

*mgr inż. Piotr Gołębiowski
dr inż. Ilona Jacyna-Gołda
dr inż. Konrad Lewczuk
mgr inż. Emilian Szczepański
Politechnika Warszawska,*

Ocena emisji spalin w transporcie kolejowym w porównaniu z transportem drogowym

Transport jest jednym z najbardziej destrukcyjnych działów gospodarki dla środowiska, z wyjątkiem niektórych rodzajów przemysłu ciężkiego i rolnictwa. Należy dążyć do ograniczenia jego negatywnego wpływu na środowisko. Jednym z działań może być ograniczenie wielkości emisji szkodliwych związków spalin. Do oceny słuszności zaproponowanych zmian można wykorzystać analizy scenariuszowe. W artykule przedstawiona została analiza i ocena wielkości emisji szkodliwych związków spalin w transporcie kolejowym w porównaniu z transportem drogowym. Analizę i ocenę przeprowadzono dla wybranych lat z uwzględnieniem trzech scenariuszy: zwiększenia wielkości potoku ruchu do przewiezienia, zmiany kształtu sieci kolejowej oraz zmiany struktury pojazdów samochodowych. Badania przeprowadzono dla wybranego ciągu komunikacyjnego.

1 WPROWADZENIE

Prowadząc badania nad rozwojem gospodarki, oprócz podstawowego celu jakim jest obniżenie kosztów i zwiększenie efektywności, należy wziąć pod uwagę istotny problem, którym jest ochrona środowiska naturalnego. Aby wspólnie dbać o środowisko społeczeństwa powinny porozumieć się i podjąć właściwe decyzje dla prawidłowego funkcjonowania poszczególnych działów gospodarki narodowej.

Jedną z najbardziej istotnych gałęzi gospodarki narodowej jest transport. Dział ten jest jednym z najbardziej destrukcyjnych dla środowiska, z wyjątkiem niektórych rodzajów przemysłu ciężkiego i rolnictwa. Ciągły rozwój transportu zwiększa jego negatywny wpływ na środowisko i cywilizację. Wpływ ten wyraża się poprzez [15]:

- emisję gazów cieplarnianych przyczyniających się do zmian klimatycznych,
- lokalną emisję zanieczyszczeń powietrza wpływających negatywnie na zdrowie ludzi i lokalne środowisko przyrodnicze,
- zajmowanie cennych przyrodniczo terenów i rozcinanie ich ciągłości (fragmentacja) nowobudowanymi ciągami infrastruktury technicznej, przyczyniające się do utraty różnorodności biologicznej,
- emitowanie hałasu zagrażającego ludzkiemu zdrowiu.

Należy dążyć do ograniczenia negatywnego wpływu transportu na środowisko naturalne, a przede wszystkim na życie i zdrowie ludzi.

We wszystkich sytuacjach decyzyjnych dotyczących z jednej strony projektów transportowych na dużą skalę a z drugiej strony codziennych działań, decydenci powinni zatem szukać kompromisu pomiędzy kwestiami środowiskowymi, ekonomicznymi i społecznymi, by analizowany system transportowy był bardziej przyjazny środowisku. Sytuacja może zostać poprawiona poprzez organizowanie systemów transportowych z uwzględnieniem zasad zrównoważonego rozwoju [4], w którym rozwój nie tylko powinien skupiać się na minimalizacji emisji, ale stanowić świadome działania mające na celu ochronę środowiska naturalnego.

Podjęcie jednoznacznej decyzji, która pozwalała będzie na kompromis między aspektem społecznym, ekonomicznym i środowiskowym jest skomplikowane. Poszukuje się zatem metod analitycznych, które pozwolą na analizę problemów kształtowania systemu transportowego w sposób globalny. Jedną z metod jest zastosowanie analiz scenariuszowych.

Istniejące modele wspomagające proces analizy systemów transportowych oraz podejmowania decyzji dotyczących rozwoju pozwalają jedynie na analizę każdego z dostępnych rodzajów transportu oddzielnie. Poprawnie sformułowana strategia rozwoju transportu nie powinna stanowić złożenia planów rozwojowych opracowanych dla poszczególnych rodzajów transportu, tylko powinna być opracowana w sposób globalny. Zatem zadaniem badaczy systemów transportowych jest m.in. przygotowanie modeli analitycznych pozwalających w szczególności

na badanie interakcji pomiędzy wybranymi gałęziami transportu [11]. Przykładem zastosowania tego rodzaju modelu może być sformułowanie propozycji dotyczących słuszności realizacji konkretnej inwestycji np. w jakim stopniu zrealizowanie inwestycji drogowej na danym ciągu transportowym wpłynie na zmniejszenie kosztów tego rodzaju transportu oraz w rezultacie w jakim stopniu spowoduje to przeniesienie części potoku ruchu z innej gałęzi transportu (kolei, żeglugi śródlądowej itp.). Tego rodzaju modele mogą znaleźć także zastosowanie przy określaniu priorytetów polityki transportowej kraju. Można np. ocenić wpływ kosztów zewnętrznych na przeniesienie potoku ruchu z rozpatrywanej gałęzi transportu na inne gałęzie [1]. W rezultacie stwarza to możliwość oceny efektywności zamierzeń w dziedzinie polityki transportowej kształtowania zrównoważonego rozwoju systemu transportowego.

O wielkości przewozów ładunków i osób z wykorzystaniem danej gałęzi transportu decydują: popyt, podaż oraz cena transportu. Nabywcy usług transportowych generują popyt na usługi transportowe, natomiast dostawcy usług transportowych generują podaż usług transportowych [14]. Jakość wykorzystania oferty dostawcy usług transportowych związana jest z jakością systemu rozumianego jako system transportowy [14]. Kryteria oceny jakości systemu transportowego wynikają ze strategii polityki transportowej poszczególnych operatorów, przewoźników itp., realizujących określoną politykę transportową [6], [9], [11], [13].

