



## Planning of End-of-life Vehicles Recycling Network

*Agnieszka MERKISZ-GURANOWSKA<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: 61-66-52-226, fax: 61-66-52-736,  
e-mail [agnieszka.merkisz-guranowska@put.poznan.pl](mailto:agnieszka.merkisz-guranowska@put.poznan.pl)

### Abstract

Designing of a recycling network should be planned and organized carefully to ensure its efficiency and resource optimization. That is why the creation of the network requires appropriate tools that will allow a proper location of the recycling network structural elements. Decision support model should include several steps such as: problem identification, model construction and model verification.

**Keywords:** recycling, network planning, end-of-life vehicles

### Streszczenie

Projektowanie sieci recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji

Tworzenie sieci recyklingu powinno przebiegać w sposób zaplanowany i zorganizowany tak, aby zapewnić efektywność sieci i optymalne zagospodarowanie zasobów. Stąd też kształtowanie sieci recyklingu wymaga zastosowania odpowiednich narzędzi, które zapewnią właściwą lokalizację elementów struktury systemu. Model wspomaganie decyzji powinien obejmować etapy takie jak: identyfikacja problemu, konstruowanie modelu matematycznego oraz weryfikację modelu.

**Słowa kluczowe:** recykling, projektowanie sieci, samochody wycofane z eksploatacji

### 1. Wstęp

Na ostatnim etapie cyklu życia pojazdu powstaje rocznie na świecie ponad 30 milionów ton odpadów pochodzących z samochodów wycofywanych z eksploatacji (SWE), które muszą być odpowiednio zagospodarowane [1]. Recykling pojazdów, wraz z wprowadzaniem w życie zasad zrównoważonego rozwoju, ale również z uwagi na ekonomiczne korzyści związane z odzyskiem odpadów, stał się nieodłącznym elementem towarzyszącym rozwojowi motoryzacji.

Wymagania współczesnej gospodarki oraz niepewność funkcjonowania przedsiębiorstw zwłaszcza w sytuacji kryzysu gospodarczego wymuszają na podmiotach podejmowanie przemyślnych, racjonalnych decyzji ekonomicznych. Dotyczy to wszystkich przedsiębiorstw, w tym również tych związanych z branżą motoryzacyjną. Rozwój sieci recyklingu pojazdów wiąże się z ponoszeniem znacznych nakładów inwestycyjnych, stąd kształtowanie jej struktury nie powinno odbywać się w sposób przypadkowy. W takim przypadku warto posłużyć się narzędziami służącymi optymalizacji lokalizacji podmiotów sieci. Jedną z metod wspomaganie decyzji stanowi modelowanie matematyczne.

### 2. Modelowanie sieci recyklingu pojazdów

Modelowanie sieci recyklingu obejmuje szereg etapów, które należy zrealizować. W najbardziej ogólnej postaci modelowanie można ująć w postaci trzech etapów, którymi są identyfikacja problemu, tworzenie modelu problemu i jego weryfikacja [2]. Po przeprowadzeniu tych etapów może nastąpić aplikacja modelu do rzeczywistych zadań optymalizacyjnych.

Pierwszym etapem, który ma miejsce przed rozpoczęciem budowy samego modelu jest identyfikacja problemu (rys.2.1). Identyfikacja problemu wymaga opisu stanu obecnego oraz określenia jakich zmian oczekuje się od

systemu w przyszłości. Należy zdecydować jaki będzie zakres modelowania i zdefiniować cele, czyli co zamierzamy osiągnąć w wyniku przeprowadzenia procesu modelowania. Zakres modelowania może na przykład obejmować wskazanie nowych miejsc lokalizacji podmiotów (spośród dowolnych lokalizacji lub zbioru poddanych analizie lokalizacji) lub przebudowę istniejącego systemu polegającą na usunięciu najmniej korzystnych lokalizacji. Celem przeprowadzonej optymalizacji może być maksymalizacja rentowności funkcjonowania całej sieci czy zapewnienie odpowiedniej dostępności sieci jak najniższym kosztem.

