

Agnieszka MERKISZ-GURANOWSKA

Politechnika Poznańska
Wydział Maszyn Roboczych i Transportu
ul. Piotrowo 3; 60-965 Poznań
agnieszka.merkisz-guranowska@put.poznan.pl

MODELOWANIE LOKALIZACJI PODMIOTÓW SIECI RECYKLINGU POJAZDÓW NA PRZYKŁADZIE POLSKI

Streszczenie:

W artykule przedstawiono zagadnienia modelowania sieci recyklingu pojazdów samochodowych. Funkcjonowaniem sieci recyklingu zainteresowane są różne podmioty od administracji państwowej, przez przedsiębiorstwa uczestniczące w sieci, producentów samochodów po właścicieli pojazdów. Interesy tych grup należy uwzględnić przy podejmowaniu decyzji dotyczących organizacji sieci. W artykule przedstawiono dwukryterialny model lokalizacji podmiotów sieci uwzględniający preferencje właścicieli pojazdów i uczestników sieci. Przedstawiono sformułowanie matematyczne zadania optymalizacyjnego, ograniczenia, które muszą spełniać rozwiązania oraz funkcję kryterium. Następnie model ten został zastosowany do optymalizacji polskiej sieci recyklingu.

Słowa kluczowe: modelowanie lokalizacji, samochody wycofane z eksploatacji, optymalizacja sieci recyklingu

WPROWADZENIE

Przemysł samochodowy od dawna należy do kluczowych sektorów gospodarki światowej, a samochód stał się nieodłącznym elementem życia codziennego i jednym z symboli współczesnego społeczeństwa. Dynamiczny rozwój motoryzacji pociąga za sobą także negatywne skutki dla człowieka i środowiska naturalnego. Jednym z tych skutków są odpady generowane przez pojazdy zarówno na etapie produkcji, eksploatacji jak i wycofania z użytku. Sposobem na ograniczenie tego negatywnego wpływu jest recykling, czyli gospodarcze wykorzystanie odpadów z wyłączeniem odzysku energii.

Warunkiem przeprowadzenia recyklingu pojazdów jest utworzenie sieci odbioru i przetwarzania samochodów wycofanych z eksploatacji (SWE). Sieć ta, określana mianem sieci recyklingu, składa się z następujących podmiotów:

- Punktów zbierania, do których przekazywane są pojazdy przez właścicieli. Zadaniem punktów zbierania jest dostarczenie SWE do kolejnego ogniwa sieci, czyli do stacji demontażu.
- Stacji 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.

- Młynów przemysłowych, gdzie w procesie strzępienia odzyskiwane są frakcje metalowe.
- Zakładów recyklingu materiałowego zajmujących się odzyskiem odpadów i sprzedają surowców wtórnych na rynku.

Specyfikę funkcjonowania podmiotów sieci recyklingu i powiązania między nimi przedstawiono szczegółowo w następujących pozycjach literatury [2,3].

Tworzenie sieci wymaga podjęcia decyzji dotyczących lokalizacji podmiotów i organizacji przepływów między nimi. Decyzje te mogą być podejmowane zarówno na poziomie makroekonomicznym, gdy za tworzenie sieci odpowiada państwo lub organizacje odpowiedzialne za sieć recyklingu lub na poziomie mikroekonomicznym kiedy pojedyncze przedsiębiorstwa podejmują decyzje o wyborze miejsca lokalizacji działalności lub tworzenia nowych struktur sieci.

1. MODELOWANIE SIECI RECYKLINGU

Decyzje dotyczące organizacji sieci recyklingu wymagają uwzględnienia szeregu aspektów. Do najważniejszych aspektów należą:

- Obowiązujące uregulowania prawne.
- Uwarunkowania ekonomiczne funkcjonowania podmiotów sieci recyklingu.
- Podaż pojazdów.
- Dostępność i lokalizacja młynów przemysłowych i zakładów recyklingu materiałowego.

Sposobem na wspomaganie decyzji uwzględniających wszystkie wskazane aspekty jest sformułowanie problemu badawczego w języku matematycznym w postaci zadania optymalizacyjnego wyznaczania lokalizacji podmiotów sieci. Wybór optymalnych miejsc lokalizacji poszczególnych typów podmiotów zależeć będzie od preferencji jakimi kieruje się decydent (wyrażonych funkcją kryterium) oraz zasobów jakimi dysponuje decydent (uwzględnionych w ograniczeniach).