Strategie rozwoju systemu transportowego w ujęciu proekologicznym powinny uwzględniać interesy wszystkich uczestników procesu transportowego, a także tych, którzy stanowią otoczenie systemu transportowego (nie biorą bezpośrednio udziału w procesie przemieszczania – np. ludzie mieszkający w okolicy przejazdu kolejowego, gdzie występuje duże natężenie hałasu). Należy tu wziąć pod uwagę poziom szkodliwego oddziaływania transportu na środowisko (aspekt ekologiczny), oraz poziom bezpieczeństwa ruchu (liczebność i skutki wypadków czy katastrof). Zatem o rozwoju poszczególnych rodzajów transportu i w konsekwencji poszczególnych rodzajów dróg transportowych decyduje nie tylko rozwój technologii przewozowych ale także i czynniki ograniczające rozwój, takie jak: ekologia czy bezpieczeństwo [2], [8], [9], [10].

Współczesna polityka transportowa poszczególnych krajów zwraca szczególną uwagę na związek między transportem drogowym a innymi rodzajami transportu, w szczególności transportem kolejowym. Wysoka i ciągle rosnąca emisja związków szkodliwych spalin przez pojazdy wymusza konieczność wprowadzania zmian w organizacji ruchu zwłaszcza na wybranych obszarach (miasta, obszary cenne przyrodniczo). Jednym z rozwiązań może być także

częściowe przeniesienie potoku ruchu z gałęzi cechujących się wysoką emisyjnością (jak np. transport samochodowy) na gałęzie cechujące się niską emisyjnością (jak np. transport kolejowy).

Jak już wspomniano powyżej, należy dążyć do tego by ograniczyć negatywny wpływ transportu na środowisko. Jednym z działań może być ograniczenie wielkości emisji szkodliwych związków spalin. Zanim działania zostaną wprowadzone należy przeprowadzić ich ocenę czy są słuszne i rzeczywiście pozwalają na ograniczenie negatywnego wpływu transportu na środowisko. Mogą do tego posłużyć analizy scenariuszowe. W artykule przedstawiona została analiza i ocena wielkości emisji szkodliwych związków spalin w transporcie kolejowym w porównaniu z transportem drogowym. Analizę i ocenę przeprowadzono dla lat 2014, 2015, 2020 i 2025. Uwzględniono trzy scenariusze: zwiększenie wielkości potoku ruchu do przewiezienia, zmianę kształtu sieci kolejowej oraz zmianę struktury pojazdów samochodowych. Badania przeprowadzono dla ciągu komunikacyjnego Warszawa – Łódź, w którym prowadzone są intensywne prace modernizacyjne związane z poprawą parametrów drogi kolejowej. W związku z tym wprowadzane są alternatywne rozwiązania, które mają pomóc pasażerom ale nie są przyjazne środowisku. Z tego punktu widzenia przeprowadzona zostanie analiza.

2 ISTOTA ANALIZ SCENARIUSZOWYCH

Jak wspomniano we wprowadzeniu, rzeczywisty system transportowy jest trudny do analizowania ze względu na różnorodność zjawisk oraz czynników na niego wpływających. Z jednej strony są to potrzeby zgłaszane przez nabywców usług transportowych, a z drugiej strony możliwości, techniczne, technologiczne czy finansowe dostawców usług. Biorąc pod uwagę fakt, że wszelkiego rodzaju inwestycje infrastrukturalne i suprastrukturalne są czasochłonne i kapitałochłonne to bez odpowiedniej analizy z zastosowaniem właściwych metod i narzędzi nie jest możliwy prawidłowy rozwój systemu transportowego. Jedną z metod, stosowaną również przy podejmowaniu decyzji w obszarze transportu, jest metoda scenariuszowa.

Metoda scenariuszowa polega na możliwie kompletnym opisanu badanego obiektu lub systemu z wyszczególnieniem maksymalnej liczby ważnych czynników, które na niego oddziałują, a następnie na naszkicowaniu możliwości rozwojowych i uzasadnieniu realności danych sytuacji decyzyjnych. W efekcie powstaje wiele możliwych, potencjalnych obrazów przyszłości [16], [17], [18], [19].

Scenariusze przyszłości to opisy czy obrazy rzeczywistości i zjawisk tworzone na konkretny moment w przyszłości, które w szczególności powinny zawierać [18]: opis stanu rzeczywistości na koniec ustalonego horyzontu czasu realizowanego scenariusza, interpretację bieżących zjawisk i ich konsekwen-

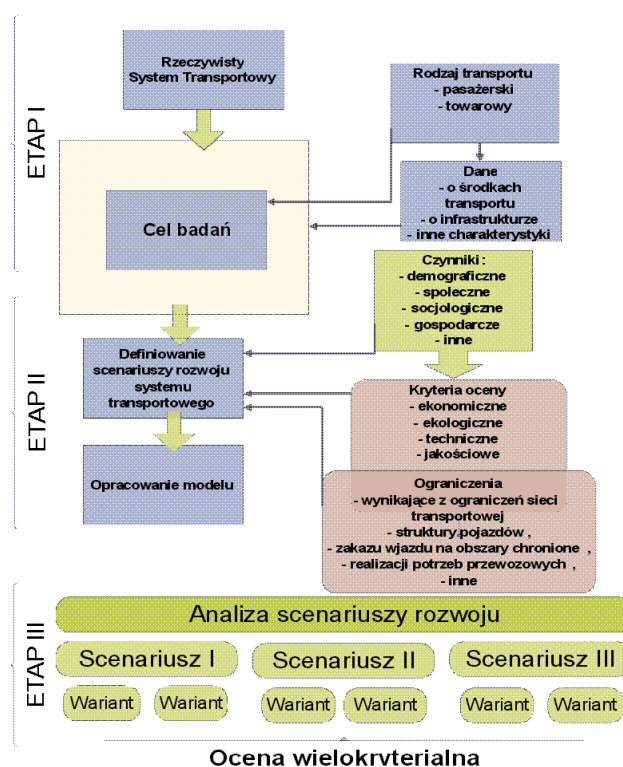
cje w przyszłości. Zatem na podstawie zaproponowanego scenariusza rozwoju danego systemu powinno się uzyskać wewnątrznie spójny obraz przyszłej rzeczywistości badanego systemu.

