

Problemy oceny niezawodności i bezpieczeństwa systemów transportu intermodalnego

Omówiono pojęcia definiujące transport intermodalny. Wskazano na płaszczyzny integracji transportu kolejowego i transportu drogowego. Przedstawiono możliwości określenia minimalnej efektywnej odległości stosowania transportu intermodalnego i znaczenie pozyskania informacji pozwalających na oszacowanie niezawodności i bezpieczeństwa transportu drogowego, kolejowego i czynności przeładunkowych w transporcie intermodalnym. Omówiono wybrane przykłady oszacowań odpowiednich prawdopodobieństw uszkodzeń i wypadków zwracając uwagę na zmienność wyników w zależności od źródła informacji.

1. Wstęp

W dobie współczesnej gospodarki odchodzi się od podejścia gałęziowego do transportu, zastępując je interdyscyplinarnym ujęciem procesowym [7]. Korzyści dających konkurencyjną przewagę na rynku poszukuje się w procesie przemieszczania ładunków wykorzystującym środki przewozowe różnych gałęzi transportu – systemy transportu intermodalnego.

W większości przypadków (np. [3, 4]) pojęcie transportu intermodalnego jest stosowane zamiennie z terminami transport multimodalny i transport kombinowany. W pracy [5], powołując się na wykładnię tych pojęć opublikowaną przez Europejską Konferencję Ministrów Transportu (CEMT) w glosariuszu „Terminologia transportu kombinowanego”, dokonuje się ich rozróżnienia: „**transport multimodalny** to przewóz ładunku przy użyciu co najmniej dwóch różnych gałęzi transportu, przy czym towar może zmieniać jednostki ładunkowe, tzn. może być przeładowywany do innej jednostki przy zmianie środka przewozu. W **transporcie intermodalnym** ładunki przewozi się przy użyciu środków przewozu różnych gałęzi transportu, jednakże w tej samej jednostce ładunkowej na całej trasie od nadawcy do odbiorcy”. Istotą podziału jest rozformowywanie jednostki ładunkowej w procesie transportowym. **Transport kombinowany** jest odmianą transportu intermodalnego, w którym jednostka ładunkowa na zasadniczej części trasy jest przewożona (bez przeładunku towaru) między terminalami przez kolej, żeglugę śródlądową lub morską, a jej transport od i do „drzwi klienta” jest realizowany transportem drogowym.

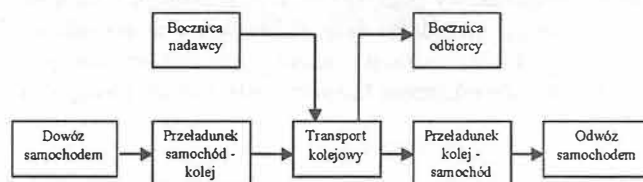
W transporcie intermodalnym występuje zjawisko wewnętrznej integracji procesów transportowych, przebiegające na płaszczyznach [4]:

- **techniczno-technologicznej** (przystosowanie infrastruktury liniowej i punktowej oraz środków transportowych z różnych gałęzi, a także urządzeń przeładunkowych i magazynowych do obsługi tej samej, zunifikowanej jednostki ładunkowej),
- **organizacyjnej** (specjalistyczne struktury organizacyjne w postaci operatorów zaangażowane w realizację kompleksowych procesów transportowych),
- **dokumentacyjnej** (jeden dokument transportowy na całą trasę dostawy),

- **cenowej** (podobne lub takie same zasady kwotowania ceny za przewóz jednostki ładunkowej środkami różnych gałęzi transportu),
- **prawnej** (jednolity system regulacji i odpowiedzialności).

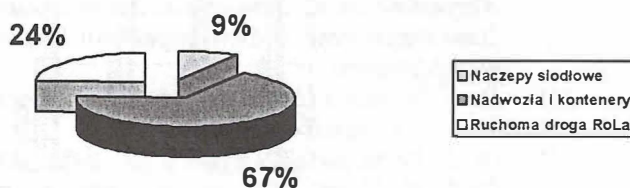
Wykorzystując tę wielopłaszczyznową integrację, można spotkać się w literaturze przedmiotu także z rozróżnieniem pojęć transportu kombinowanego od transportu intermodalnego czy multimodalnego. W transporcie kombinowanym zwraca się jedynie uwagę na techniczno-technologiczną integrację, natomiast z transportem intermodalnym czy multimodalnym, jako pojęciami szerszymi, mamy wówczas do czynienia, gdy integracja obejmuje wszystkie wyżej wymienione płaszczyzny integracyjne.