W jednokryterialnych zadaniach optymalizacyjnych do oceny rozwiązań wykorzystywana jest jedna funkcja oceny będąca wyrazem preferencji decydenta. W pewnych przypadkach trudno jest jednak wyznaczyć jedną funkcję celu z uwagi na zaangażowanie wielu podmiotów reprezentujących różne punkty widzenia, z których każdy stara się ekstremalizować swoją indywidualną korzyść.

W takiej sytuacji należy posłużyć się wielokryterialnymi modelami, które zakładają minimalizację/maksymalizację funkcji celu złożonej z wielu kryteriów cząstkowych. Każde z tych kryteriów odzwierciedla często przeciwstawne preferencje zaangażowanych stron. Jest to szczególnie przydatne przy optymalizacji złożonych systemów, a do takich należy sieć recyklingu.

Dla wielokryterialnej funkcji warunkiem znalezienia rozwiązania optymalnego jest istnienie wspólnego zbioru decyzji dopuszczalnych odpowiadających poszczególnym kryteriom cząstkowym. Oznacza to, że cele muszą być ze sobą powiązane. Funkcje cząstkowe odzwierciedlają różne cele i preferencje decydenta lub decydentów, które należy jednocześnie spełniać. Podstawę wyboru rozwiązania stanowi cały rozważany zbiór celów. Pomędzy poszczególnymi celami występuje zjawisko konkurencyjności, które oznacza, że poprawa realizacji jednego celu powoduje pogorszenie realizacji przynajmniej jednego z pozostałych celów [1]. Nie istnieje, w ogólności, jakakolwiek decyzja (rozwiązanie, działanie), która jest najlepsza jednocześnie ze wszystkich punktów widzenia. Pojęcie „optymalny” ma w tym przypadku inne znaczenie niż w klasycznej teorii optymalizacji. Rozwiązywanie zadań wielokryterialnych prowadzi do wyznaczenia najlepszej alternatywy przy uwzględnieniu

różnych interakcji w ramach wyznaczonych ograniczeń, tak aby najbardziej zadowolili decydenta osiągając akceptowalny poziom zestawu kryteriów [4].

Funkcję celu możemy zatem przedstawić jako zbiór mierzalnych kryteriów oceniających i zapisać w następującej postaci:

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_k, \dots, f_K\} \quad (1)$$

gdzie:

F – globalna funkcja oceny,

f_k – cząstkowa funkcja oceny,

K – liczba cząstkowych funkcji oceny.

przy czym poszczególnym funkcjom cząstkowym przyporządkowuje się wagi odzwierciedlające względną ważność kryterium. Wagi ujęte są jako pewne wartości liczbowe.

W dalszej części artykułu zostanie przedstawiony dwukryterialny model optymalizacji lokalizacji sieci recyklingu.

2. DWUKRYTERIALNY MODEL SIECI RECYKLINGU

W opisanym modelu wielokryterialnym wykorzystano dwie cząstkowe funkcje oceny: jedną przypisaną do uczestników sieci oraz drugą odzwierciedlającą preferencje właścicieli pojazdów, których można także określić użytkownikami sieci. Dla uczestników sieci jako funkcję kryterium przyjęto maksymalizację rentowności działania, a dla właścicieli pojazdów za kryterium oceny sieci przyjęto minimalizację kosztów związanych z przekazaniem SWE do recyklingu.

Pierwsza funkcja cząstkowa, oznaczona jako f_1 , odnosząca się do rentowności działania podmiotów, wyrażona jest różnicą pomiędzy całkowitymi przychodami sieci a całkowitymi kosztami sieci, czyli obejmuje:

- przychody punktów zbierania (R^{CP}), stacji demontażu (R^{CS}) i młynów przemysłowych (R^{CM}),
- koszty funkcjonowania podmiotów: tj. punktów zbierania (K^{CP}), stacji demontażu (K^{CS}) i młynów przemysłowych (K^{CM}), na które składają się koszty stałe i koszty zmienne,
- koszty transportu SWE i odpadów pomiędzy punktami zbierania i stacjami demontażu (K^{TC}), stacjami i młynami przemysłowymi (K^{TD}), stacjami i wytypowanymi zakładami recyklingu materiałowego (K^{TE}, K^{TF}) oraz młynami i wytypowanymi zakładami recyklingu materiałowego (K^{TG}, K^{TH}).