Zaletą analiz scenariuszowych jest to iż ze względu na możliwość badania wielu sytuacji decyzyjnych przy różnych uwarunkowaniach stanowią one rozbudowaną metodę pozwalającą na analizę ryzyka. Stosując tego rodzaju analizy możliwe jest przeprowadzenie badań równoczesnego wpływu wielu czynników na wynik oceny. Dotyczy to na przykład badania wariantów modernizacji elementów infrastruktury przy różnych założeniach i wpływu inwestycji infrastrukturalnych na zachowania nabywców i dostawców usług transportowych. Biorąc pod uwagę powyższe można stwierdzić, że planowanie scenariuszowe stanowi ważne narzędzie służące do określania czynników ryzyka oraz ustalania obszarów niepewności związanych z działalnością danej branży, organizacji, przedsiębiorstwa czy segmentu rynku.

Na podstawie analiz w różnym układzie, przy uwzględnieniu szerokiego spectrum uwarunkowań społecznych, gospodarczych, ekonomicznych itp., przedstawia się scenariusze rozwoju począwszy od bardzo negatywnych (np. zakładające zaprzestanie rozwijania produkcji silników, które są systematycznie ulepszone) do bardzo korzystnych (np. całkowite ograniczenie kursowania pojazdów posiadających silniki z normą emisji EURO 0, 1, 2, 3 i 4). Dzięki temu można ustalić czynniki, które istotnie wpływają na zachowania nabywców i dostawców usług transportowych. Oznacza to, że na przykład na podstawie analizy skrajnie negatywnych scenariuszy otoczenia systemu transportowego można opracować takie narzędzia, choćby w postaci polityki transportowej, które pozwolą na zapobieżenie prognozowanych negatywnych skutków rozwoju systemu transportowego.

Procedurę analiz scenariuszowych przedstawiono na rys. 1. Można ją podzielić na trzy główne etapy badań, zgodnie z procedurą analizy systemowej:

- etap I – sformułowanie problemu, będącego przedmiotem analiz scenariuszowych,
- etap II – etap budowy modelu oceny z wykorzystaniem metody analizy scenariuszowej, przy czym na tym etapie szczególne znaczenie ma odpowiednie przygotowanie danych do prowadzenia analiz scenariuszowych, opracowanie i wyselekcjonowanie właściwych wariantów do prowadzenia analiz oraz wybór kryteriów oceny wariantów,
- etap III – ocena wariantów na podstawie wielokryterialnej oceny uwzględniając uprzednio przygotowany układ wartości kryteriów.



Rys. 1. - Algorytm przeprowadzania analiz scenariuszowych

Na etapie formułowania problemu będącego przedmiotem analiz scenariuszowych należy sprecyzować cel badań, który chcemy osiągnąć oraz przeznaczenie badań, tj. czemu takie analizy mają służyć – czy są przeznaczone do analiz w horyzoncie długoczy krótkookresowym, czy uwzględniany jest tylko jeden rodzaj transportu czy też analiza ma służyć do badania interakcji międzygałęziowej. Wiedza ta jest istotna ze względu na uwarunkowania techniczne, technologiczne, ekonomiczne, organizacyjne i prawne, które należy wziąć pod uwagę przy definiowaniu poszczególnych wariantów rozwoju systemu transportowego (etap drugi procedury analiz scenariuszowych).

Kolejny etap procedury to budowa modelu analizy systemowej, uwzględniającego różne warianty (scenariusze) rozwoju systemu transportowego. Można powiedzieć, że jest to etap główny. Do konstruowania właściwego modelu systemu lub procesu, w tym przypadku rozwoju systemu transportowego podchodzi się iteracyjnie [14]. Na tym etapie dokonuje się ustalenia wszystkich niezbędnych czynników, które należy wziąć pod uwagę przy opracowywaniu takiego modelu (technicznych, technologicznych, ekologicznych itp.). Ważnym etapem całej procedury wyboru właściwego scenariusza rozwoju systemu transportowego jest ustalenie systemu wartościowania i wskaźników oceny jakości rozwiązania, tj. kryteriów decydena. Ocena pozytywnych i negatywnych skutków każdego z możliwych wariantów postępowania, względniąc niepewność przyszłości sprowadza się do analizy porównawczej róż-

nych scenariuszy rozwoju według zdefiniowanych kryteriów czy też wskaźników oceny. Jednym z kryteriów oceny jakości rozwiązania, jakie można zastosować w problemach modelowania proekologicznych systemów transportowych, można zastosować koszty emisji spalin przez pojazdy drogowe. Koniecznym jest ustalenie szeregu ograniczeń, które pozwolą na uzyskanie konkretnej wartości rozwiązania.

Ostatni etap to ocena wariantów na podstawie wielokryterialnej oceny uwzględniając uprzednio przygotowany układ wartości kryteriów (patrz punkt trzeci).

Problemem, który jest przedmiotem niniejszego artykułu, jest ocena z wykorzystaniem procedury analizy scenariuszowej emisji spalin w transporcie kolejowym w porównaniu z transportem drogowym. Celem analizy scenariuszowej jest zatem przeprowadzenie analizy czy transport kolejowy cechuje się większą emisją związków szkodliwych spalin czy mniejszą w stosunku do transportu samochodowego. Z wykorzystaniem modelu EMITRANSYS [10] zaimplementowanego w programie PTV VISUM przeprowadzone zostało rozłożenie potoku pasażerów na ciąg komunikacyjny Warszawa – Łódź, w którym uwzględniono transport kolejowy, autobusy i samochody osobowe. Poszczególne połączenia w sieci opisane były charakterystykami o interpretacji wielkości kosztów zewnętrznych związanych z zanieczyszczeniem powietrza. Jako wskaźnik oceny jakości rozwiązania przyjęto całkowitą wielkość kosztów zewnętrznych związanych z zanieczyszczeniem powietrza. Wyniki rozłożenia zostały przedstawione w pracy [13]. Następnie przeprowadzono ocenę emisji spalin przez dwie gałęzie transportu dla trzech scenariuszy: zwiększenia wielkości potoku pasażerów do przewiezienia, zmiany kształtu sieci kolejowej oraz zmiany struktury pojazdów. Badania wykonano do lat: 2014, 2015, 2020 i 2025.

