

Piotr Gołębiowski¹, Ilona Jacyna-Golda², Roland Jachimowski³, Konrad Lewczuk⁴, Michał Kłodawski⁵,
Emilian Szczepański⁶
Politechnika Warszawska

Wybrane aspekty kształtowania zrównoważonego systemu transportowego⁷

W 1987 roku Światowa Komisja Środowiska i Rozwoju Organizacji Narodów Zjednoczonych (*World Commission on Environment and Development*) w opublikowanym raporcie [32] zauważyła, że osiągnięto taki poziom dobrobytu, który jest możliwy do zachowania pod warunkiem utrzymania odpowiedniego stanu gospodarki. Możliwe jest to poprzez wprowadzenie do gospodarowania zasady zrównoważonego rozwoju, czyli rozwoju, w którym potrzeby obecnego pokolenia mogą być zaspokojone bez umniejszania szans przyszłych pokoleń na ich zaspokojenie [32]. Pojęcie zrównoważonego rozwoju było kilkakrotnie modyfikowane przez Organizację Narodów Zjednoczonych [28], [29].

W związku z powyższym idea zrównoważonego rozwoju stała się jednym z głównych celów, które znalazły się w polityce Unii Europejskiej. Przyczynami wprowadzenia polityki w tym kierunku są między innymi [10]:

- zbyt duże uzależnienie się od paliw kopalnych, co zagraża bezpieczeństwu gospodarczemu i negatywnie oddziałuje na środowisko naturalne oraz na społeczeństwo,
- stale rosnące zapotrzebowanie na zasoby naturalne, co zwiększa presję na środowisko,
- postępujące zmiany klimatu spowodowane między innymi emisją dwutlenku węgla oraz występowaniem klęsk żywiołowych, oddziałujących destrukcyjnie na gospodarkę,
- zbyt powolnie rozwijająca się konkurencyjność, która może być zwiększana poprzez zastosowanie rozwiązań ekologicznych, takich jak między innymi zastosowanie innowacyjnych źródeł energetycznych.

Polska, jako jeden z krajów członkowskich Unii Europejskiej, także realizuje założenia polityki zrównoważonego rozwoju. Zostało to zagwarantowane w Konstytucji Rzeczypospolitej Polskiej. W prawodawstwie polskim poprzez zrównoważony rozwój [30] rozumie się taki rozwój społeczno-gospodarczy, w którym następuje proces integrowania działań politycznych, gospodarczych i społecznych, z zachowaniem równowagi przyrodniczej oraz trwałości podstawowych procesów przyrodniczych, w celu zagwarantowania

możliwości zaspokajania podstawowych potrzeb poszczególnych społeczności lub obywateli, zarówno współczesnego pokolenia, jak i przyszłych pokoleń.

W powyższych definicjach wyodrębnić można 3 aspekty, które powinny gwarantować odpowiedni poziom zrównoważonego rozwoju gospodarki – zarówno polskiej, jak i europejskiej czy światowej. Są to aspekty środowiskowe, ekonomiczne oraz społeczne. Oznacza to, że poszczególne działy gospodarki powinny efektywniej korzystać z zasobów, w minimalnym stopniu oddziaływać na środowisko oraz być bardziej konkurencyjne w stosunku do stanu obecnego.

Jednym z działów gospodarki narodowej jest transport. Jest on więc także objęty zasadami zrównoważonego rozwoju. Z tego wynika, że należy dążyć do efektywnego wykorzystania zasobów transportu (suprastruktury oraz infrastruktury), minimalizacji wpływu na środowisko naturalne oraz wzmacniać jego konkurencyjność.

Problematyka zrównoważonego systemu transportowego

We wszystkich dokumentach wyrażających stanowisko krajów Unii Europejskiej oraz Polski w zakresie transportu pojawia się koncepcja tak zwanego zrównoważonego transportu. Zrównoważony system transportowy można zdefiniować jako taki system, który zapewnia równowagę między czynnikami społecznymi i gospodarczymi, a rozwojem przestrzennym i ochroną środowiska w danym kraju. Na tej podstawie można stwierdzić, że zrównoważony system transportowy to taki, w którym nie tylko uwzględniane są czynniki gospodarcze i społeczne, lecz także i problemy dotyczące ochrony środowiska.

W literaturze występuje wiele definicji zrównoważonego systemu transportowego. Definicją, która została zaaprobowana przez największe grono specjalistów, jest następująca [2], [23]: System zrównoważonego transportu to taki system, który:

- umożliwia spełnienie podstawowej potrzeby dostępu do niego (systemu transportowego – TB) przez jednostki i społeczeństwa, w sposób bezpieczny i spójny z potrzebami zdrowia ludzkiego i ekosystemów oraz odpowiada wymogom wartości kapitałowych w obrębie danego pokolenia i w skali międzypokoleniowej,
- jest przystępny cenowo, skutecznie funkcjonuje, oferuje wybór środków transportu oraz wspiera prężnie rozwijającą się gospodarkę,
- ogranicza emisje i odpady z uwzględnieniem możliwości planety do ich absorpcji, minimalizuje zużycie zasobów nieodnawialnych, ogranicza konsumpcję zasobów odnawialnych do poziomu zrównoważenia, przetwarza i wó-

¹ Mgr inż. P. Gołębiowski, asystent, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Logistyki i Systemów Transportowych.