Dla cząstkowej funkcji kryterium wyrażającej rentowność sieci będzie poszukiwana maksymalna wartość funkcji, czyli:

$$f_1 = \max\{R^{CP} + R^{CS} + R^{CM} - K^{CP} - K^{CS} - K^{CM} - K^{TC} - K^{TD} - K^{TE} - K^{TF} - K^{TG} - K^{TH}\} \quad (2)$$

Druga funkcja cząstkowa została wyrażona jako suma kosztów ponoszonych przez właścicieli pojazdów w związku z oddaniem pojazdu do sieci. Funkcja oceny ma jednocześnie na celu zapewnienie dostępności sieci. Im więcej jest na danym obszarze miejsc przekazania SWE (punktów zbierania lub stacji demontażu) tym koszty dla właścicieli są niższe, a zatem minimalizacja kosztów przekazania pojazdów do sieci jest równoznaczna z maksymalizacją dostępności sieci.

Funkcja kryterium dotycząca minimalizacji kosztów przekazania SWE do sieci recyklingu obejmuje minimalizację:

- kosztów transportu SWE na połączeniach między źródłami i punktami zbierania (K^{TA}),

- kosztów transportu SWE na połączeniach między źródłami i stacjami demontażu (K^{TB}). Oczywiście poszukujemy wartości minimalnej tej funkcji, tj.:

$$f_2 = \min\{K^{TA} + K^{TB}\} \quad (3)$$

Dane niezbędne do sformułowania matematycznego dwukryterialnego zadania optymalizacyjnego dla modelu przebudowy są następujące:

- Koszty stałe punktów zbierania (k_p^{SP}), stacji demontażu (k_s^{SS}), młynów przemysłowych (k_m^{SM}).
- Jednostkowe koszty zmienne stacji demontażu (k_s^{JZS}) i młynów przemysłowych (k_m^{JZM}).
- Jednostkowe koszty stałe transportu dla połączeń pomiędzy źródłami i punktami zbierania ($k_{i,p}^{TSA}$), źródłami i stacjami demontażu ($k_{i,s}^{TSB}$), punktami zbierania i stacjami demontażu ($k_{p,s}^{TSC}$), stacjami demontażu i młynami przemysłowymi ($k_{s,m}^{TSD}$), stacjami demontażu i zakładami recyklingu tworzyw sztucznych ($k_{s,t}^{TSE}(\mu_s^{SD})$), stacjami demontażu i zakładami recyklingu metali nieżelaznych ($k_{s,n}^{TSF}(\mu_s^{SD})$), młynami przemysłowymi i zakładami recyklingu metali żelaznych ($k_{m,n}^{TSG}(\mu_m^{MP})$) oraz młynami przemysłowymi i zakładami recyklingu metali nieżelaznych ($k_{m,z}^{TSH}(\mu_m^{MP})$).
- Jednostkowe koszty zmienne dla połączeń pomiędzy źródłami i punktami zbierania ($k_{i,p}^{TZA}$), źródłami i stacjami demontażu ($k_{i,s}^{TZB}$), punktami zbierania i stacjami demontażu ($k_{p,s}^{TZC}$), stacjami demontażu i młynami przemysłowymi ($k_{s,m}^{TZD}$), stacjami demontażu i zakładami recyklingu tworzyw sztucznych ($k_{s,t}^{TZE}(\mu_s^{SD})$), stacjami demontażu i zakładami recyklingu metali nieżelaznych ($k_{s,n}^{TZF}(\mu_s^{SD})$), młynami przemysłowymi i zakładami recyklingu metali żelaznych ($k_{m,n}^{TZG}(\mu_m^{MP})$) oraz młynami przemysłowymi i zakładami recyklingu metali nieżelaznych ($k_{m,z}^{TZH}(\mu_m^{MP})$).
- Macierz odległości pomiędzy: źródłami a potencjalnymi punktami zbierania ($d_{i,p}^A$) i stacjami demontażu ($d_{i,s}^B$), punktami zbierania i stacjami demontażu ($d_{p,s}^C$), stacjami i młynami przemysłowymi ($d_{s,m}^D$), zakładami recyklingu tworzyw sztucznych ($d_{s,t}^E$) i metali nieżelaznych ($d_{s,n}^F$) oraz młynami przemysłowymi i zakładami recyklingu metali nieżelaznych ($d_{m,n}^G$) i metali żelaznych ($d_{m,z}^H$).
- Liczba SWE przypadających na każdą gminę w kraju (q_i^I).
- Potencjały przerobowe wszystkich stacji demontażu (μ_s^{SD}), młynów przemysłowych (μ_m^{MP}) i zakładów recyklingu tworzyw sztucznych (μ_t^{ZRT}), zakładów recyklingu metali nieżelaznych (μ_n^{ZRN}), zakładów recyklingu metali żelaznych (μ_z^{ZRZ}).
- Przeliczniki przetworzenia SWE na karoserię (χ^D), na tworzywa sztuczne (χ^E), metale nieżelazne (χ^F) oraz przeliczniki przetworzenia karoserii na metale nieżelazne (χ^G) i metale żelazne (χ^H).
- Maksymalna odległość pomiędzy źródłem a najbliższym punktem zbierania lub stacją demontażu (d^{max1}).
- Przychody jednostkowe punktów zbierania (r_p^{JP}), stacji demontażu (r_s^{JS}) i młynów przemysłowych (r_m^{JM}).
- Celem jest wyznaczenie zmiennych decyzyjnych określających:
- Miejsca lokalizacji dla punktów zbierania pojazdów (x_p^{PZ}), stacji demontażu (x_s^{SD}) i młynów przemysłowych (x_m^{MP}).