3 METODY I NARZĘDZIA OCENY

Jak wskazano w poprzednim punkcie dla oceny rozwoju systemu transportowego sformułowana funkcja celu powinna uwzględniać współczesne poglądy na rozwiązywanie problemów transportowych oraz reprezentować racje wszystkich stron uczestniczących bezpośrednio bądź pośrednio w formułowaniu tej oceny, tj.: dostawców usług transportowych oraz nabywców usług transportowych. Należy przy tym zauważyć, że każda ze stron biorąca udział w procesie decyzyjnym reprezentuje własny cel, który jest zazwyczaj sprzeczny z celami pozostałych grup interesariuszy.

Z uwagi na różnorodny charakter cząstkowych funkcji celu reprezentowanych przez każdego uczestnika procesu decyzyjnego trudno uzyskać rozwiązanie satysfakcjonujące każdego z uczestników. W takich przypadkach korzysta się z metod wielokry-

terialnych pozwalających na ocenę decyzji z punktu widzenia wielu kryteriów. Podstawowa trudność w praktycznej realizacji koncepcji wielokryterialnej funkcji celu polega na tym, że tylko w wyjątkowych przypadkach mamy do czynienia z decyzją zapewniającą wzajemną zgodność poszczególnych cząstkowych funkcji kryteriów. Z reguły uwzględnienie w modelu wielokryterialnego programowania matematycznego więcej niż jednej funkcji kryterium nie prowadzi do jednoznacznie najlepszego rozwiązania, tj. takiego, które zapewniałoby optimum ze względu na wszystkie kryteria jednocześnie. W przypadku, gdy chodzi o wybór wariantu rozwoju zrównoważonego systemu transportowego jest to, jak wspomniano wcześniej, trudne i skomplikowane.

Aby dokonać właściwych analiz należy wykonać wiele wariantów alternatywnego rozłożenia potoku ruchu dla ustalonych scenariuszy rozwoju i na tej podstawie dokonać ich oceny, a następnie dokonać wyboru jednego z wariantów rozwoju systemu transportowego. Oczywiście wybór ten dokonywany powinien być w oparciu o układ wartości kryteriów otrzymanych dla każdego z wariantów [9].

W wyniku rozwiązania sformułowanych zadań optymalizacyjnych dla różnych funkcji kryteriów i dla różnych kompletów ograniczeń uzyskuje się niezbędne dane dla wielokryterialnej oceny rozłożenia potoku ruchu. Wyniki wielokryterialnej oceny rozłożenia potoku ruchu w sieci transportowej, przekazywane są ekspertom (decydentom) z danej dziedziny. Ich akceptacja otrzymanego rozwiązania kończy poszukiwanie rozwiązania problemu. W przypadku otrzymania wyników niezadawalających powtarza się proces formułowania zadań optymalizacyjnych uzupełniając je o dodatkowe ograniczenia lub modyfikację funkcji kryterium.

W celu przeprowadzenia wielowariantowego rozłożenia potoku pasażerów na sieć wybranego ciągu komunikacyjnego, dla przeprowadzenia oceny emisji spalin w transporcie kolejowym w porównaniu z transportem drogowym, wzięto pod uwagę kryterium kosztów zewnętrznych emisji związków szkodliwych spalin. Ich ilość i wysokość jest uzależniona od rodzaju usług, np. od rodzaju wybranego środka transportu. Kryterium to pozwala na przeanalizowanie rozłożenia potoku ruchu, gdy preferowane są technologie przewozu, dla których szkodliwe oddziaływanie na środowisko jest mniejsze niż w innych.

Kryterium kosztów zewnętrznych zanieczyszczenia powietrza dla wariantowego rozłożenia potoku można przedstawić w postaci następującego wyrażenia:

$$\forall w(t) \in \mathcal{W}(t) \quad F(\mathbf{X}(w(t))) = \sum_{(i,i') \in LE} k_{zp}((i,i'), w(t)) \cdot x((i,i'), w(t)) \longrightarrow \min \quad (1)$$

gdzie:

- t – rok, dla którego dokonano rozłożenie, $t \in \mathcal{T}$,
- $w(t)$ – numer wariantu dla roku t , $w(t) \in \mathcal{W}(t)$,
- $F(\mathbf{X}(w(t)))$ – wartość funkcji celu dla rozłożenia przeprowadzonego dla wariantu $w(t)$ wyrażona w złotych,
- (i,i') – analizowany odcinek w strukturze wybranego ciągu komunikacyjnego, $(i,i') \in LE$,
- $k_{zp}((i,i'), w(t))$ – wielkość kosztów zewnętrznych zanieczyszczenia powietrza dla analizowanego odcinka (i,i') w wariantcie $w(t)$ wyrażona w złotych na pasażera,
- $x((i,i'), w(t))$ – wielkość potoku ruchu obciążająca analizowany odcinek (i,i') w wariantcie $w(t)$ wyrażona w pasażerach.

Poszukuje się wartości minimalnej funkcji (1).

Drugim kryterium, które zostało zastosowane do oceny wielowariantowego rozłożenia ruchu dla wybranego ciągu komunikacyjnego, jest wielkość pracy przewozowej $pp(w(t))$ związanej z realizacją zadań przewozowych wyrażonej w pasażerokilometrach. Kryterium to można zapisać w następującej postaci:

$$\forall w(t) \in \mathcal{W}(t) \quad pp(w(t)) = \sum_{(i,i') \in LE} x((i,i'), w(t)) \cdot l(i,i') \quad (2)$$

gdzie:

- $pp(w(t))$ – wielkość pracy przewozowej zrealizowanej w wariantcie $w(t)$ wyrażona w pasażerokilometrach,
 - $l(i,i')$ – długość odcinka (i,i') wyrażona w kilometrach,
- pozostałe oznaczenia jak we wzorze (1).