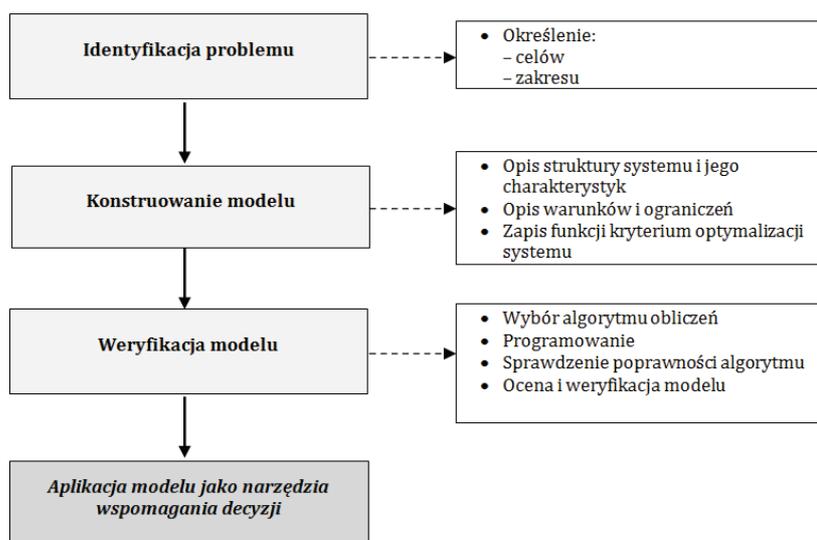
Kolejnym krokiem jest właściwe konstruowanie modelu. Warunkiem zbudowania modelu jest szczegółowe zbadanie systemu i określenie jego elementów. Następnie odwzorowuje się jego strukturę poprzez przedstawienie elementów systemu oraz powiązań między podmiotami na podstawie rzeczywistych przepływów w sieci. Do elementów struktury sieci recyklingu pojazdów można zaliczyć:

- źródła samochodów wycofanych z eksploatacji (np. gminy, powiaty);
- punkty zbierania pojazdów (inaczej punkty odbioru), do których przekazywane są pojazdy przez właścicieli. Zadaniem punktów zbierania jest dostarczenie SWE do kolejnego ogniwa sieci, czyli do stacji demontażu;
- stacje demontażu, których zadaniem jest odbiór SWE z punktów zbierania lub bezpośrednio od właścicieli pojazdów, osuszenie pojazdu, demontaż części nadających się do sprzedaży jako używane części zamienne, demontaż części i elementów przeznaczonych do recyklingu materiałowego i przekazanie ich do odpowiednich zakładów recyklingu materiałów oraz przekazanie karoserii po demontażu do młynów przemysłowych;
- młyny przemysłowe, gdzie w procesie strzępienia odzyskiwane są frakcje metalowe;
- zakłady recyklingu materiałów zajmujące się odzyskiem odpadów i sprzedażą surowców wtórnych na rynku;
- odbiorcy materiałów i części z recyklingu oraz odpadów do unieszkodliwienia, którzy stanowią wyjście z systemu.

Ważny krok stanowi identyfikacja charakterystyk elementów (np. potencjalnych miejsc lokalizacji), czyli cech mających wpływ na funkcjonowanie modelu. Struktura modelu odzwierciedla relacje pomiędzy elementami modelu oraz wyznacza granice pomiędzy badanym obszarem systemu a jego otoczeniem.