- Wielkości przepływów: pomiędzy źródłami i punktami zbierania ($q_{i,p}^A$), źródłami i stacjami demontażu ($q_{i,s}^B$) oraz na wejściu do punktów zbierania (q_p^{PZ}), stacji demontażu (q_s^{SD}), młynów przemysłowych (q_m^{MP}), zakładów recyklingu tworzyw sztucznych (q_t^{ZRT}), metali żelaznych (q_n^{ZRN}) i metali nieżelaznych (q_z^{ZRRZ}).
- Przyporządkowanie każdego z podmiotów do podmiotu stanowiącego kolejne ogniwo w łańcuchu technologicznym dla danego zbioru połączeń tj.: punktów zbierania do stacji demontażu ($y_{p,s}^C$), stacji demontażu do młynów przemysłowych ($y_{s,m}^D$), zakładów recyklingu tworzyw sztucznych ($y_{s,t}^E$) i metali nieżelaznych ($y_{s,n}^F$) oraz młynów przemysłowych do zakładów recyklingu metali nieżelaznych ($y_{m,n}^G$) i zakładów recyklingu metali żelaznych ($y_{m,z}^H$).

Tak, aby funkcja cząstkowa f_1 przyjmowała wartość maksymalną, przy czym:

$$\begin{aligned}
 f_1 = & \sum_{p \in P} r_p^{JP} q_p^{PZ} + \sum_{s \in S} r_s^{JS} q_s^{SD} + \sum_{m \in M} r_m^{JM} q_m^{MP} - \sum_{p \in P} k_p^{SP} x_p^{PZ} - \\
 & - \sum_{s \in S} (x_s^{SD} k_s^{SS} + k_s^{ZS} q_s^{SD}) - \sum_{m \in M} (x_m^{MP} k_m^{SM} + k_m^{ZM} q_m^{MP}) - \\
 & - \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} q_p^{PZ} (d_{p,s}^C k_{p,s}^{TZC} + k_{p,s}^{TSC}) - \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \chi^D q_s^{SD} (d_{s,m}^D k_{s,m}^{TZD} + k_{s,m}^{TSD}) - \\
 & - \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \chi^E q_s^{SD} [d_{s,t}^E k_{s,t}^{TZE} (\mu_s^{SD}) + k_{s,t}^{TSE} (\mu_s^{SD})] - \\
 & - \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \chi^F q_s^{SD} [d_{s,n}^F k_{s,n}^{TZF} (\mu_s^{SD}) + k_{s,n}^{TSF} (\mu_s^{SD})] - \\
 & - \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \chi^G q_m^{MP} [d_{m,n}^G k_{m,n}^{TZG} (\mu_m^{MP}) + k_{m,n}^{TSG} (\mu_m^{MP})] - \\
 & - \sum_{m \in M} \sum_{z \in Z} \chi^H q_m^{MP} [d_{m,z}^H k_{m,z}^{TZH} (\mu_m^{MP}) + k_{m,z}^{TSH} (\mu_m^{MP})]
 \end{aligned} \tag{4}$$