Trzecim kryterium, które zostało zastosowane do oceny organizacji ruchu na sieci transportowej dla wariantów rozłożenia potoku ruchu, jest wielkość emisji wybranych związków szkodliwych $we(s, w(t))$ związanej z realizacją zadań przewozowych wyrażonej w gramach. Kryterium to można zapisać w postaci następującego wyrażenia:

$$\forall w(t) \in \mathcal{W}(t) \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad we(s, w(t)) = \sum_{(i,i') \in LE} em(s, (i,i'), w(t)) \cdot l(i,i') \quad (3)$$

gdzie:

- s – typ związku szkodliwego emitowanego przez środki transportu, $s \in \mathcal{S}$,
- $we(s, w(t))$ – wielkość emisji związku szkodliwego s dla wariantu $w(t)$ wyrażona w gramach,
- $em(s, (i,i'), w(t))$ – wielkość emisji związku szkodliwego s dla wariantu $w(t)$ na odcinku (i,i') wyrażona w gramach na kilometr,

pozostałe oznaczenia jak we wzorze (2).

4 OCENA EMISJI DLA CIĄGU KOMUNIKACYJNEGO WARSZAWA – ŁÓDŹ

4.1 Założenia ogólne

Porównanie wielkości emisji spalin przez transport kolejowy i samochodowy przeprowadzono na przykładzie rozłożenia potoku pasażerów na sieć stanowiącą ciąg komunikacyjny Warszawa – Łódź. Przeanalizowano połączenia kolejowe o znaczeniu ponadregionalnym (realizowane przez przewoźników PKP Intercity oraz Przewozy Regionalne) oraz drogowe – autobusy kolejowej komunikacji zastępczej PKP Intercity oraz przewoźnika PolskiBus.com a także samochody osobowe. Rozważono emisję trzech substancji: dwutlenku węgla (CO_2), tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM).

Na potrzeby badań wyodrębniono trzy zasadnicze relacje przewozu: Warszawa – Żyrardów, Warszawa – Skierniewice oraz Warszawa – Łódź. Rozłożenie potoku pasażerów w analizowanym ciągu ko-

munikacyjnym przedstawiono w pracy. W eksperymentach poszczególne elementy infrastruktury opisano charakterystykami o interpretacji wielkości kosztów zewnętrznych związanych z zanieczyszczeniem powietrza.

Rozłożenie potoku pasażerów przeprowadzono dla lat 2014, 2015, 2020 i 2025 roku. Rok 2014 przyjęto jako rok bazowy. Dla roku 2015 założono, że nastąpi zwiększenie wielkości potoku pasażerów o 2% w stosunku do roku 2014. Ponadto w związku z zakończeniem kolejnego etapu prac modernizacyjnych przyjęto, że nastąpi zmniejszenie liczby połączeń kolejowych na trasie Warszawa – Sochaczew – Skierniewice oraz Warszawa – Sochaczew – Koluszki. Ponadto dostosowano strukturę pojazdów samochodowych poruszających się po poszczególnych połączeniach w analizowanym ciągu komunikacyjnym do wartości prognozowanych na ten rok.

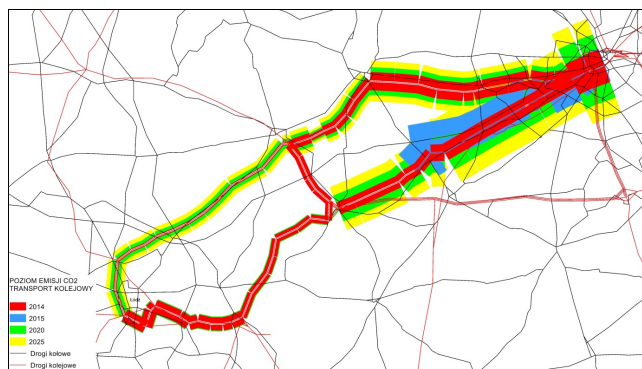
Dla roku 2020 założono, że nastąpi zwiększenie wielkości potoku pasażerów do przewiezienia w analizowanych relacjach o 5% w stosunku do roku 2014. Ponadto w związku z zakończeniem prac modernizacyjnych na linii Warszawa – Żyrardów – Skierniewice – Koluszki – Łódź, założono, że zlikwidowane zostaną połączenia Warszawa – Mszczonów – Skierniewice, Warszawa – Sochaczew – Skierniewice, Warszawa – Sochaczew – Koluszki oraz wybrane na trasie Warszawa – Sochaczew – Zgierz – Łódź. Ponadto dostosowano strukturę pojazdów samochodowych poruszających się po poszczególnych połączeniach w analizowanym ciągu komunikacyjnym do wartości prognozowanych na ten rok.

Dla roku 2025 założono, że nastąpi zwiększenie wielkości potoku pasażerów do przewiezienia w analizowanych relacjach o 8% w stosunku do roku 2014, uwzględniono kształt sieci jak w roku 2020 oraz dostosowano strukturę pojazdów samochodowych poruszających się po poszczególnych połączeniach w analizowanym ciągu komunikacyjnym do wartości prognozowanych na ten rok.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczono wielkość emisji poszczególnych analizowanych substancji: dwutlenku węgla (CO_2), tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM) związaną z realizacją dobowych zadań przewozowych. Dla transportu kolejowego oszacowano ją na podstawie ilości energii zużytej przez pociąg na pokonanie konkretnego odcinka i następnie na podstawie masy brutto danego pociągu, typowego zapelnienia oraz z wykorzystaniem danych opracowywanych przez PKP Energetyka obliczono wielkość emisji wyrażoną w kg/pasażera. Jednostkową wielkość emisji dwutlenku węgla (CO_2) dla transportu samochodowego przyjęto na podstawie opracowania (155 g/km dla samochodów osobowych oraz 450 g/km dla autobusów). Wielkość emisji cząstek stałych (PM) oszacowano na podstawie wielkości granicznych dla poszczególnych norm EURO. Wartość ta została skorygowana z wykorzystaniem współczynnika korekcyjnego k opracowanego w ramach prac nad projektem EMITRANSYS, co spowodowało uzyskanie wyników zbliżonych do emisji w rzeczywistych warunkach ruchu. Wielkość emisji tlenków azotu (NO_x) na uzyskano na podstawie zależności opracowanych także w ramach prac nad projektem EMITRANSYS.