Na formułowanie zadania optymalizacyjnego składają się następujące czynności [3]:

- określenie, jakie wielkości są wielkościami zadanymi stanowiącymi dane wejściowe zadania (parametry),
  - określenie zmiennych decyzyjnych przez wyznaczenie szukanych wielkości,
  - ustalenie warunków ograniczających, które musi spełniać rozwiązanie zadania (ograniczenia),
  - zdefiniowanie funkcji kryterium, według której oceniane będą rozwiązania dopuszczalne, wyznaczone przez warunki ograniczające, i umożliwiającej wyznaczenie rozwiązania optymalnego lub zapewniającej osiągnięcie celu badań.
-



Rys. 2.1. Etapy modelowania sieci recyklingu

Na etapie konstruowania modelu, po zidentyfikowaniu charakterystyk i relacji pomiędzy poszczególnymi podmiotami i otoczeniem, następuje określenie parametrów i ograniczeń modelu. Parametry pozostają bez zmian w trakcie całego procesu modelowania i służą do formułowania funkcji kryterium i ograniczeń modelowania. Ograniczenia są odzwierciedleniem dostępności zasobów decydenta np. w postaci maksymalnego budżetu inwestycyjnego, posiadanego potencjału przerobowego oraz wymogów jakie muszą spełniać proponowane rozwiązania np. w postaci maksymalnej odległości między podmiotami. Układ warunków ograniczających wraz z ewentualnymi warunkami brzegowymi generuje zbiór tzw. decyzji dopuszczalnych. Zatem rozwiązania dopuszczalne zadania optymalizacyjnego są taką kombinacją zmiennych decyzyjnych, które spełniają wszystkie ograniczenia zadania. Ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych wybiera się następnie rozwiązanie optymalne.

Zmienne decyzyjne uwzględniane w modelowaniu sieci recyklingu pojazdów wynikają z uwarunkowań techniczno-organizacyjnych funkcjonowania sieci i wzajemnych powiązań między jej uczestnikami. Zmienne decyzyjne modeli powinny opisywać:

- potencjalne miejsca lokalizacji podmiotów recyklingu, uwzględniając rodzaj i typ podmiotu,
- przyporządkowanie źródeł do punktów zbierania pojazdów oraz do stacji demontażu i wzajemnych powiązań między podmiotami i zakładami recyklingu materiałów,
- wielkość przepływu samochodów, karoserii i odpadów (obciążenia połączeń transportowych) między podmiotami,
- potencjał przerobowy nowo powstających podmiotów.

Do wyboru rozwiązania optymalnego służy funkcja kryterium. Stanowi ona bazę oceny potencjalnych rozwiązań i jest powiązana z wcześniej określonym celem modelowania. Funkcja ta mierzy stopień osiągnięcia celu. Poszukiwanie rozwiązania optymalnego polega na znalezieniu takiej kombinacji zmiennych spośród zbioru dopuszczalnych rozwiązań, przy której funkcja kryterium osiąga wartość ekstremalną. Wartość ekstremalna może być wartością minimalną (np. dla funkcji celu opartej na kosztach) lub maksymalną (np. dla funkcji celu opartej na przychodach).

W wyniku procesu modelowania powstaje model matematyczny służący do rozwiązywania konkretnych problemów badawczych. W ujęciu ogólnym matematyczny zapis zadania optymalizacyjnego można przedstawić w następujący sposób [4, 5]:

Poszukujemy takich  $n$  zmiennych decyzyjnych oznaczonych

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad (2.1)$$

należących do zbioru decyzji dopuszczalnych spełniających ograniczenia:

$$a_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, i = 1, \dots, M_1 \quad (2.2)$$

$$a_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, j = M_1 + 1, \dots, M_2 \quad (2.3)$$

$$a_g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, g = M_2 + 1, \dots, M \quad (2.4)$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R_+ \quad (2.5)$$

aby funkcja celu

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.6)$$

przyjmowała wartość ekstremalną.

Jeżeli przez  $x$  oznaczy się dowolne dopuszczalne rozwiązanie, przez  $x'$  rozwiązanie optymalne, a  $D$  zbiór rozwiązań dopuszczalnych, to poszukuje się takiego rozwiązania, że:

$F(x') = \max \{F(x): x \in D\}$  – w przypadku maksymalizacji funkcji kryterium,

$F(x') = \min \{F(x): x \in D\}$  – w przypadku minimalizacji funkcji kryterium.