² Dr inż. I. Jacyna-Golda, adiunkt, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Organizacji Systemów Produkcyjnych.

³ Dr inż. R. Jachimowski, adiunkt, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Logistyki i Systemów Transportowych.

⁴ Dr inż. K. Lewczuk, adiunkt, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Logistyki i Systemów Transportowych.

⁵ Dr inż. M. Kłodawski, adiunkt, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Logistyki i Systemów Transportowych.

⁶ Mgr inż. E. Szczepański, asystent, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Logistyki i Systemów Transportowych.

⁷ Praca naukowa zrealizowana w ramach projektu badawczego pt. „Kształtowanie proekologicznego systemu transportowego” (EMITRANSYS), nr PBS1/A6/2/2012 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Artykuł recenzowany.

nie wykorzystuje ich komponenty oraz minimalizuje wykorzystanie gruntów, a także ogranicza natężenie hałasu.

Definicja ta wskazuje, że transport zrównoważony musi odzwierciedlać w stopniu równomiernym zróżnicowane cele gospodarcze, społeczne i środowiskowe.

Polska nie osiągnęła jeszcze równowagi w rozwoju systemu transportowego. Świadczą o tym zadania wyznaczane w aktualnych dokumentach dotyczących polityki transportowej. Do głównych problemów polskiego transportu, które powinny być rozwiązane do roku 2025, należą [20]:

- zatłoczenie dróg – zwłaszcza krajowych i dróg w obszarach dużych aglomeracji,
- rosnący negatywny wpływ na środowisko naturalne i cywilizacyjne,
- wysoki poziom zagrożenia zdrowia i życia w transporcie, zwłaszcza drogowym,
- zły stan infrastruktury technicznej – zwłaszcza drogowej,
- niska produktywność kolei i mała konkurencyjność,
- zagrożenia wynikające z otwarcia rynku.

Jeden z problemów dotyczy negatywnego wpływu na środowisko naturalne i cywilizacyjne. Wyraża się on poprzez [20]:

- 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.

Oprócz neutralizacji negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne i cywilizacyjne przez sferę transportu istnieje konieczność pokonania wyzwań i ograniczeń zewnętrznych związanych z ekologią. Można do nich zaliczyć [21]:

- unijną politykę ochrony środowiska, w tym w szczególności politykę dotyczącą klimatu oraz ograniczeń emisyjnych (w tym emisji gazów cieplarnianych),
- nasilającą się walkę o dostęp do coraz bardziej ograniczonych zasobów paliw kopalnych (ropa, gaz), co przekłada się na szybki wzrost cen paliw i tym samym pogarszanie efektywności ekonomicznej transportu, a w szerszym wymiarze – konkurencyjności całej gospodarki,
- zmiany klimatyczne, które negatywnie oddziałują zarówno na infrastrukturę jak i na usługi transportowe,
- konieczność zachowania różnorodności biologicznej i swobodnej migracji gatunków.

Z dokumentów polityki transportowej oraz strategii rozwoju transportu wynika, że wymienione powyżej problemy powinny zostać zminimalizowane do 2025 roku. Należy poszukiwać narzędzi, które będą wspierały realizację celów polityki transportowej Polski oraz strategii rozwoju transportu, zwłaszcza w aspekcie środowiskowym. W październiku 2012 roku na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, wspólnie z Instytutem Silników Spalinowych i Transportu na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej, rozpoczęto realizację projektu EMI-TRANSYS, dotyczącego kształtowania systemu transportowego w aspekcie proekologicznym. Finansowany jest on ze środków na naukę przez Narodowe Centrum Badań i Rozwo-

ju. Wymiernym efektem projektu będzie między innymi opracowanie wytycznych w zakresie kształtowania proekologicznego (zrównoważonego) systemu transportowego. Ich opracowanie będzie możliwe dzięki wieloaspektowej analizie z zastosowaniem implementacji komputerowej modelu matematycznego kształtowania proekologicznego systemu transportowego w środowisku PTV Visum.

Tematyka realizowanego projektu dotyczy planowania zrównoważonego transportu – zarówno gałęzi transportu kolejowego, samochodowego, jak i lotniczego. Planowanie to polega na rozłożeniu potoku ruchu (zarówno pasażerów, jak i ładunków) na sieć transportową w taki sposób aby między innymi spełniony był warunek minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko. W krajowej jak i światowej literaturze opisano wiele różnych podejść do planowania. W [9] porównano procesy projektowania rozwoju w Wielkiej Brytanii i Holandii oraz przedstawiono korzyści planowania strategicznego. Omówiono także sposób planowania rozwoju z wykorzystaniem zarządzania popytem na drogach [31], a także na podstawie szacowania śladu ekologicznego, pozostawianego przez podróże samochodowe [5]. Analizowano także, w jaki sposób można ograniczyć emisję dwutlenku węgla w miastach i zaproponowano, że jedną z metod jest wprowadzenie strategii zrównoważonego rozwoju [22]. Do programowania stosuje się także metodę budowy różnych scenariuszy [26]. Istotnym problemem dotyczącym badania zrównoważonego rozwoju transportu jest poszukiwanie (projektowanie) syntetycznych wskaźników oceny [1], [7], [17], [27]. Poddawano także analizie czynniki, które mają wpływ na wskaźniki oceny zrównoważonego rozwoju transportu [25].