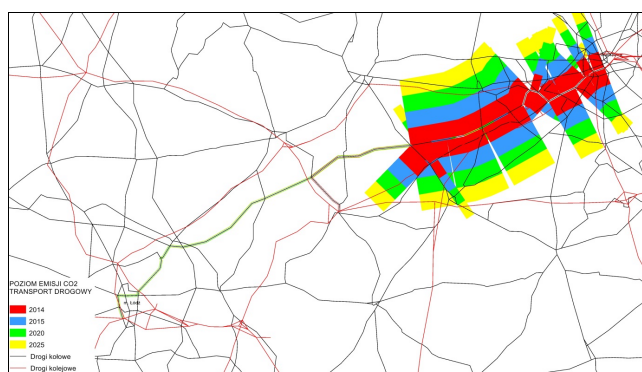
4.2 Ocena emisji spalin w analizowanych gałęziach transportu

Wielkość emisji dwutlenku węgla (CO_2) dla rozłożenia potoku ruchu z lat 2014, 2015, 2020 i 2025 dla transportu kolejowego przedstawiono na rys. 2, natomiast dla transportu samochodowego na rys. 3.



Rys. 2. - Wielkość emisji dwutlenku węgla (CO_2) przez środki transportu kolejowego w wybranym ciągu dla lat 2014, 2015, 2020 i 2025

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem modelu EMITRANSYS w PTW VISUM



Rys. 3. - Wielkość emisji dwutlenku węgla (CO_2) przez środki transportu drogowego w wybranym ciągu dla lat 2014, 2015, 2020 i 2025

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem modelu EMITRANSYS w PTW VISUM

Dla rozłożenia potoku ruchu z 2014 roku transport drogowy wyemitował do atmosfery blisko 82% całkowitej wielkości dwutlenku węgla (CO_2) związanej z realizacją dobowych zadań przewozowych w ciągu Warszawa – Łódź. 28% całkowitej wielkości zostało wyemitowane z autobusów, natomiast 54% z samochodów osobowych. Transport kolejowy odpowiedzialny jest za emisję 18% całkowitej wielkości emisji.

Porównując wielkość emisji dla rozłożenia z roku 2014 z rozłożeniem dla roku 2015 należy zauważyć, że nieznacznie zmienił się udział transportu samochodowego w całkowitej emisji dwutlenku węgla – wzrost o 1%, który został zaobserwowany dla samochodów osobowych. Udział transportu kolejowego w całkowitej emisji tej substancji zmniejszył się o 1%. Porównując wielkość emisji dla rozłożenia z roku 2020 z rozłożeniem dla roku 2014 należy zauważyć, że udział transportu samochodowego w całkowitej emisji dwutlenku węgla zmniejszył się o 10%, przy czym o 4% dla autobusów, a o 6% dla samochodów osobowych. Udział transportu kolejowego w całkowitej emisji tej substancji zwiększył się o 10%. Porównując wielkość emisji dla rozłożenia z

Tab. 1. Przebieg zmian wielkości emisji dwutlenku węgla (CO₂) w analizowanych latach

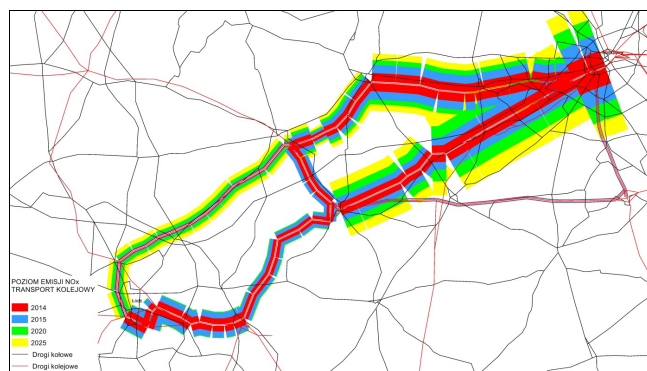
	2014		2015		2020		2025	
	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)
KOLEJ	11865	100%	12012	101%	12031	101%	10954	92%
AUTOBUS	18506	100%	19564	106%	10390	56%	12513	68%
SAMOCHÓD	36269	100%	38386	106%	20410	56%	23585	65%

Źródło: opracowanie własne

roku 2025 z rozłożeniem dla roku 2014 należy zauważyć, że udział transportu samochodowego w całkowitej emisji dwutlenku węgla zmniejszył się o 5%, przy czym o 1% dla autobusów, a o 4% dla samochodów osobowych. Udział transportu kolejowego w całkowitej emisji tej substancji zwiększył się o 5%.

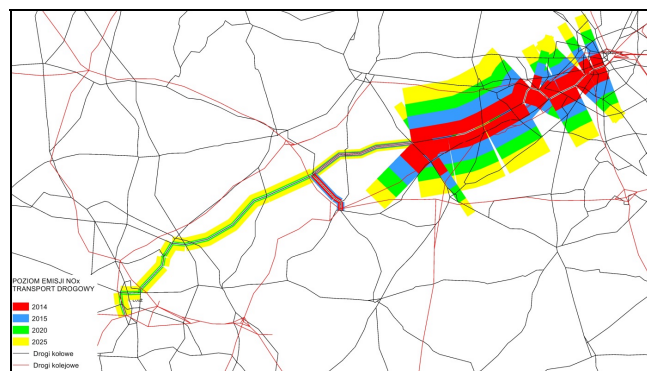
Przebieg zmian wielkości emisji dwutlenku węgla (CO₂) w analizowanych latach przez środki transportu kolejowego i drogowego przedstawiono w tab. 1. W kolumnie *Udział % (2014 = 100%)* zaprezentowano jaki procent wielkości z 2014 roku stanowi emisja dwutlenku węgla dla analizowanego roku.

Wielkość emisji tlenków azotu (NO_x) dla rozłożenia potoku ruchu z roku 2014, 2015, 2020 i 2025 dla transportu kolejowego przedstawiono na rys. 4, natomiast dla transportu samochodowego na rys. 5.



Rys. 4. - Wielkość emisji tlenków azotu (NO_x) przez środki transportu kolejowego w wybranym ciągu dla lat 2014, 2015, 2020 i 2025

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem modelu EMITRANSYS w PTV VISUM



Rys. 5. - Wielkość emisji tlenków azotu (NO_x) przez środki transportu drogowego w wybranym ciągu dla lat 2014, 2015, 2020 i 2025

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem modelu EMITRANSYS w PTV VISUM

Dla rozłożenia potoku ruchu z 2014 roku w przypadku tlenków azotu (NO_x) transport drogowy wyemitował 76% całkowitej wielkości tej substancji, przy czym 33% tej wartości wyemitowały autobusy, a 43% samochody osobowe. Udział w całkowitej emisji transportu kolejowego był na poziomie 24%.