Pracując nad modelem, należy uwzględnić możliwości pozyskania informacji niezbędnych do jego aplikacji i wykorzystania w praktyce. Jeżeli zdobycie danych wejściowych nie będzie możliwe, nawet najlepszy model okaże się bezużyteczny. Trzeba też mieć na uwadze dostępne metody obliczeniowe, od których zależy czas rozwiązywania zadań optymalizacyjnych i jakość uzyskiwanych wyników. Zbyt duża złożoność modeli związana ze zbyt dużą liczbą parametrów i zmiennych lub rozbudowanymi relacjami pomiędzy elementami modelu mogą spowodować, że przy dostępnych metodach nie da się na przykład uzyskać rozwiązań w akceptowalnym przez decydenta czasie.

Przed rozwiązaniem zadania optymalizacyjnego należy zatem wybrać algorytm matematyczny. Można korzystać z gotowych algorytmów albo opracować własny. W modelowaniu sieci recyklingu coraz częściej stosowane są metody heurystyczne umożliwiające optymalizowanie złożonych problemów w rozsądnym czasie. Następnie opracowany model podlega weryfikacji na rzeczywistych danych i po uzyskaniu pozytywnych wyników może być stosowany w modelowaniu lokalizacji podmiotów sieci recyklingu.

Ostatnim krokiem jest weryfikacja modelu, podczas której sprawdza się poprawność sformułowania modelu i funkcjonowania aplikacji matematycznej. Weryfikacja może być przeprowadzona na danych rzeczywistych dotyczących fragmentu modelowanej rzeczywistości lub na danych nierzeczywistych, służących jedynie do oceny poprawności działania modelu. Podczas weryfikacji, jeżeli zajdzie taka potrzeba, dokonuje się niezbędnych zmian w modelu i aplikacji matematycznej. Po zakończeniu tego etapu model jest gotowy do wykorzystania do rozwiązywania rzeczywistych problemów decyzyjnych.

### 3. Funkcje kryterium wykorzystywane w modelowaniu sieci recyklingu

Poszukiwanie rozwiązania problemu decyzyjnego, jakim jest lokalizacja elementów sieci recyklingu wymaga określenia funkcji kryterium. Kryterium optymalizacji jest odzwierciedleniem preferencji podmiotu podejmującego decyzję.

W zależności od zdefiniowania funkcji kryterium zadania optymalizacyjne możemy podzielić na jednokryterialne lub wielokryterialne. W zadaniach jednokryterialnych do oceny rozwiązań wykorzystujemy jedną funkcję oceny będącą wyrazem preferencji decydenta. Wielokryterialne modele zakładają minimalizację/maksymalizację funkcji celu złożonej z wielu kryteriów cząstkowych, które odzwierciedlają często przeciwstawne preferencje wielu różnych podmiotów. Jest to szczególnie przydatne przy optymalizacji złożonych systemów, a do takich należy sieć recyklingu.

Warto zauważyć, że w latach 60. i 70. XX w. podstawowym i właściwie jedynym kryterium w optymalizacji lokalizacji podmiotów związanych z zagospodarowaniem odpadów była minimalizacja kosztów [6]. Dopiero w latach 80. XX w., kiedy wzrosła świadomość ekologiczna społeczeństw, zaczęto uwzględniać także inne aspekty, przede wszystkim związane z ochroną środowiska, chociaż dopiero w latach 90. XX w. nastąpił

prawdziwy rozwój modeli opartych na aspektach środowiskowych. Przykładem mogą być prace [7,8] w zakresie planowania systemu odpadów, które włączały wymogi ochrony środowiska (minimalizacja hałasu, zanieczyszczenia powietrza, kongestii w transporcie) jako ograniczenia w zorientowanej ekonomicznie lokalizacji podmiotów systemu.