Wskaźniki oceny zrównoważonego systemu transportowego

Ocena jakości systemu transportowego w aspekcie jego zrównoważonego rozwoju jest zadaniem niebanalnym. Wynika to głównie z szeregu czynników, jakie należy uwzględnić dokonując tej oceny. Czynniki te należy rozpatrywać w aspekcie ekonomicznym, społecznym i środowiskowym. Tak więc zrównoważony rozwój transportu jest ideą transportu spełniającego oczekiwania społeczeństwa, korzystnego ekonomicznie, minimalizującego jednocześnie szkodliwy wpływ środków transportu na środowisko.

Ekonomiczne wskaźniki oceny zrównoważonego systemu transportowego są bezpośrednio związane z kosztem przemieszczania. Na koszt ten składają się między innymi [12]:

- koszt przemieszczania pojazdów,
- koszt utrzymania infrastruktury punktowej i liniowej,
- koszt budowy i modernizacji elementów infrastruktury transportowej.

Inne ekonomiczne wskaźniki oceny zrównoważonego rozwoju systemu transportowego odnoszą się do struktury przewozów realizowanych w tym systemie oraz infrastruktury transportowej.

Wśród wskaźników oceny struktury realizowanych przewozów wyróżnia się [13]:

- *wskaźnik udziału pracy przewozowej dla danego rodzaju transportu* – wyznaczający udział pracy przewozowej określonego rodzaju transportu w pracy przewozowej zrealizowanej przez wszystkie rodzaje transportu ogółem,

- *wskaźnik udziału pracy przewozowej dla danego rodzaju transportu w założonym obszarze* – wyznaczający udział pracy przewozowej określonego rodzaju transportu dla ustalonego obszaru w zrealizowanej na tym obszarze pracy przewozowej ogółem.

Z kolei do wskaźników oceny infrastruktury transportowej zaliczyć należy:

- *wskaźnik udziału drogi określonej kategorii w infrastrukturze liniowej według rodzajów transportu* – określający udział długości drogi danej kategorii w długości dróg ogółem dla poszczególnych rodzaju transportu w Polsce,
- *wskaźnik dostępności przestrzennej poszczególnych rodzajów transportu* – charakteryzujący dostępność przestrzenną rodzajów transportu dla nadawców i odbiorców ładunku,
- *wskaźnik wykonanej pracy przewozowej* – określający wielkość wykonanej pracy przewozowej na km infrastruktury liniowej; może być on używany w porównaniach międzyrodzajowych,
- *wskaźnik wykorzystania pojazdu danej klasy* – określający przeciętne zapelnienie środka transportu.

W aspekcie środowiskowym i społecznym wskaźniki oceny jakości zrównoważonego systemu transportowego związane są z kosztami zewnętrznymi transportu, odnoszonymi się do [11]:

- emisji zanieczyszczeń,
- emisji hałasu,
- wypadków,
- kongestii.

Pozwalają one na ocenę oddziaływania ruchu na otoczenie infrastruktury transportowej.

Wskaźnikami umożliwiającymi ocenę jakości systemu transportowego z punktu widzenia emisji zanieczyszczeń, są:

- *wskaźnik natężenia emisji całkowitej zanieczyszczenia w rozpatrywanym obszarze,*
- *wskaźnik przekroczenia dopuszczalnej wielkości emisji związków szkodliwych danego typu dla danego rodzaju pojazdu,*
- *wskaźnik długości dróg przebiegających na terenach chronionych w infrastrukturze liniowej według rodzajów transportu,*
- *wskaźnik liczby środków transportowych spełniających daną normę emisji spalin.*

Wskaźnikami umożliwiającymi ocenę jakości systemu transportowego z punktu widzenia emisji hałasu są:

- *wskaźnik strat produktywności człowieka w wyniku braku koncentracji,*
- *wskaźnik strat produktywności człowieka w wyniku zmęczenia, braku snu, wypoczynku,*
- *wskaźnik wzrostu ilości świadczeń opieki zdrowotnej.*

Z kolei wskaźnikami umożliwiającymi ocenę jakości systemu transportowego z punktu widzenia wypadków są między innymi:

- *wskaźnik wszystkich wypadków na danym obszarze,*
- *wskaźnik wypadków śmiertelnych na danym obszarze,*
- *wskaźnik wypadków z udziałem pieszych,*
- *wskaźnik wypadków z udziałem rowerzystów.*