Porównując wielkość emisji dla rozłożenia z roku 2014 z rozłożeniem dla roku 2015 należy zauważyć, że udziały w emisji tlenków azotu (NO_x) nie uległy zmianie. Porównując wielkość emisji dla rozłożenia z roku 2020 z rozłożeniem dla roku 2014 udział transportu samochodowego zmniejszył się o 14% (o 7% zarówno dla autobusów jak i dla samochodów osobowych). Przez to nastąpił wzrost udziału transportu kolejowego w emisji. Porównując wielkość emisji dla rozłożenia z roku 2025 z rozłożeniem dla roku 2014 udział transportu samochodowego zmniejszył się o 4% (dla autobusów odnotowano wzrost udziału o 7%, natomiast dla samochodów osobowych odnotowano spadek o 11%). Przez to nastąpił wzrost udziału transportu kolejowego w emisji o 4%.

Przebieg zmian wielkości emisji tlenków azotu (NO_x) w analizowanych latach przez środki transportu kolejowego i drogowego przedstawiono w tab. 2. W kolumnie *Udział % (2014 = 100%)* zaprezentowano jaki procent wielkości z 2014 roku stanowi emisja tlenków azotu dla analizowanego roku.

Wielkość emisji cząstek stałych (PM) dla rozłożenia potoku ruchu z roku 2014, 2015, 2020 i 2025 dla transportu kolejowego przedstawiono na rys. 6, natomiast dla transportu samochodowego na rys. 7.

Dla rozłożenia potoku ruchu z 2014 roku w przypadku cząstek stałych (PM) transport drogowy wyemitował 98% całkowitej wielkości tej substancji, przy czym 33% wyemitowały autobusy, a 65% samochody osobowe. Udział transportu kolejowego wyniósł 2%.

Porównując wielkość emisji dla rozłożenia z roku 2014 z rozłożeniem dla roku 2015 należy zauważyć, że udziały w emisji cząstek stałych (PM) nie uległy zmianie.

Tab. 2. Przebieg zmian wielkości emisji tlenków azotu (NO_x) w analizowanych latach

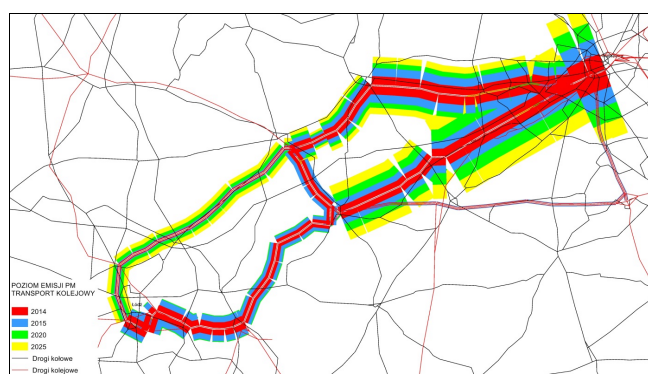
	2014		2015		2020		2025	
	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)
KOLEJ	27,53	100%	27,87	101%	27,91	101%	25,41	92%
AUTOBUS	37,61	100%	38,38	102%	18,95	50%	35,52	94%
SAMOCHÓD	49,49	100%	51,17	103%	26,57	54%	28,44	57%

Źródło: opracowanie własne

Tab. 3. Przebieg zmian wielkości emisji cząstek stałych (PM) w analizowanych latach

	2014		2015		2020		2025	
	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)	Emisja [kg]	Udział % (2014 = 100%)
KOLEJ	0,85	100%	0,87	101%	0,87	101%	0,79	92%
AUTOBUS	15,47	100%	16,17	104%	8,44	55%	9,14	59%
SAMOCHÓD	30,46	100%	31,71	104%	16,58	54%	17,19	56%

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. - Wielkość emisji cząstek stałych (PM) przez środki transportu kolejowego w wybranym ciągu dla lat 2014, 2015, 2020 i 2025

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem modelu EMITRANSYS w PTV VISUM

Porównując wysokość emisji dla rozłożenia z roku 2020 z rozłożeniem dla roku 2014 nastąpiło zmniejszenie udziału w emisji tylko dla samochodów osobowych i tylko o 1%. Porównując wielkość emisji dla rozłożenia z roku 2025 z rozłożeniem dla roku 2014 zmniejszenie udziału w emisji nastąpiło tylko dla samochodów osobowych i tylko o 1%. Dla autobusów odnotowano wzrost udziału o 1%, natomiast dla samochodów osobowych odnotowano spadek o 2%.

Przebieg zmian wielkości emisji cząstek stałych (PM) w analizowanych latach przez środki transportu kolejowego i drogowego przedstawiono w tab. 3. W kolumnie *Udział % (2014 = 100%)* zaprezentowano jaki procent wielkości z 2014 roku stanowi emisja cząstek stałych dla analizowanego roku.

5 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Problem ochrony środowiska w dzisiejszych czasach jest niezwykle ważkim problemem. Konieczność wzięcia go pod uwagę podkreślana jest w wielu aktach prawnych, zarówno na poziomie krajowym jak i europejskim. Jedną z gałęzi gospodarki

narodowej, która w dość dużym stopniu wpływa negatywnie na środowisko, jest transport. Należy zatem poszukiwać narzędzi, które pomogą ograniczyć negatywny wpływ transportu na środowisko. Jednym z działań może być przeniesienie potoku ruchu do przewiezienia przez gałąź, która oddziałuje w sposób większy na środowisko na gałęzi oddziałujące w sposób mniejszy.