Jednokryterialne zadania optymalizacyjne są, mimo ciągłego rozwoju modeli wielokryterialnych, częściej stosowane w praktyce z uwagi na prostszy proces formułowania i realizacji takich zadań oraz szybsze i łatwiejsze znajdowanie rozwiązań optymalnych. Do najczęściej spotykanych funkcji celu w jednokryterialnych zadaniach optymalizacyjnych należą:

- minimalizacja kosztów,
- maksymalizacja zysków,
- minimalizacja czasu trwania procesów.

Mimo możliwości wyboru różnych typów funkcji celu, analiza dostępnych prac badawczych w obszarze kształtowania sieci w logistyce odzysku przeprowadzona przez Chanintrakul i inni [9] wykazała, że w modelach jednokryterialnych jako funkcję celu prawie zawsze wykorzystuje się minimalizację kosztów. Potwierdzają to między innymi Fleischmann i inni [10], Salema i inni [11] oraz Beamon i Fernandes [12].

W zadaniach dwukryterialnych najczęściej stosowanymi cząstkowymi funkcjami kryterium są [13,14]:

- minimalizacja kosztów i minimalizacja czasu procesu,
- minimalizacja kosztów i maksymalizacja pokrycia obszaru geograficznego,
- minimalizacja kosztów i minimalizacja negatywnego oddziaływania na otoczenie,
- minimalizacja kosztów i minimalizacja odległości między elementami.

W przypadku sieci recyklingu pojazdów funkcje celu wykorzystywane w optymalizacji lokalizacji podmiotów sieci można ująć w trzech grupach: kryteria ekonomiczne, środowiskowe i jakościowe, które zostały szerzej opisane w dalszej części artykułu.

### 3.1. Kryteria ekonomiczne

Kryteria ekonomiczne odnoszą się z reguły do minimalizacji kosztów lub maksymalizacji rentowności. Najczęściej wykorzystuje się takie funkcje jak:

- Minimalizacja kosztów tworzenia infrastruktury

Dotyczy wyłącznie nakładów początkowych na tworzenie infrastruktury sieci recyklingu (m.in. wyposażenie, budowa obiektów, koszt pozwoleń na prowadzenie działalności), nie uwzględnia natomiast kosztów związanych z funkcjonowaniem podmiotów.

- Minimalizacja kosztów odzysku SWE i pochodzących z nich odpadów

Funkcja ta dotyczy kosztów działalności bieżącej związanej z procesami odzysku SWE i odpadów i obejmuje koszty zmienne, stałe funkcjonowania podmiotów oraz koszty transportu.

- Minimalizacja całkowitych kosztów zagospodarowania SWE

Kryterium zbliżone do minimalizacji kosztów odzysku, ale dodatkowo uwzględnia się koszty likwidacji odpadów i tych SWE, które nie podlegają zagospodarowaniu w sieci recyklingu.

- Minimalizacja kosztów transportu pomiędzy elementami sieci

Koszty transportu często stanowią barierę w odzysku wybranych elementów SWE, gdyż przychody ze sprzedaży części i odpadów nie pokrywają kosztów ich transportu pomiędzy podmiotami sieci.

- Minimalizacja kosztów przekazania SWE do sieci

O ile wszystkie wymienione wyżej kryteria minimalizacji kosztów odnoszą się albo do uczestników sieci, albo do jej organizatorów, o tyle kryterium minimalizacji kosztów przekazania SWE do sieci jest kryterium

wykorzystywanym przez właścicieli pojazdów. Koszty przekazania obejmują przede wszystkim koszty transportu, ale mogą także obejmować opłaty, które są pobierane przy oddaniu pojazdu do sieci recyklingu.

- Maksymalizacja przychodów

Maksymalizacja przychodów jest bardzo ważnym kryterium z punktu widzenia samofinansowania sieci recyklingu, gdyż wielkość generowanych przychodów ze sprzedaży części i materiałów decyduje o nakładach inwestycyjnych i wielkości kosztów całkowitych, jakie podmioty są w stanie ponieść. Do przychodów zaliczamy także pozostałe przychody niezwiązane ze sprzedażą odzyskiwanych odpadów, między innymi dotacje do prowadzonej działalności. Dotacje zakłócają funkcjonowanie sektora oparte na mechanizmie rynkowym, ale są często niezbędne do zachęcenia podmiotów gospodarczych do rozpoczęcia i prowadzenia działalności w obszarze odzysku odpadów.