Z punktu widzenia kongestii wskaźnikami umożliwiającymi ocenę jakości systemu transportowego są:

- *wskaźnik natężenia ruchu na danym obszarze,*
- *wskaźnik przepustowości połączeń transportowych,*

- *wskaźnik przeciętnej prędkości ruchu,*
- *wskaźnik zatłoczenia.*

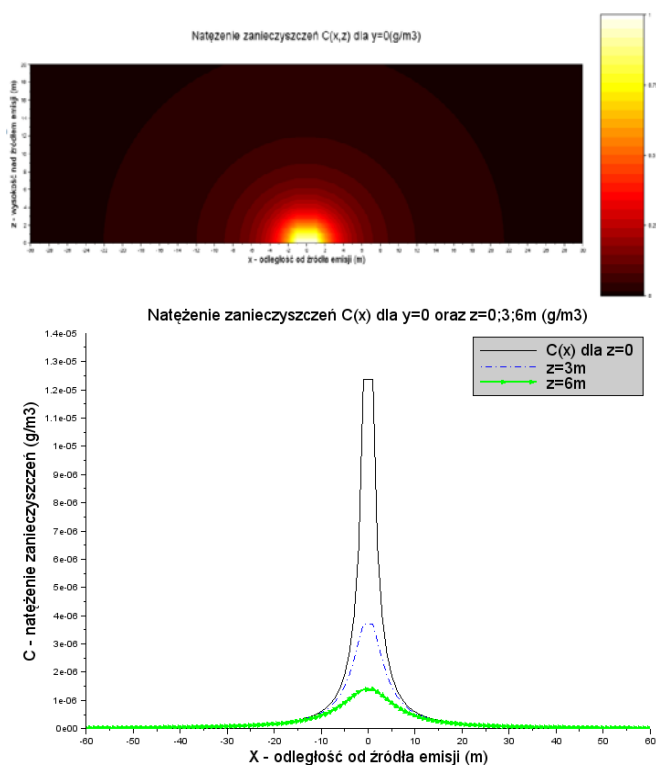
Emisja i dyspersja zanieczyszczeń w zrównoważonym systemie transportowym

Problematyka oddziaływania transportu na otoczenie jest jednym z najważniejszych obszarów zainteresowania polityki zrównoważonego rozwoju. Jak wskazano wcześniej, wśród negatywnych efektów transportu można wymienić emisję zanieczyszczeń, emisję hałasu, kongestię, obniżenie komfortu życia społeczeństw, czy spadek bezpieczeństwa na drogach. Ciągły wzrost zapotrzebowania na transport wymaga podjęcia kroków pozwalających na ograniczenie jego negatywnych efektów. Aby umożliwić postęp w tym kierunku, konieczne jest poznanie mechanizmów oraz zbadanie problemów związanych z emisją zanieczyszczeń, a także z ich dyspersją w różnych ośrodkach [18], [19].

Badanie emisji zanieczyszczeń jest złożonym procesem i wymaga zastosowania specjalistycznych urządzeń. Występują różne metody prowadzenia badań, ale najbardziej intuicyjną klasyfikacją jest podział na badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych i w warunkach rzeczywistych [6], [15], [33]. Badania laboratoryjne realizowane są na hamowniach podwoziowych lub silnikowych. Charakteryzują się one powtarzalnością wykonywanych pomiarów, co jest spowodowane możliwością zagwarantowania jednakowych warunków – zarówno środowiskowych, jak i parametrów pracy. Pomiaru pozwalają zatem na porównanie wpływu różnych czynników na emisję związków szkodliwych. Pomiaru realizowane w rzeczywistych warunkach ruchowych pojazdu realizowane są w oparciu o różne techniki, wśród których można wyróżnić pomiary w tunelu, teledetekcji, pomiary typu on-road oraz on-board. Badania tunelowe polegają na pomiarze emisji zanieczyszczeń oraz ich składu przez przejeżdżający przez tunel pojazd. Wyniki takiego pomiaru następnie są aproksymowane do emisji zanieczyszczeń w odniesieniu do strumienia pojazdów. Dużą zaletą tego typu badań jest uniknięcie wpływu wiatru. Pomiar z wykorzystaniem teledetekcji polega na umieszczeniu detektorów wzdłuż drogi. Pozwalają one na ocenę słuza spalin, główną zaletą tego typu pomiarów jest możliwość badania dużej liczby pojazdów w krótkim czasie. Pomiaru typu on-road polegają na umieszczeniu aparatury badawczej (analyzerów spalin itp.) na pojeździe bądź naczepie specjalnej, która podczas pomiaru poprzedza badany pojazd. W przypadku badań on-board aparaturę badawczą umieszcza się na pojeździe badanym. Zaletą tego typu badań jest niewątpliwa mobilność pojazdu oraz możliwość realizacji pomiarów z uwzględnieniem rzeczywistych warunków ruchu, a także różnych jego wariantów. Odzwierciedlają one faktyczną emisję związków szkodliwych do otoczenia [6], [15], [19].