Proces transportu kombinowanego szynowo-drogowego przedstawiono w [3] w postaci łańcucha (rys. 1).



Rys. 1. Łańcuch procesu transportu kombinowanego

Udziały poszczególnych technologii przewozów intermodalnych szynowo-drogowych w roku 2001 w przedsiębiorstwach zrzeszonych w UIRR [9] przedstawiono na rys. 2, a wielkości przewozów w tabeli 1.



Rys. 2. Udział technologii przewozów kombinowanych drogowo-szynowych w 2001 roku

Tabela 1. Wielkości przewozów szynowo-drogowych w Europie

Technologia przewozu	Przewozy międzynarodowe		Przewozy krajowe		Suma	
	liczba przesyłek	%	liczba przesyłek	%	liczba przesyłek	%
Naczepy siodłowe	138 923	11	32 398	5	171 321	9
Nadwozia i kontenery	764 786	59	535 244	82	1 300 030	67
Ruchoma droga RoLa	382 964	30	82 589	13	465 553	24
Suma przewozów	1 286 673	100	650 231	100	1 936 904	100

2. Efektywność systemu transport kombinowanego

Efektywność transportu kombinowanego zależy m.in. od niezawodności i bezpieczeństwa dwóch procesów: procesu przeładunku i procesu przewozu ładunku w korytarzu transportowym. Zgodnie z [8] dla ustalonych parametrów użytkowania i obsługiwanego pojazdu oraz ustalonych parametrów zadania transportowego koszty transportu mogą być uproszczone do funkcji liniowej:

$$C = \sum_{i=1}^5 c_i \cdot L + d = a \cdot L + d \quad (1)$$

Dla transportu drogowego ta funkcja może być zapisana jako:

$$C^{road} = a^{road} \cdot L + d^{road} \quad (2)$$

a funkcja opisująca transport kombinowany, jako:

$$C^{comb} = a^{comb} \cdot L + d^{comb} \quad (3)$$

Jeżeli można założyć, że:

- $a^{road} > a^{comb}$ (tzn. dłuższy czas realizacji zadania przez transport drogowy, niższą trwałość pojazdów drogowych, wyższe prawdopodobieństwo wypadku na drodze kołowej, etc.),
- $d^{road} < d^{comb}$ (tzn. konieczność wykonania dodatkowych przeładunków, skutki uszkodzeń urządzeń przeładunkowych, etc.),

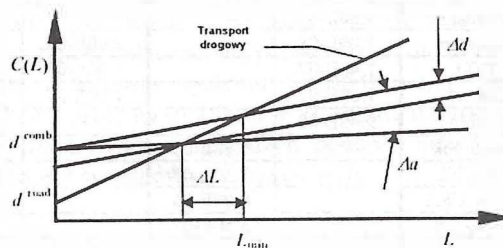
to istnieje odległość, powyżej której niższe są koszty przewozu ładunku przy wykorzystaniu transportu kombinowanego. Ta odległość zależy m.in. od stosunku charakterystyk niezawodności i bezpieczeństwa pojazdów drogowych i szynowych oraz od niezawodności realizacji przeładunków. Minimalna odległość, dla której transport kombinowany jest bardziej efektywny niż transport drogowy może być skrócona przez dwa sposoby działania (rys. 3):

- zredukowanie wartości parametru d^{comb} o Δd poprzez zmniejszenie liczby, czasu i kosztu przeładunku, zwiększenie niezawodności urządzeń przeładunkowych, itp.,
- zredukowanie parametru a^{comb} o Δa poprzez zwiększenie prędkości i niezawodności kolejowej fazy transportu kombinowanego, zwiększenie bezpieczeństwa tego środka transportu, itp.

Możliwości oceny efektywności transportu kombinowanego zależą w dużym stopniu od możliwości przeprowadzenia oceny skutków uszkodzeń / wypadków w otoczeniu systemu eksploatacji pojazdów. Wiarygodność przeprowadzenia takiej analizy jest zależna od ilości i wiarygodności dostępnych danych niezawodnościowych.