- Maksymalizacja rentowności

Kryterium to uwzględnia jednocześnie przychody z prowadzonej działalności i koszty całkowite prowadzonej działalności. Jest więc najbardziej kompleksowym kryterium ekonomicznym oceny sieci.

### 3.2. Kryteria środowiskowe

Kryteria środowiskowe brane są pod uwagę ze względu na szczególną rolę jaką odgrywa sieć recyklingu, a którą jest minimalizacja negatywnych oddziaływań pojazdów na środowisko naturalne.

W przypadku pojazdów można posługiwać się następującymi kryteriami środowiskowymi:

- Maksymalizacja zakresu odzysku odpadów

Mierzona albo ilością odpadów dostarczanych do sieci albo wskaźnikiem recyklingu i odzysku, funkcja ta może być również wskaźnikiem oceny jakości usługi, ale przede wszystkim jej maksymalizacja świadczy o zmniejszaniu ilości odpadów trafiających na składowiska.

- Maksymalizacja liczby zagospodarowanych SWE

Może stanowić funkcję celu wtedy, gdy założy się, że część pojazdów może pozostawać poza systemem i w takiej sytuacji należy skierować jak największy strumień SWE do sieci recyklingu.

- Minimalizacja negatywnych oddziaływań utylizacji SWE

Uwzględnia nie tylko negatywne oddziaływanie na środowisko odpadów trafiających na składowiska, ale także uwzględnia negatywne skutki czynności związanych z odzyskiem czy transportem odpadów.

- Minimalizacja zagrożeń związanych z transportem odpadów

Opiera się na wdrażaniu zasady bliskości, zgodnie z którą odpady powinny być transportowane do najbliższych miejsc zagospodarowania, przez co unika się niebezpieczeństw związanych z ryzykiem wypadku w trakcie transportu oraz zapewnia w skali lokalnej infrastrukturę niezbędną do utylizacji SWE i odpadów z nich pochodzących.

### 3.3. Kryteria jakościowe

Do najczęściej wykorzystywanych kryteriów jakościowych można zaliczyć minimalizację czasu procesu i maksymalizację niezawodności procesu. Kryteria jakościowe stosowane są jako kryteria cząstkowe w modelach wielokryterialnych i nie powinny być brane pod uwagę jako jedyne kryterium w optymalizacji lokalizacji podmiotów sieci.

W przypadku posługiwania się maksymalizacją niezawodności procesu, niezawodność procesu może być interpretowana jako uzyskiwanie określonej jakości efektów np. w postaci danego wskaźnika odzysku czy ilości części wymontowywanych z SWE. Maksymalizacja poziomu niezawodności może być przeprowadzona przy danych lub ograniczonych zasobach, które można wykorzystać w stacjach demontażu.

## 4. Ograniczenia

Jak zaznaczono wyżej kształtowanie sieci recyklingu jest złożonym procesem decyzyjnym, związanym z podejmowaniem decyzji w warunkach ograniczonych środków finansowych, jak również ograniczonych środków technicznych, przy czym należy wziąć pod uwagę także oczekiwania i wymagania, jakie sieć

recyklingu musi spełniać. Rzadkość posiadanych zasobów oraz wymogi stawiane sieci znajdują odzwierciedlenie w ograniczeniach.

Nakładane ograniczenia wyznaczają zbiór decyzji dopuszczalnych, z których następnie wybiera się rozwiązanie spełniające w jak największym stopniu preferencje decydenta. Rodzaje ograniczeń, jakie można wyróżnić na potrzeby modelowania sieci recyklingu pojazdów dzielą się na następujące grupy:

- techniczne,
- ekonomiczne,
- prawne,
- środowiskowe,
- ograniczenia obejmujące powstawanie i kształtowanie przepływów SWE i odpadów,
- ograniczenia wynikające z fizycznej interpretacji wielkości.