Badania, realizowane na potrzeby projektu EMITRAN-SYS, są badaniami rzeczywistymi typu on-board. Prowadzone są przez Politechnikę Poznańską w obszarze miasta Poznań oraz na autostradzie A2. Celem prowadzonych badań jest wyprowadzenie zależności funkcyjnych, uwzględniających typ pojazdu, napędu oraz warunków ruchu na emisję zanieczyszczeń. Pozwoli to na modelowanie emisji zanieczyszczeń w krajowej sieci transportowej, odwzorowanej w PTV Visum.

Bardzo ważnym zagadnieniem, związanym z emisją zanieczyszczeń, jest ich dyspersja w środowisku. Badania takie mogą obejmować rozprzestrzenianie w glebie, wodzie czy powietrzu. W ramach projektu prowadzone są prace polegające na dobraniu odpowiedniego modelu dyspersji w celu estymowania przebiegu tego zjawiska. Modele opisujące powyższe zjawisko można podzielić pod względem na przykład: równań transportu – Gaussowskie, Eulerowskie, Lagrangowskie), skalę prowadzonych badań, czy uwzględnianych parametrów atmosferycznych [16]. Realizacja prac w projekcie wymagała dopasowania modelu do charakteru i skali problemu. W związku z tym, do szacowania dyspersji zanieczyszczeń posłużono się modelem CAR FMI. Z założenia model ten służy do prowadzenia badań w skali mikro, czyli w poziomie drogi, co umożliwi przedstawienie skali zjawiska dla sieci transportowej odwzorowanej w PTV Visum [14]. Przykładowe wykresy dotyczące emisji zanieczyszczeń dla tlenków azotu NO_x przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Dyspersja związku NO_x w płaszczyźnie przekroju poprzecznego drogi bez uwzględnienia wpływu wiatru. Źródło: [14].

Prowadzenie badań związanych z dyspersją pozwala na ocenę zasięgu oddziaływania transportu na otoczenie. Umożliwia to również ocenę jakości powietrza w otoczeniu drogi. W przyszłych badaniach, w oparciu o badania emisji zanieczyszczeń oraz dyspersji, możliwe będzie wskazanie obszarów, w których niezbędne jest stosowanie narzędzi w postaci infrastruktury, regulacji prawnych itp., zmniejszających negatywny wpływ transportu na otoczenie.

Wykorzystanie narzędzi informatycznych do kształtowania zrównoważonego rozwoju systemu transportowego

Dążenie do zrównoważonego systemu transportowego opiera się na odpowiednim jego ukształtowaniu i organizacji, w sposób umożliwiający uzyskanie takiego zapotrzebowania na transport i podziału środków, dla których ograniczone zostaną utrudnienia w dostępie użytkowników do systemu, przy równoczesnej redukcji zatłoczenia systemu i jego nadmiernej uciążliwości dla otoczenia. Badania nakierowane na uzyskanie wyżej wymienionych celów bardzo często realizowane są z wykorzystaniem narzędzi informatycznych, umożliwiających modelowanie systemów transportowych, a następnie prowadzenie na nich eksperymentów. Przykładem takiego oprogramowania jest narzędzie PTV Visum.

PTV Visum jest narzędziem komputerowym wspomagającym planowanie procesów transportowych oraz analizę i projektowanie systemu transportowego. Wspomaganie procesu planowania transportu przez Visum polega na ocenie sytuacji bieżącej i projektowaniu nowych wariantów analizowanych modeli. Czynności te dzielone są pomiędzy badacza a środowisko Visum. Pierwszy z nich ma możliwość sukcesywnego ulepszania swojego modelu, mającego jak najlepiej odwzorowywać stan istniejący badanego obiektu, podczas gdy narzędzie PTV, wykorzystując odpowiednie procedury i algorytmy, ocenia jakość proponowanego przez badacza rozwiązania. W rezultacie w wyniku takiego procesu opracowywany jest model odpowiedni dla decyzji podejmowanych w świecie rzeczywistym [13].

Na potrzeby kształtowania zrównoważonego rozwoju systemu transportowego opracowano model systemu transportowego Polski w Visum. W tym przypadku narzędzie PTV miało za zadanie wspomaganie badaczy w planowaniu i konstruowaniu systemu transportowego z punktu widzenia ilości emitowanych do środowiska zanieczyszczeń (stopnia zanieczyszczenia otoczenia systemu transportowego) przez jego użytkowników, czyli uczestników ruchu w sieci transportowej. Opracowany model systemu transportowego podzielony został na dwa współzależne modele:

- sieci – odwzorowującej infrastrukturę punktową i liniową systemu transportowego oraz opisującej dostępność użytkowników systemu do poszczególnych gałęzi i środków transportu (rysunek 2a). Składa się on z:
 - odcinków dróg kołowych, kolejowych, śródlądowych, korytarzy powietrznych itd.,
 - węzłów będących ich końcami, początkami, bądź elementami połączeniowymi,
 - węzłów odwzorowujących istotne z punktu widzenia badań elementy sieci (na przykład miejsca zmiany określonych charakterystyk odcinka, miejsca zanikania, pojawiania się lub przekształcania jednostek potoku ruchu, miejsca możliwości zmiany gałęzi transportu przez użytkowników systemu),
 - rejonów komunikacyjnych, węzłów i przystanków transportu publicznego,
 - odcinków i linii transportu publicznego wraz z rozkładami jazdy itp.
- popytu – zawierający informacje o potrzebach przewoźowo – transportowych, analizowanych w modelu jednostek potoku ruchu (zapotrzebowanie na podróże pasażerów oraz ładunków na przewóz pomiędzy określonymi rejonami sieci).