3. Analiza danych dotyczących niezawodności i bezpieczeństwa

Przeprowadzona analiza danych dotyczących częstotliwości wypadków w transporcie drogowym i kolejowym materiałów niebezpiecznych [1] wskazuje na duże zróżnicowanie w zależności od źródła pochodzenia danych.



Rys. 3. Możliwości zmiany efektywności transportu kombinowanego

3.1. Analiza danych dla transportu kolejowego

Wypadki w transporcie kolejowym podzielone zostały na dwie zasadnicze grupy [1]:

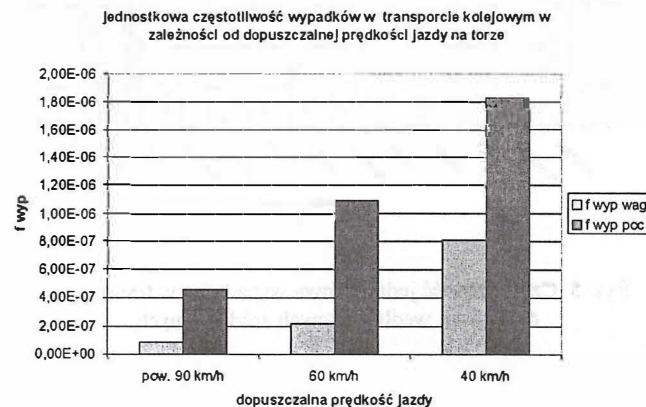
- wypadki których częstotliwość zależy od natężenia ruchu kolejowego, ale jest niezależna od liczby wagonów w każdym pociągu (np. kolizja z powodu błędu operatora pociągu),
- wypadki których częstotliwość zależy od natężenia ruchu i od liczby wagonów w pociągu (np. wykolejenie pociągu spowodowane usterką wagonu).

Przez zdarzenie niebezpieczne rozumie się [1] wyciek substancji niebezpiecznej ze zbiornika niezależnie od ewentualnego pożaru lub eksplozji, które mogą potem nastąpić. Zebrane dane dotyczące częstotliwości wypadków przedstawione zostały w tabeli 2.

Częstotliwość wypadków w transporcie kolejowym została odniesiona dla różnych dopuszczalnych prędkości jazdy na torze:

- wysokiej (powyżej 90 km/h),
- średniej (60 km/h),
- niskiej (40 km/h).

Zestawienie wartości częstotliwości wypadków w zależności od dopuszczalnej prędkości jazdy na torze przedstawia rys. 4.



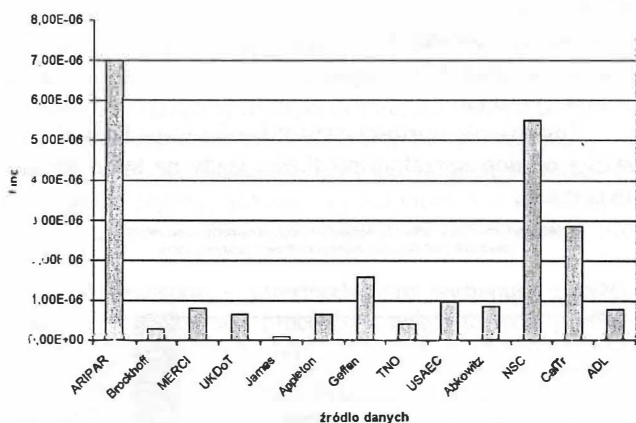
Rys. 4. Jednostkowa częstotliwość wypadków w transporcie kolejowym

Tabela 2. Jednostkowa częstotliwość wypadków w transporcie kolejowym ($f_{wyp\ wag}$ [wypadek na wagon / km przejazdu wagonu] i $f_{wyp\ poc}$ [wypadek na pociąg / km przejazdu pociągu])

