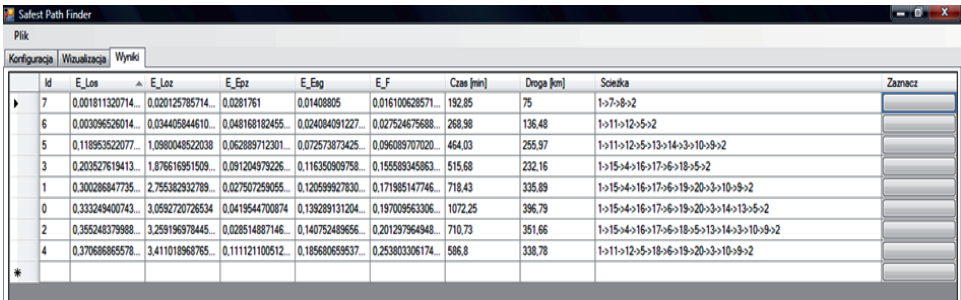
Zgodnie z powyższym ryzyko całkowite przedstawia zależność (6).

$$R_{ck} = \sum_{(i,j) \in T} R_{kx_{ij}} \quad (6)$$

Przy czym R_{ck} , tak jak w przypadku ryzyka cząstkowego, może odzwierciedlać ryzyko związane ze startami ludzkimi, ekologicznymi i finansowymi.

4. WYBRANE WYNIKI SYMULACJI MODELU

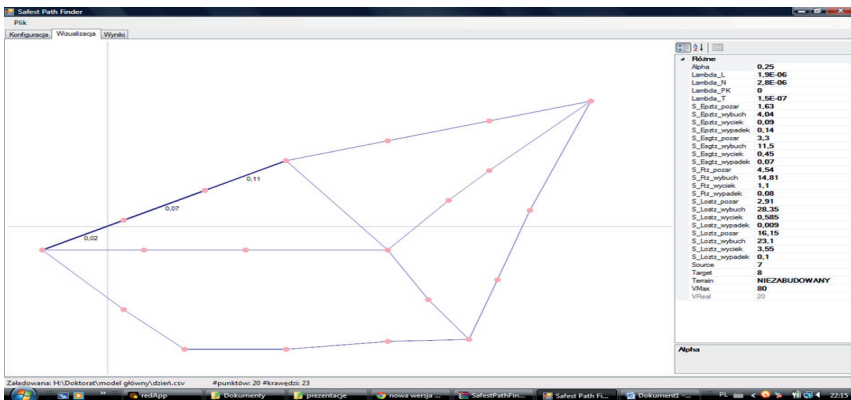
W dostępnej literaturze z zakresu oceny ryzyka w transporcie towarów niebezpiecznych [13], nie odnotowano stosowania metody uwzględniającej wpływ błędów ludzkich na prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku. Dlatego też wyniki intensywności prawdopodobieństwa popełnienia błędy przez człowieka, uzyskane w badaniach symulacyjnych opracowanego modelu czynnika ludzkiego zostały zaimplementowane do modelu oceny ryzyka w drogowym transporcie towarów niebezpiecznych. W budowie tego modelu, wykorzystano algorytm Breadth-first search [15], w skrócie BFS – jeden z najprostszych algorytmów przeszukiwania grafu. Przechodzenie grafu rozpoczyna się od danego wierzchołka i polega na odwiedzeniu wszystkich osiągalnych z niego wierzchołków. Wykorzystywany jest do odnajdywania najkrótszej drogi w grafie. Algorytm działa prawidłowo zarówno dla grafów skierowanych jak i nieskierowanych. W modelu nie zastosowano algorytmu Dijkstry ze względu na zmienną wartość wag (założono, że zmęczenie rośnie z upływem czasu). Na potrzeby weryfikacji modelu został zaimplementowany symulator. Parametrem wejściowym symulatora jest plik CSV opisujący graf związany z siecią drogową. Struktura pliku jest następująca: każdy wiersz odpowiada nowemu wierzchołkowi w grafie. Natomiast struktura wiersza zawiera m.in.: - id wierzchołka (liczba całkowita, identyfikator wierzchołka), współrzędna x [km], współrzędna y [km]. Opis kolejnych krawędzi: - id sąsiada (identyfikator sąsiadującego wierzchołka), v_max (prędkość maksymalna na odcinku) i kolejne założenia do modelu opisane parametrami (m.in. długość, ograniczenie prędkości, informacja o tym czy jest to teren zabudowany czy niezabudowany, itp.). Po wczytaniu pliku wejściowego, aplikacja wizualizuje wczytaną sieć drogową i pozwala użytkownikowi na ręczną modyfikację parametrów sieci. W wyniku przeprowadzonych badań aplikacja pozwoli na estymację potencjalnych skutków wypadków oraz na wybranie trasy przejazdu, która minimalizuje ryzyko zdarzeń drogowych. Stworzone narzędzie może wspomagać optymalny przewóz towarów niebezpiecznych z punktu widzenia minimalizacji strat ludzkich, ekologicznych i finansowych. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki symulacji. Założono prawdopodobieństwo scenariuszy zdarzeń oraz za kryterium przyjęto minimalizację strat ofiar śmiertelnych na zadanej trasie. Otrzymano wyniki symulacji przedstawione na rys.3 i 4.