Do ograniczeń technicznych należy przede wszystkim potencjał przerobowy stacji demontażu i pozostałych podmiotów. Wielkość potencjału przerobowego może być ograniczona albo w związku z brakiem dostępnych technologii przetwarzania na większą skalę pojazdów i odpadów, albo z braku możliwości finansowania inwestycji niezbędnych do zwiększenia potencjału. Wyznaczając maksymalny dopuszczalny potencjał przy projektowaniu sieci, należy te czynniki wziąć pod uwagę. Przy modernizacji sieci ograniczenia potencjału będą wynikały z faktycznego posiadanego przez podmioty potencjału.

Bardzo często spotykanym ograniczeniem ekonomicznym jest maksymalny nakład inwestycyjny na budowę sieci. Takie ograniczenie wprowadzane jest wtedy, kiedy funkcja kryterium dotyczy innych aspektów niż minimalizacja całkowitych kosztów sieci. Ograniczenie to jest związane z wymogami nakładanymi na sieć wynikającymi z kolei z możliwości jej finansowania przez przedsiębiorstwa lub inne organizacje ponoszące nakłady inwestycyjne. Wprowadzenie na przykład do funkcji kryterium maksymalizacji dostępności sieci dla użytkowników spowoduje, że w rozwiązaniu optymalnym zostanie zaproponowana bardzo gęsta sieć podmiotów, co jest równoznaczne z wysokim kosztem powstania sieci, który może być nie do zaakceptowania przez inwestora. Ograniczenie to może być także sformułowane jako maksymalna liczba podmiotów, które mogą funkcjonować w sieci. Do innych ograniczeń ekonomicznych można zaliczyć minimalny przerób podmiotów wyrażany minimalną liczbą przetwarzanych SWE i minimalną masą przetwarzanych odpadów. Ustalenie dolnej granicy przerobu wynika z konieczności zapewnienia zyskowności podmiotów, które muszą osiągnąć próg rentowności prowadzonej działalności.

Przykładem ograniczenia prawnego jest minimalna odległość między podmiotami, wynikająca z obowiązujących przepisów. W niektórych krajach ustawodawca zobowiązuje producentów samochodów do tworzenia sieci odbioru pojazdów tak, aby właściciel pojazdu nie miał dalej niż określona przepisami odległość. Dostępność sieci może być też wyrażana minimalną liczbą podmiotów danego typu, które muszą w sieci funkcjonować, ale taki zapis pomija postulat równomiernego geograficznego rozłożenia lokalizacji podmiotów.

Ograniczenia środowiskowe wyrażane są między innymi koniecznością przetwarzania wszystkich zebranych odpadów w sieci. W zadaniach optymalizacyjnych, w których dodatkową zmienną jest zakres demontażu i ilość wymontowywanych części i materiałów jako ograniczenie wprowadza się także minimalny wskaźnik odzysku pojazdu.

Ograniczenia obejmujące powstawanie i kształtowanie przepływów związane są z koniecznością zagospodarowania wszystkich lub określonej liczby SWE stanowiących wejście do systemu. Na kolejnych etapach wprowadzane są ograniczenia związane ze zbilansowaniem przepływów, co gwarantuje, że wszystkie odpady będą zagospodarowane i nie będą magazynowane na poziomie poszczególnych ogniw sieci. Ograniczeniem odnoszącym się do kształtowania przepływów jest także to zapewniające, że SWE czy odpady są dostarczane wyłącznie do podmiotów wybranych do obsługi sieci. Jeżeli wyjściem z systemu są klienci końcowi sieci, np. przedsiębiorstwa przemysłowe, można także wprowadzić ograniczenia gwarantujące, że ilość dostarczanych odpadów nie będzie większa od ich popytu. Można również wyznaczyć minimalny poziom popytu na odpady, który musi być zaspokojony.