gdzie:

- p – bieżący numer punktu zbierania,
- P – zbiór numerów punktów zbierania,
- s – bieżący numer stacji demontażu,
- S – zbiór numerów stacji demontażu,
- m – bieżący numer młyna przemysłowego,
- M – zbiór numerów młynów przemysłowych,
- t – bieżący numer zakładu recyklingu tworzyw sztucznych,
- T – zbiór numerów zakładów recyklingu tworzyw sztucznych,
- n – bieżący numer zakładu recyklingu metali nieżelaznych,
- N – zbiór numerów zakładów recyklingu metali nieżelaznych,
- z – bieżący numer zakładu recyklingu metali żelaznych,
- Z – zbiór numerów zakładów recyklingu metali żelaznych.

A funkcja f_2 przyjmowała wartość minimalną, przy czym:

$$f_2 = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} q_{i,p}^A (d_{i,p}^A k_{i,p}^{TSA} + k_{i,p}^{TZA}) + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} q_{i,s}^B (d_{i,s}^B k_{i,s}^{TzB} + k_{i,s}^{TSB}) \tag{5}$$

gdzie:

- i – bieżący numer źródła SWE,
- I – zbiór numerów źródeł SWE.

Rozwiązanie zadania optymalizacyjnego musi spełniać szereg ograniczeń wynikających ze specyfiki funkcjonowania sieci recyklingu, uregulowań prawnych oraz innych wymagań stawianych sieci recyklingu.

Ograniczenia te dotyczą:

- Konieczności przekazania wszystkich SWE do sieci recyklingu.
- Zagwarantowania, że potencjał przerobowy poszczególnych podmiotów nie zostanie przekroczony.
- Kształtowania wielkości przepływów na wejściu i wyjściu z poszczególnych podmiotów tak, aby wszystkie SWE i odpady zostały przekazane do przedsiębiorstw na dalszych etapach cyklu technologicznego.
- Jednoznaczności przyporządkowania poszczególnych podmiotów, co oznacza, że każdy podmiot może współpracować tylko z jednym przedsiębiorstwem danego typu na kolejnym etapie cyklu technologicznego.
- Zagwarantowania, że jeżeli lokalizacja danego podmiotu nie zostanie wybrana, to nie zostaną do tego podmiotu skierowane przepływy SWE lub odpadów.
- Zapewnienia, że w określonej odległości od źródła będzie funkcjonował punkt zbierania lub stacja demontażu.
- Wyrażenia zmiennych decyzyjnych odnoszących się do przepływów SWE liczbami całkowitymi dodatnimi.
- Wyrażenia zmiennych decyzyjnych odnoszących się do przepływów odpadów liczbami nieujemnymi.
- Wyrażenia zmiennych decyzyjnych dotyczących wyznaczania lokalizacji podmiotów liczbami binarnymi.

3. OPTIMALIZACJA SIECI NA PRZYKŁADZIE POLSKI

Przedstawiony powyżej model matematyczny został zastosowany do optymalizacji sieci recyklingu w Polsce. W zadaniu przebudowy sieci lokalizacje podmiotów są wybierane spośród istniejących faktycznie lokalizacji. W kraju na koniec 2010 roku funkcjonowało 117 punktów zbierania, 689 stacji demontażu oraz 7 młynów przemysłowych, 26 zakładów recyklingu metali nieżelaznych, 18 zakładów recyklingu tworzyw sztucznych i 16 zakładów recyklingu metali żelaznych (hut). Z uwagi na to, że założono, że wszystkie wycofywane z użytku pojazdy trafiają do sieci recyklingu, niezbędne było wskazanie dodatkowych lokalizacji młynów przemysłowych, tak, aby można było zagospodarować odpady z wszystkich pojazdów. W zadaniu wskazano 20 dodatkowych potencjalnych lokalizacji młynów.