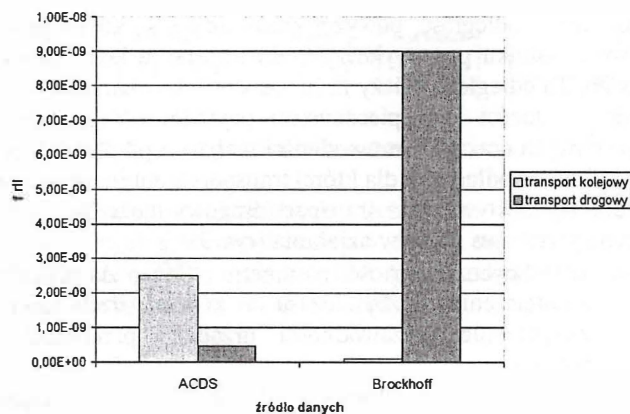
Źródło danych	dane Europa + USA		dane Europa		dane USA	
	$f_{wyp\ wag}$	$f_{wyp\ poc}$	$f_{wyp\ wag}$	$f_{wyp\ poc}$	$f_{wyp\ wag}$	$f_{wyp\ poc}$
ARIPAR	5.00E-08		5.00E-08			
Brockhoff	1.15E-08	3.00E-08	1.15E-08	3.00E-08		
TRHAZ	6.60E-08		6.60E-08			
USFRA	1.68E-07	8.40E-07			1.68E-07	8.40E-07
Sacomanno	4.68E-07				4.68E-07	
Appleton	7.00E-08		7.00E-08			
TNO	1.40E-07		1.40E-07			
Hubert	1.00E-07		1.00E-07			
Geffen	9.40E-07				9.40E-07	
Westbrook		1.18E-06		1.18E-06		
Harris, NL		8.80E-07		8.80E-07		
Harris, USA		6.00E-06				6.00E-06
Harris, UK		3.50E-07		3.50E-07		
Srednia geom.	1.12E-07	6.17E-07	5.78E-08	3.23E-07	4.20E-07	2.24E-06
Max/Min	81.7	200.0	12.2	39.3	5.6	7.1

Tabela 3. Częstotliwość jednostkowa wypadków w transporcie drogowym w zależności od typu drogi i środowiska [wypadków / km trasy]

źródło	typ drogi					środowisko	
	jedenopasmowa			dwupasmowa		podmiejskie	miejskie
	A_{PM}	A_M	A_{M+PM}	B_{PM}	B_{M+PM}	$A_{PM} + B_{PM}$	$A_M + B_M$
Brockhoff	3.00E-07	4.20E-06		4.30E-08			
Russell&al.						3.30E-07	3.10E-07
TRHAZ	4.00E-08	5.00E-07		1.50E-07			
UKDoT	1.19E-07	5.70E-07				4.82E-07	1.22E-06
USDoT	3.98E-07	1.35E-06		1.36E-06			
Lassarre&al.			2.50E-07		7.50E-07		
James			1.19E-07		6.00E-08		
Allsop			1.15E-07	3.65E-07			
ValDefCH	5.00E-07	2.10E-06		4.50E-07			
Srednia geom.	1.95E-07	1.28E-06	1.51E-07	2.70E-07	2.12E-07	3.87E-07	6.35E-07
Max/Min	12.5	8.4	2.2	31.6	12.5	1.6	3.7



Rys. 5. Częstotliwość jednostkowa wypadków w transporcie drogowym według różnych źródeł danych



Rys. 6. Częstotliwość zdarzeń niebezpiecznych w transporcie drogowym i kolejowym [zdarzenie / km]

3.2. Analiza danych dla transportu drogowego

W analizie danych dotyczących wypadków w transporcie drogowym materiałów niebezpiecznych dokonano różnych kryteriów podziału dróg. Drogi zostały podzielone ze względu na liczbę pasów ruchu na [1]:

- jednopasmowe (typ A)
 - dwupasmowe (typ B)
- Drogi jednopasmowe zostały dodatkowo podzielone ze względu na środowisko, w którym się znajdują na [1]:

- miejskie (M)
- podmiejskie (PM)

Dane dotyczące częstotliwości jednostkowej wypadków w transporcie drogowym w zależności od typu drogi i środowiska przedstawiono w tabeli 3 a zróżnicowane danych dotyczących częstotliwości wypadków ilustruje rys. 5.

Podobnie jak w transporcie kolejowym prawdopodobieństwo to jest około trzykrotnie większe dla zbiorników bezz ciśnieniowych (NP) w porównaniu ze zbiornikami ciśnieniowymi (P).

3.3. Przeladunek

Ilość informacji dotyczących niezawodności i bezpieczeństwa jest znacznie mniejsza niż dotycząca transportu drogowego lub kolejowego. W analizie poświęconej redukcji ryzyka w transporcie materiałów niebezpiecznych [6], rozważając wykorzystanie transportu intermodalnego przyjęto:

- prawdopodobieństwo wypadku: $2,00E-06$ [1/przeladunek],
- wskaźnik wypadkowości: 30 [1/przeladunek]
 - dla transportu kolejowego wskaźnik wynosi: 1 [1/km],
 - dla transportu drogowego wskaźnik wynosi:
 - droga dwujezdniowa: 2,5 [1/km],
 - droga jednojezdniowa: 1,5 [1/km],
 - droga w mieście: 10 [1/km],
- wskaźnik stopnia zagrożenia: 2,2 (dla zbiorników niskociśnieniowych).