Ze względu na znaczenie infrastruktury transportowej w zaspokajaniu potrzeb przewozowych osób oraz ładunków w modelu uwzględniono drogi krajowe i wojewódzkie oraz linie kolejowe i użytkowane szlaki śródlądowe i powietrzne (informacje na temat ich rzeczywistego przebiegu, a także wartości charakterystyk i parametrów istotnych z punktu widzenia prowadzonych badań). Sieci transportowe poszczególnych rodzajów transportu zostały na siebie nałożone oraz połączone w odpowiednich węzłach, umożliwiając tym samym użytkownikom systemu transportowego zmianę gałęzi transportu podczas podróży.

Oprócz parametryzacji infrastruktury transportowej w modelu zaimplementowano także dane dotyczące przebiegu linii kolejowych i autobusowych o znaczeniu regionalnym i międzyregionalnym, a także rozkłady jazdy poruszających się po nich pojazdów transportu publicznego.

Opracowanie modelu zrównoważonego rozwoju systemu transportowego wymagało również scharakteryzowania środków transportu różnych gałęzi, jakie wykorzystywano w systemie do przemieszczania osób i ładunków. W tym celu w modelu uwzględniono szereg różnych typów pojazdów: motorowerów, samochodów osobowych, autobusów, pojazdów ciężarowych i dostawczych, elektryczne zespoły trakcyjne, jak również składy pociągów wyposażone w elektryczne i spalinowe lokomotywy. Dodatkowo w modelu zaimplementowano zależności funkcyjne opisujące poziom emisji wybranych szkodliwych składników spalin, które – przy uwzględnieniu aktualnej struktury zdefiniowanych pojazdów – umożliwiają wyznaczenie poziomu emisji związków szkodliwych spalin z poszczególnych rodzajów transportu. Jednocześnie, przy uwzględnieniu przewidywanych zmian struktury rodzajowej pojazdów pod względem ich znaczenia w zaspokajaniu aktualnych potrzeb przewozowych oraz ich prognoz, możliwe będzie zidentyfikowanie przewidywanego wpływu transportu na środowisko dla różnych scenariuszy rozwoju systemu transportowego.

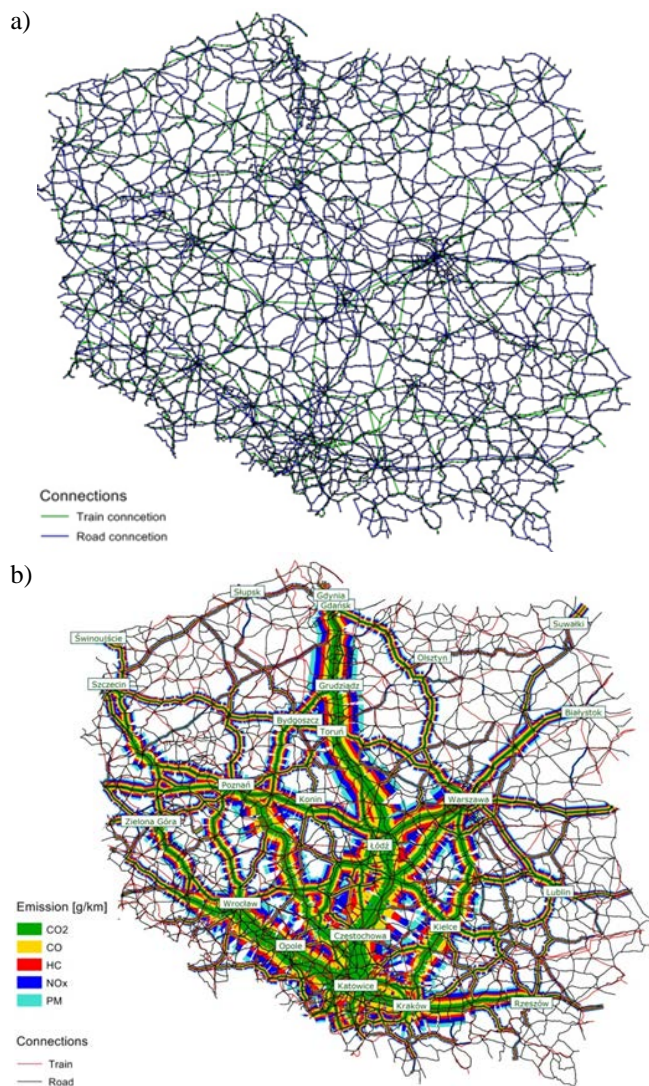
Charakter zadań przewozowych uwzględnianych w opracowanym modelu jest determinowany przez: rodzaj przedmiotu transportu (ładunek lub pasażer), cechy przedmiotu transportu (towaru), bądź wymagania podmiotu transportu (pasażera), relację przewozu, wykorzystywany rodzaj transportu, typ środka transportu itp. Natomiast wielkość zadań przewozowych jest funkcją dwóch podstawowych czynników: zapotrzebowania na przewóz zgłaszanego w transporcie pasażerskim i towarowym oraz możliwości przewozowych wynikających z wydolności infrastruktury transportowej oraz dostępności środków transportu.