Ponadto na potrzeby weryfikacji modelu i optymalizacji sieci recyklingu przyjęto następujące założenia:

- Sieć funkcjonuje zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami prawa, w szczególności ustawy o recyklingu [8]. Ponadto zarówno punkty zbierania, stacje demontażu jak i młyny przemysłowe muszą spełniać wymogi co do wyposażenia technicznego określone w rozporządzeniach do ustawy [5,6,7].

- Liczba pojazdów wycofanych z eksploatacji wynosi 824 733 rocznie, czyli 5% parku pojazdów w kraju. Wycofane z użytku pojazdy przypisano do gmin, które traktowane są jako źródła SWE.
- Podstawową jednostką podziału geograficznego są gminy. Całkowita liczba gmin wynosi 2478.
- Zgodnie z obowiązującymi przepisami maksymalna odległość pomiędzy źródłem SWE, a najbliższym punktem zbierania lub stacją demontażu wynosi 50 km.
- Stacje demontażu i młyny przemysłowe mają określony potencjał przerobowy. Natomiast punkty zbierania nie mają potencjału przerobowego, mogą przyjąć tyle SWE ile odbierze od nich współpracująca z nimi stacja demontażu.
- Dla młynów przemysłowych oraz zakładów recyklingu materiałowego przyjęto, że jedna trzecia ich potencjału przerobowego jest wykorzystywana na potrzeby recyklingu pojazdów.
- Średnia masa SWE przyjętego do sieci recyklingu wynosi 1010 kg.
- Wskaźniki przetworzenia kształtują się następująco: przelicznik przetworzenia SWE na karoserię 0,5713 masy początkowej SWE, przelicznik przetworzenia SWE na odpady z tworzyw sztucznych 0,064 masy początkowej, przelicznik przetworzenia SWE na odpady z metali nieżelaznych 0,038 masy początkowej, przelicznik przetworzenia karoserii na metale żelazne 0,85 masy karoserii, a przelicznik przetworzenia karoserii na metale nieżelazne 0,05 masy karoserii.

Dla zadania optymalizacyjnego rozwiązywanego dla modelu wielokryterialnego, w którym poprawa realizacji jednej cząstkowej funkcji oceny pogarsza realizację innej cząstkowej funkcji oceny nie da się zaproponować jednego najlepszego rozwiązania, które będzie ekstremalizować wartości wszystkich funkcji cząstkowych.

W celu znalezienia rozwiązań funkcji celu dla przedstawionego modelu dwukryterialnego, funkcja globalna została sprowadzona do jednego kryterium za pomocą funkcji skalaryzującej. Wybrana metoda polega na przypisaniu wag każdej z cząstkowych funkcji oceny i szukaniu rozwiązań optymalnych dla różnych kombinacji wag. Nadana waga cząstkowej funkcji określa znaczenie danego elementu dla rozwiązania problemu. Optymalizacja wielokryterialna polega wówczas na znalezieniu zbioru rozwiązań optymalnych o różnym stopniu kompromisu (relacji) pomiędzy poszczególnymi kryteriami. Rozwiązanie stanowi zatem zbiór punktów, które spełniają tzw. optymalność w sensie Pareto. Dla dwóch funkcji jednej zmiennej jest to zbiór rozwiązań leżący pomiędzy minimami tych funkcji, czyli obszar pomiędzy punktem, gdzie jedna funkcja posiada optymalne rozwiązanie, a punktem, gdzie znajduje się optymalne rozwiązanie dla drugiej funkcji celu. Następnie znając preferencje i siłę przetargową osób, których interesy są uwzględniane w optymalizacji decydent wybiera ze zbioru rozwiązań to, które najlepiej odpowiada określonym preferencjom.