Id	E_Los	E_Loz	E_Epr	E_Eag	E_F	Czas [min]	Droga [km]	Scenka	Zanacz
7	0.001811320714...	0.020125785714...	0.0281761	0.01408805	0.016100628571...	192,85	75	1->7->2	
6	0.003096526014...	0.034405844610...	0.048168182455...	0.024084091227...	0.027524675688...	268,98	136,48	1->11->12->5->2	
5	0.11895352077...	1.0980048522038	0.062889712301...	0.072573873425...	0.096089707020...	464,03	255,97	1->11->12->5->13->14->3->10->9->2	
3	0.203527619413...	1.876616951509...	0.091204979226...	0.116350909758...	0.155589345963...	515,68	232,16	1->15->4->16->17->6->18->5->2	
1	0.300286947735...	2.755382932789...	0.027507259055...	0.120599927830...	0.171985147746...	718,43	335,89	1->15->4->16->17->6->19->20->3->10->9->2	
0	0.333249400743...	3.0592720726534	0.0419544700874...	0.139289131204...	0.197009663306...	1072,25	396,79	1->15->4->16->17->6->19->20->3->14->13->5->2	
2	0.355248379988...	3.259196978445...	0.028514887146...	0.140752489656...	0.201297964948...	710,73	351,66	1->15->4->16->17->6->18->5->13->14->3->10->9->2	
4	0.370686865578...	3.411018968765...	0.111121100512...	0.185680659537...	0.253803306174...	586,8	338,78	1->11->12->5->18->6->19->20->3->10->9->2	

Rys. 3. Wyniki symulacji
Źródło: opracowanie własne

Program wyznaczył trasę przewozu towarów niebezpiecznych we względu na najmniejszą liczbę ofiar śmiertelnych oraz oszacował całkowite ryzyko na trasie w zależności od przyjętych strat rys.4.



Rys. 4. Wyznaczenie trasy
Źródło: opracowanie własne

5. PODSUMOWANIE

Zaproponowana metoda oceny ryzyka stanowi nowe podejście w dziedzinie analizy i oceny ryzyka w transporcie towarów niebezpiecznych, bowiem uwzględnia wpływ czynnika ludzkiego na prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku oraz uwzględnia proces narastania zmęczenia kierowcy w czasie wykonywania zadania przewozowego. Ponadto zawiera kategoryzację strat, uwzględniającą wielkość strat w zależności od skali zdarzenia.