Popyt na usługi transportowe w modelowanym systemie wyrażono w postaci macierzy OD (origin – destination) w określonej jednostce miary. W przypadku ruchu pasażerskiego była to liczba pasażerów, zaś w przypadku transportu ładunków liczba tony ładunku – przemieszczane w jednostce czasu. Generowanie macierzy OD wymagało określenia punktów nadania i odbioru. Przyjęto, że dla modelu systemu transportowego w skali kraju punkty te będą odpowiadały powiatom.

Wykorzystywane do kształtowania zrównoważonego rozwoju systemu transportowego narzędzie Visum udostępnia różne procedury rozkładu potoku ruchu dla transportu indywidualnego i publicznego. Różnią się one algorytmem wyszukiwania i procedurą zastosowaną do rozkładu popytu. Wynikiem rozkładu są natężenia ruchu w elementach sieci transportowej (węzłach, odcinkach, połączeniach, relacjach

skrętnych, liniach itp). Opracowane i zaimplementowane w modelu zależności funkcyjne oraz pomierzone jednostkowe emisje substancji szkodliwych, jak również udostępniany przez narzędzie Visum moduł HBEFA, pozwalają na przeprowadzenie szeregu badań symulacyjnych związanych z estymacją poziomu emisji związków szkodliwych przez pojazdy na poszczególnych odcinkach sieci logistycznej Polski. Dla przykładu, na rysunku 2b przedstawiono ilości emitowanych przez odcinki sieci drogowej systemu transportowego takich związków, jak: CO₂, CO, HC, PM oraz NO_x. Związki te oszacowano na podstawie liczby pojazdów dostawczych i ciężarowych, przydzielonych do poszczególnych odcinków w wyniku rozłożenia potoku ruchu towarowego drogowego na sieć transportową.

Wielkości emisji zanieczyszczeń uzyskane w modelu za pomocą zaimplementowanych zależności funkcyjnych lub modułu HBEFA mogą stanowić wyniki prowadzonych badań oraz zostać wykorzystane jako kryterium oceny zrównoważonego systemu transportowego. Dodatkowo mogą być zastosowane do dalszych analiz, na przykład na potrzeby oszacowania stężenia substancji szkodliwych w otoczeniu drogi, z wykorzystaniem modelu dyspersji.



Rys. 2. a) Sieć transportowa, b) Wykres emisji związków szkodliwych przez transport towarowy w systemie transportowym. Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem modelu w PTV Visum.

Streszczenie

Artykuł przedstawia problematykę kształtowania zrównoważonego systemu transportowego. W artykule zdefiniowano zagadnienie zrównoważonego rozwoju w aspekcie rozwoju systemów transportowych; omówiono zagrożenia wynikające z działalności transportowej, w tym zagrożenia ekologiczne oraz przedstawiono kryteria oceny systemu transportowego. Omówiono podstawowe założenia projektu EMITRANSYS, w ramach którego możliwe jest wspomaganie kształtowania zrównoważonego systemu transportowego. Realizacja projektu EMITRANSYS pozwoli na opracowanie wytycznych do kształtowania proekologicznych systemów transportowych.

Selected aspects of designing sustainable transport system

Abstract

The article presents problem of designing sustainable transport system. Authors define sustainable transport in aspect of transportation systems development, discuss threats resulting from transport operation including ecological issues, and present evaluation criteria to assess transport system. The bases of project EMITRANSYS were presented. EMITRANSYS supports designing sustainable transport system. Realization of the project will allow for developing guidelines for constructing proecological transport systems.