Wskaźnik wypadkowości oznacza [6] stosunek częstotliwości wypadków podczas przeladunku kontenera / zbiornika odniesiony do uśrednionej częstotliwości wypadków podczas transportu pojazdem samochodowym i szynowym. Wskaźnik stopnia zagrożenia (wycieku, uwolnienie substancji niebezpiecznych) jest oszacowaniem eksperckim oznaczającym stosunek szansy pojawienia się skutków niebezpiecznych przy przeladunku kontenera w odniesieniu do przewozu drogą lub koleją (wartość wskaźnika zależy przede wszystkim od wytrzymałości mechanicznej kontenera a nie środka transportu).

Przeprowadzona analiza zagrożenia dla przykładowej trasy wykazała, że transport intermodalny jest bezpieczniejszy od drogowego, jeżeli długość odcinka przewozu koleją L_{rail} i długość przewozu transportem samochodowym L_{road} jest powiązana zależnością:

$$L_{\text{rail}} < k_{\text{intermodal}} L_{\text{road}} - 60 \quad (4)$$

gdzie: $k_{\text{intermodal}}$ wynosi np.: 1,25 dla drogi dwujezdniowej, 1,5 dla drogi jednojezdniowej (dla pojemników pod ciśnieniem)

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza danych dotyczących częstotliwości wypadków i zdarzeń niebezpiecznych w transporcie kolejowym i drogowym materiałów niebezpiecznych miała wskazać na dużą ilość czynników, od których zależy prawdopodobieństwo tych wypadków. Wartości danych dotyczących częstotliwości wypadków i zdarzeń niebezpiecznych różnicują między innymi następujące czynniki:

- zastosowana gałąź transportu,
- rodzaj środka transportu (np. zbiornik ciśnieniowy i zbiornik bez nadciśnienia),
- typ drogi lub toru (np. ilość pasów ruchu),
- prędkość jazdy,
- otoczenie drogi (np. obszar miejski i podmiejski),
- przyjęta definicji wypadku,
- obszar geograficznego (m.in. ukształtowanie terenu).

W skrajnych przypadkach stosunek wartości maksymalnych i minimalnych danego typu danych, podawanych według różnych źródeł wynosił ponad 480.

Należy podkreślić, że wypadki w transporcie są tylko jednym z typów zdarzeń decydujących o intensywności uszkodzeń elementów systemu transportowego. Podane przykłady wskazują na trudności w uzyskaniu miarodajnych wartości intensywności uszkodzeń podczas modelowania niezawodności systemów intermodalnych.

Literatura

- [1] Cozzani V., Bonvicini S., Vanni L., Spadonni G., Zanelli S., *Analisi comparativa delle frequenze di incidente e di rilascio nel trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose*, S.2000, VGR2k, Pisa.
- [2] Grajner J., Kwaśniewski S., Nowakowski T., *Miejsce transportu kolejowego w łańcuchach i sieciach logistycznych*, Oficyna Wydawnicza PWr. 2002.
- [3] Krettek O., *Stan rozwoju pojazdów i środków przeladunkowych w transporcie kombinowanym*, [w:] Krettek O., Grajner J. (red.), *Technika kolejowa w systemach logistycznych*, Navigator 14, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2001.
- [4] Korzeń Z., *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania t.2*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 1999.
- [5] Mindur L. (red.), *Współczesne technologie transportowe*, Politechnika Radomska 2002.
- [6] Mazzarotta B., *Risk reduction when transporting dangerous goods: road or rail?* [w:] *Proceedings of European Safety and Reliability Conference ESREL'2001, Torino, Italy*.
- [7] Nejder J., Marciniak-Nejder D., *Transport intermodalny*, PWE 1997.
- [8] Nowakowski T., *Model of combined road-rail transportation system: Concept of safety & reliability integration*. [w:] *Proceedings of European Safety and Reliability Conference ESREL'2002, Lyon, France*.
- [9] *UIRR Raport 2001, Bruksela 2002*, www.uirr.com