Analizując kształtowanie wartości wybranych w modelu wielokryterialnym funkcji cząstkowych, elementem decydującym o wartości całkowitej funkcji użyteczności jest cząstkowa funkcja odzwierciedlająca maksymalizację korzyści z punktu widzenia sieci. Optymalizowanie całkowitej funkcji użyteczności bez użycia wag oznaczałoby w praktyce optymalizację jednokryterialną, dla której najlepsze rozwiązanie zbliżone byłoby do wyników dla modelu jednokryterialnego przebudowy sieci z kryterium maksymalizacji rentowności. Z uwagi na dysproporcje wartości cząstkowych funkcji oceny do rozwiązania zadania optymalizacyjnego przyjęto, że waga u_1 jest zawsze równa jeden, po to aby wartości funkcji oceny dla uczestników sieci nie zdominowały całkowitej wartości funkcji użyteczności. Waga u_2 cząstkowej funkcji oceny związanej z maksymalizacją korzyści dla właścicieli zmienia się

w przedziale między 1 a 150. Dla $u_2 = 1$ każda złotówka maksymalizacji korzyści dla właścicieli jest tyle samo warta co każda złotówka maksymalizacji korzyści dla podmiotów sieci, ale już dla $u_2 = 100$ każda złotówka maksymalizująca oszczędności właścicieli jest równoważna 100 złotym w cząstkowej funkcji oceny dla uczestników sieci.

W zależności od wagi kryterium najlepsze otrzymane rozwiązanie jest inne. Porównując najlepsze rozwiązania dla skrajnych wag cząstkowej funkcji kryterium maksymalizacji korzyści właścicieli SWE ($u_2 = 1$ i $u_2 = 150$) widać, że zmniejszenie kosztów właścicieli wynosi 25%, ale towarzyszy temu spadek rentowności sieci o 43% (tab.1).

Podane w tabeli liczby podmiotów są średnimi ilościami uzyskanymi w trakcie poszczególnych uruchomień optymalizacji dla określonej wartości wagi. W zależności od wagi liczba punktów zbierania waha się w przedziale od 6 do 32, a stacji demontażu między 390 a 439. Dostępność sieci zmienia się tym samym z 396 miejsc, w których właściciel może oddać SWE (punktów zbierania i stacji demontażu łącznie) do 471 miejsc, czyli wzrasta o 20%. Liczba młynów we wszystkich rozwiązaniach wynosi 13.

Dolną granicę kosztów dla właścicieli pojazdów stanowi 12,1 miliona PLN. Jest to wartość kosztów oddania SWE do sieci dla rozwiązania, w którym utrzymane zostaną wszystkie istniejące punkty zbierania i stacje demontażu i tym samym dostępność sieci wyniesie 806 miejsc, w których właściciele mogą oddać pojazdy do recyklingu. Rozwiązanie to gwarantuje dostępność o 70% lepszą od rozwiązania dla najwyższej wagi dla kryterium maksymalizacji korzyści dla właścicieli, ale poprawa wartości całkowitych kosztów przekazania SWE do sieci ponoszonych przez właścicieli wynosi tylko niecałe 1,5%. Jednocześnie dla takiej gęstości sieci strata generowana przez cały system wynosi ponad 65,3 miliona PLN rocznie.

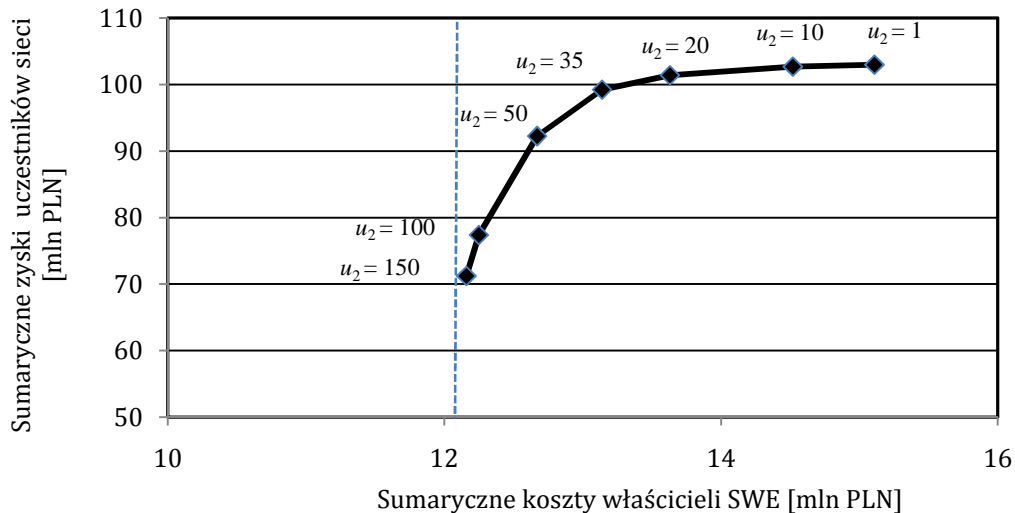
Tablica 1. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla przebudowy sieci w zależności od wagi cząstkowej funkcji kryterium