LITERATURA

1. Barczak A., *Zarys metodyki projektowania syntetycznych wskaźników zrównoważonego rozwoju transportu*. Logistyka, 2011, nr 3, ss. 93–100.
2. Borys T., Markowska M., Brzozowski T., *Raport z realizacji ekspertyzy „Analiza istniejących danych statystycznych pod kątem ich użyteczności dla określenia poziomu zrównoważonego rozwoju transportu wraz z propozycją ich rozszerzenia”*. Jelenia Góra – Warszawa 2008.
3. Brzeziński A., Rezwow M., *Zrównoważony transport - ekologiczne rozwiązania transportowe*. Ekorozwój i Agenda 21. Collegium Balticum w Szczecinie, 2007.
4. Bukowski Z., *Zrównoważony rozwój w systemie prawa*. Toruń, 2009.
5. Chi G., Stone Jr B., *Sustainable transport planning: estimating the ecological footprint of vehicle travel in future years*. Journal of urban planning and development, 2005, nr 131 (3), ss. 170–180.
6. Franco V., Kousoulidou M., Muntean M., Ntziachristos L., Hausberger S., Dilara P., *Road vehicle emission factors development: a review*. Atmospheric Environment, Vol. 70, pp. 84–97, 2013.
7. Gasparatos A., *Embedded value systems in sustainability assessment tools and their implications*. Journal of Environmental Management, 2010, No. 91, pp. 1613–1622.
8. Główny Urząd Statystyczny, *Wskaźniki zrównoważonego rozwoju Polski*. Katowice 2011.
9. Haq G., *Towards sustainable transport planning: a comparison between Britain and the Netherlands*, 1997.
10. http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/priorities/sustainable-growth/index_pl.htm (dostęp: 29.04.2014).
11. Jachimowski R., Żak J., *Vehicle routing problem with heterogeneous customers demand and external transportation costs*. Journal of Traffic and Logistics Engineering, Vol. 1 No. 1, pp. 46–50.
12. Jacyna I., Pyza D., *Problematyka doboru wskaźników oceny infrastruktury transportowej w aspekcie komodalności*. Logistyka 2010, nr 4.
13. Jacyna M. (red.), *System logistyczny Polski: uwarunkowania techniczno-technologiczne komodalności transportu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
14. Jacyna M., Merksiz-Guranowska A., Żak J., Kłodawski M., Szczepański E., *Szacowanie dyspersji zanieczyszczeń w płaszczynie przekroju poprzecznego drogi w aspekcie kształtowania proekologicznego systemu transportowego*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013, z. 97, ss. 217–228.
15. Kousoulidou M., Fontaras G., Ntziachristos L., Bonnel P., Samaras Z., Dilara P., *Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors*. Atmospheric Environment, Vol. 64, pp. 329–338, 2013.
16. Kumar P., Ketzl M., Vardoulakis S., Pirjola L., Britter R., *Dynamics and dispersion modelling of nanoparticles from road traffic in the urban atmospheric environment—a review*. Journal of Aerosol Science, Vol. 42 (9), pp. 580–603, 2011.
17. Litman, T., *Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2007, No. 2017 (1), pp. 10–15.
18. Merksiz J., Barczak A., Pielecha J., *Pomiary emisji spalin systemem PEMS i badanie wyników eksperymentu z wykorzystaniem metod analizy wariancji*. Logistyka 2011.
19. Merksiz J., Merksiz-Guranowska A., Pielecha J., Nowak M., *Exhaust emission measurements in the development of sustainable road transport*, Journal of the KONES Powertrain and Transport, Vol. 20/4, 2013.
20. Ministerstwo Infrastruktury, *Polityka Transportowa Państwa na lata 2006–2025*, [on-line], <http://cms.transport.gov.pl> (dostęp: 29.04.2014).
21. Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, *Strategia rozwoju transportu do 2020 roku (z perspektywą do 2030 roku)*, [on-line], <http://mir.gov.pl> (dostęp: 29.04.2014).
22. Nijkamp P., Rienstra S.A., Vleugel J.M., *Transportation planning and future*, 1998.
23. OECD, *Assessment and Decision Making for Sustainable Transport*, [online], <http://www.oecd-ilibrary.org> (dostęp: 29.04.2014).
24. Pawłowski L., *Rola monitoringu środowiska w realizacji zrównoważonego rozwoju*. Rocznik Ochrona Środowiska, 2011, t. 13, ss. 333–345.
25. Richardson B.C., *Sustainable transport: analysis frameworks*, Journal of Transport Geography, 2005, No. 13 (1), pp. 29–39.
26. Shiftan Y., Kaplan S., Hakkert S., *Scenario building as a tool for planning a sustainable transportation system*, Transporta-

- tion Research Part D: Transport and Environment, 2003, No. 8 (5), pp. 323–342.
27. Singh R.K., Murty H.R., Gupta S.K., Dikshit A.K., *An overview of sustainability assessment methodologies*, Ecological indicators, 2009, No. 9 (2), pp. 189–212.
28. United Nations, *Agenda 21*, [on-line], <http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf> (dostęp: 29.04.2014).
29. United Nations, *Johannesburg Declaration on Sustainable Development*, [on-line], <http://www.un-documents.net/jburgdec.htm> (dostęp: 29.04.2014).
30. *Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska.* (Dz. U. z dnia 20 czerwca 2001 r.).
31. Vigar G., *Local barriers to environmentally sustainable transport planning*. Local Environment, 2000, No. 5 (1), pp. 19–32.
32. World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*, [on-line], <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> (dostęp: 29.04.2014).
33. Yan F., Winijkul E., Bond T.C., Streets D.G., *Global emission projections of particulate matter (PM): II. Uncertainty analyses of on-road vehicle exhaust emissions*. Atmospheric Environment, Vol. 87, pp. 189–199, 2014.