W artykule przedstawiono problem badania wielkości emisji wybranych związków szkodliwych dla rozłożenia potoku ruchu względem kryterium minimalizacji kosztów zewnętrznych związanych z emisją związków szkodliwych spalin przez środki transportu. Dla wszystkich analizowanych lat przy założonej wielkości zadań przewozowych oraz ustalonej strukturze sieci transportowej największą emisyjnością cechował się transport samochodowy. Rozróżniając w zakresie transportu samochodowego autobusy i samochody osobowe większą emisyjnością cechowała się ta druga grupa. Najmniejszą emisyjnością cechował się transport kolejowy. Dla dwutlenku węgla (CO₂) stosunek udziału transportu samochodowego do transportu kolejowego w całkowitej wielkości emisji wynosił około 4:1. Proporcja ta dla tlenków azotu (NO_x) wynosiła około 3:1, natomiast dla cząstek stałych (PM) około 49:1.

Największa emisja zarówno dwutlenku węgla (CO₂), tlenków azotu (NO_x) i cząstek stałych (PM) została odnotowana dla rozłożenia potoku ruchu z 2015 roku. Oznacza to, że zwiększenie potoku ruchu do przewiezienia przy zmodyfikowanej strukturze pojazdów samochodowych i lekkiej modyfikacji struktury sieci kolejowej spowodowało wzrost emisji. Dopiero likwidacja wybranych połączeń kolejowych spowodowała zmniejszenie całkowitej wielkości emisji.

Kształtowanie zrównoważonego rozwoju systemu transportowego powinno integrować cele spo-

łeczne, ekologiczne i gospodarcze, które są rozpatrywane zarówno z punktu widzenia polityki transportowej poszczególnych państw, jak i całej Unii Europejskiej. Zatem z punktu widzenia emisji spalin najlepszym rozłożeniem jest rozłożenie dla roku 2020, gdy nastąpi zwiększenie wielkości potoku pasażerów do przewiezienia. Ponadto w związku z zakończeniem prac modernizacyjnych na linii Warszawa – Żyrardów – Skierniewice – Koluszki – Łódź, założono, że zlikwidowane zostaną połączenia Warszawa – Mszczonów – Skierniewice, Warszawa – Sochaczew – Skierniewice, Warszawa – Sochaczew – Koluszki oraz wybrane na trasie Warszawa – Sochaczew – Zgierz – Łódź.

Bibliografia

- [1] Ambroziak T., Gołębiowski P., Woźniak K., Jacyna-Golda I., Jachimowski R., Kłodawski M., Lewczuk K., Szczepański E.: *Wariantowe rozłożenie potoku ruchu w zadanej sieci przy uwzględnieniu kosztów zewnętrznych*. *Logistyka*, 2014, nr 4, str. 1605-1616.
- [2] Ambroziak T., Jachimowski R., Pyza D., Szczepański E.: *Analysis of the traffic stream distribution in terms of identification of areas with the highest exhaust pollution*. *Archives of Transport*, 2014, cz. 32, nr 4, str. 7-16.
- [3] Burak-Romanowski R., Woźniak K.: *Energetyczne aspekty modernizacji linii kolejowych*. *Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika*. 2011, cz. 108, str. 13-29.
- [4] Burton I.: *Report on Reports: Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1987, cz. 29 nr 5, str. 25-29
- [5] European Environment Agency: *Transport emissions of air pollutants (TERM 003)*.
- [6] Jacyna M.: *Some aspects of multicriteria evaluation of traffic flow distribution in a multimodal transport corridor*. *Archives of Transport*, 1998, cz.10 nr 1-2, str. 37-52.
- [7] Jacyna M., Merkisz J.: *Kształtowanie systemu transportowego z uwzględnieniem emisji zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego*. Warszawa – Poznań, 2014.
- [8] Jacyna M., Merkisz J.: *Proecological approach to modelling traffic organization in national transport system*. *Archives of Transport*, 2014, cz. 30, nr 2, str. 31-41.
- [9] Jacyna M., Wasiak M.: *Metoda wielokryterialnej oceny wariantów realizacji inwestycji infrastrukturalnych w transporcie*. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 2007, z. 63, str.119-124.
- [10] Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Kłodawski M.: *Simulation model of transport system of Poland as a tool for developing sustainable transport*. *Archives of Transport*, 2014, cz. 31, nr 3, str. 23-35.
- [11] Jacyna-Golda I., Gołębiowski P., Jachimowski R., Kłodawski M., Lewczuk K., Szczepański E., Sivets O., Merkisz-Guranowska A., Pielecha J.: *Traffic Distribution into Transport Network for Defined Scenarios of Transport System Development in Aspect of Environmental Protection*. *Journal of KONES*, 2014, t. 21, nr 4, str. 183-192.
- [12] Jacyna-Golda I., Lewczuk K., Szczepański E., Gołębiowski P.: *Rozłożenie ruchu w sieci transportowej z zastosowaniem modelu EMITRANSYS w aspekcie scenariuszy rozwoju systemu transportowego*. Warszawa – Poznań, 2014.
- [13] Jacyna-Golda I. Żak J., Gołębiowski P.: *Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system*. *Archives of Transport*, 2014, cz. 31, nr 3, str. 17-28.
- [14] Leszczyński J.: *Modelowanie systemów i procesów transportowych*. Warszawa, 1999.
- [15] Ministerstwo Infrastruktury: *Polityka Transportowa Państwa na lata 2006 – 2025*, [online], [dostęp 10 maja 2015 r.], dostępny w Internecie: <http://transport.gov.pl>
- [16] Pisano G.: *Knowledge, integration, and the locus of learning: An empirical analysis of process development*. *Strategic Management Journal*, 1997, cz. 15 nr 2, str. 85–100.
- [17] Porter M.: *Strategia konkurencji. Metody analizy sektorów i konkurentów*. Warszawa, 1998.
- [18] Van Der Heijden K., Bradfield R., Burt G., Cairns G., Wright G.: *The Sixth Sense: Accelerating Organisational Learning with Scenarios*. Wiley, 2002.
- [19] Worthington W., Collins J., Hitt M.: *Beyond risk mitigation: Enhancing corporate innovation with scenario planning*. *Business Horizons*, 2009, cz. 52, str. 1-10.
- [20] http://nfosigw.gov.pl/download/gfx/nfosigw/pl/nfoopisy/812/2/4/zal_2_do_regulaminu_czesc_b.1_metodyka.pdf
- [21] www.pkpenergetyka.pl/pl/strona/241-wielkosc-emisji