Metoda ta jest przydatna do oszacowania zmienności ryzyka zarówno na trasach planowanych, jak i istniejących w zależności od: kategoryzacji odcinków drogi, podziału na klasy towarów niebezpiecznych, wpływu możliwych scenariuszy i zagrożeń na bezpieczeństwo w przewozie towarów niebezpiecznych.

Zaproponowana metoda pozwala generować optymalną trasę przewozu towarów niebezpiecznych, minimalizującą - w zależności od założeń - straty ludzkie, ekologiczne i finansowe.

Bibliografia

1. ADR – umowa europejska dotycząca międzynarodowego przewozu drogowego transportu towarów niebezpiecznych. Genewa 2011-2013.
2. AusRap: Star Ratings Australians 's National Network of Roads. AusRap, 2006. www.ausrap.org.
3. Bęczkowska S., Grabarek I. : Analysis of Factors Determining Ergonomic Conditions of Driver's Workplace and Safety in Transport of Dangerous Goods. Archives of Transport, vol. 24-3, Warszawa 2012, str. 297-306.
4. Bęczkowska S., Grabarek I. : Czynniki ludzkie w ocenie ryzyka w transporcie towarów niebezpiecznych. Poznań, Technika Transportu Szynowego 09/2012
5. Borysiewicz M., Potemski S.: Praktyczne algorytmy ocen ryzyka dla człowieka i środowisk od szlaków transportu towarów niebezpiecznych. Instytut Energii Atomowej 2001, Otwock – Świerk
6. Elander, J., West, R., and French, D.: Behavioural Correlates: Individual Differences in Road-Traffic Crash Risk: An Examination of Methods and Findings. Psychological Bulletin, 113:2, 1993.
7. EuroRap: European Road Assessment Programme, 2003. Star Rating Europe's Road for Safety.
8. Gambit.: Krajowy program bezpieczeństwa ruchu drogowego 2005-2007-2013
9. Główny Urząd Statystyczny – dane statystyczne z wypadków.
10. Krystek R.: Zintegrowany system bezpieczeństwa transportu, Warszawa 2009, tom I. WKŁ.
11. Krystek R.: praca zbiorowa.: Zintegrowany system bezpieczeństwa transportu. Warszawa, 2009, Tom II, WKŁ.
12. Minderhoud, M. M., and Bovy, P. H. L., Extended Time-to-Collision Measures for Road Traffic Safety Assessment, Accident Analysis and Prevention, Vol 33, 2001.
13. Młyńczak M.: Analiza ryzyka w transporcie i przemyśle, Wrocław 1997, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
14. Szopa T.: Niezawodność i bezpieczeństwo. Wydawnictwo Oficyna wydawnicza PW. Warszawa 2009
15. Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein: Wprowadzenie do algorytmów. Wyd. 8. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2007.
16. Taylor A.H., Dorn L.: Stress, fatigue, health, and risk of road traffic accidents among professional drivers: the contribution of physical inactivity. Annu. Rev. Public Health 2006.

A MODEL OF RISK ASSESSMENT CONCERNING THE ROAD TRANSPORTATION OF HAZARDOUS MATERIALS – SELECTED ISSUES

Summary: Every day liquid fuels, gases, chlorine, ammonium, hydrogen cyanide and many other toxic and explosive substances are transported on national roads. Several hundreds of road accidents involving vehicles carrying hazardous materials are reported each year. In the aftermath of these accidents spillages infiltrating the ground, groundwater and water courses take place and lead to the degradation of biological life. Hence, safety measures must be applied on a daily basis by the dispatchers, recipients and speditors. Risk analysis is one of the measures necessary for the improvement of safety standards. In the article a new approach to risk assessment concerning the road transportation of hazardous materials has been presented. This approach takes into account the effect of the human factor on the likelihood of road accidents. In addition, the article discusses the assumptions to be taken for the choice of transportation route in order to minimize the risk.

Keywords: hazardous goods, risk analysis, human factor