Ostatnią grupę stanowią ograniczenia wynikające z fizycznej interpretacji wielkości. Przykładem takich ograniczeń jest nieujemność przepływów i innych zmiennych ilościowych czy całkowitoliczbowość wielkości odnoszących się do liczby SWE. Z kolei zmienne wyboru lokalizacji są bardzo często wyrażane jako zmienne binarne.

## 5. Posumowanie

Zastosowanie modeli matematycznych jest doskonałym narzędziem wspomagania decyzji w kształtowaniu sieci recyklingu odpadów, w tym samochodów wycofanych z eksploatacji. W zależności od wyboru funkcji celu oraz wartości parametrów można przy podejmowaniu decyzji uwzględniać różne punkty widzenia i przeprowadzać symulację wpływu podejmowanych decyzji na sieć. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie określonych przez decydenta efektów minimalnym nakładem.

Wykorzystanie modeli matematycznych pozwala z jednej strony określić optymalną strukturę systemu recyklingu (liczba i rodzaj przedsiębiorstw uczestniczących w procesie recyklingu), z drugiej zaś — wzajemne relacje między elementami systemu, wpływające na jego funkcjonowanie.

Ponadto matematyczny zapis struktury i zachowania systemu daje możliwość doświadczalnego sprawdzenia poprawności odwzorowania oraz prowadzenia prac badawczych na tak skonstruowanym modelu. Modelowanie matematyczne może być wykorzystane nie tylko do projektowania sieci, ale również do oceny istniejących rozwiązań lub oceny kierunków działania w obszarze recyklingu przez badanie konsekwencji proponowanych (np. przez ustawodawcę) rozwiązań organizacyjnych. Analiza wrażliwości poprzez zmiany parametrów pozwala na ocenę zmian struktury systemu, wielkości przepływów oraz zachowania podmiotów systemu w zależności od zmian warunków brzegowych.

## Literatura

1. Merkiś-Guranowska A.: Recykling samochodów w Polsce, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań–Radom 2007.
2. Merkiś-Guranowska A.: Modelowanie lokalizacji podmiotów sieci recyklingu pojazdów samochodowych. Seria Rozprawy nr 455, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.
3. Jacyna M.: Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
4. Jacyna M., Modelowanie i ocena systemów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
5. Ignasiak E. (red), Badania operacyjne, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2001.
6. Chang N.B., Yang Y.C., Wang S.F., Solid waste management system analysis with noise control and traffic congestion limitations, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 122 (2), 1996.
7. Chang N.B., Shoemaker C.A., Schuler R.E., Solid waste management system analysis with air pollution and leachate impact limitations, *Waste Management Research*, vol. 14, 1996.
8. Chang N.B., Yang Y.C., Wang S.F., Solid waste management system analysis with noise control and traffic congestion limitations, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 122 (2), 1996.
9. Chanintrakul P., Coronado Mondragon A., Lalwani Ch., Yew Wong Ch., Reverse logistics network design: a state-of-the-art literature review, *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, vol. 1, no. 1, 2009.
10. Fleischmann M., Beullens P., Bloemhof-Ruwaard J.M., Van Wassenhove L.N., The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operations Management*, vol. 10, no. 2, 2001.
11. Salema M.I., Barbosa-Povoa, A.P., Novais A.Q., An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European Journal of Operational Research*, vol. 179, no. 3, 2007.
12. Beamon B.M., Fernandes C., Supply-chain network configuration for product recovery, *Production Planning & Control*, vol. 15, no. 3, 2004.

13. Eiselt H.A., Laporte G., Facility Location: A survey of application and methods, Springer, New York 1995.
14. Farahani R.Z., SteadieSeifi M., Asgari N., Multiple Criteria Facility Location Problems: A Survey, Applied Mathematical Modelling, vol. 34, no. 7, 2010.

*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy.  
Projekt N N509 601839 pt. Metodyka kształtowania sieci transportowo-logistycznej w wybranych obszarach.  
Kierownik projektu Marianna Jacyna.*