Waga u_1	1	1	1	1	1	1	1
Waga u_2	1	10	20	35	50	100	150
Zysk sieci (f_1) [tys.PLN]	102 110	102 690	101 400	99 230	92 230	77 390	71 220
Koszt właścicieli (f_2) [tys.PLN]	15 110	14 520	13 630	13 140	12 670	12 250	12 130
Liczba PZ	6	10	11	12	25	31	32
Liczba SD	390	388	391	393	406	429	439
Liczba MP	13	13	13	13	13	13	13

Źródło: opracowanie własne

Z kolei górną granicę kosztów dla właścicieli będzie poziom 15,1 miliona PLN, czyli wartość otrzymywana w wyniku optymalizacji dla wagi $u_2 = 1$. Zaproponowana w tym rozwiązaniu liczba podmiotów sieci jest najniższa. W takiej sieci będzie funkcjonować 396 przedsiębiorstw, przyjmujących SWE do recyklingu. Kolejne obniżenie kosztów dla sieci byłoby możliwe tylko przy niedotrzymaniu ograniczeń związanych z maksymalnymi odległościami między źródłami a punktami zbierania/stacjami demontażu, a przy dalszym obniżaniu liczby stacji niezachowany zostałby także warunek związany z obowiązkiem przetwarzania wszystkich SWE. W skrajnym przypadku w sieci funkcjonowałaby jedna stacja demontażu.

Najlepsze otrzymane wyniki dla przyjętych wag można przedstawić jako zbiór rozwiązań leżących na krzywej (rys. 1). Każdy wyróżniony punkt odzwierciedla najlepsze znalezione rozwiązanie dla danej wagi u_2 .



Rys. 1. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla przebudowy sieci w zależności od wartości wagi u_2 .

Źródło: opracowanie własne.

WNIOSKI

Właściwa organizacja sieci recyklingu pojazdów wymaga całościowego ujęcia obejmującego wszystkie kluczowe podmioty, przepływy i powiązania, które między nimi występują oraz interakcje z otoczeniem.

Podejmując decyzje dotyczące lokalizacji podmiotów powinno się brać pod uwagę jak najwięcej czynników uwzględniających zarówno kwestie techniczne, ekonomiczne, środowiskowe jak i prawne. Dzięki temu kształtowanie wybranego fragmentu lub całości sieci na danym obszarze zapewni maksymalizację korzyści zarówno z punktu widzenia uczestników sieci, właścicieli pojazdów, administracji państwowej jak i gospodarki jako całości.

W artykule zaprezentowano model dwukryterialny służący przebudowie sieci na danym obszarze, który następnie zastosowano do optymalizacji sieci recyklingu w Polsce. Przedstawionego wyżej zbioru rozwiązań efektywnych zadania wielokryterialnego nie można traktować jako końcowego rozwiązania problemu decyzyjnego, a jedynie jako podstawę (punkt wyjścia) wyboru przez decydenta ostatecznego rozwiązania.

Oceniając rozwiązania otrzymane w wyniku optymalizacji z wykorzystaniem opisanego modelu można wyciągnąć następujące wnioski:

- Spośród różnych wariantów rozwiązań można wybrać takie rozwiązanie, które będzie jednocześnie uwzględniało wymagania właścicieli pojazdów jak i interes ekonomiczny uczestników sieci recyklingu.
- Wyniki wskazują, że w sieci powinno funkcjonować jak najmniej podmiotów z maksymalnie wykorzystanym potencjałem przerobowym.
- W polskiej sieci recyklingu brakuje młynów przemysłowych. Właściwe zagospodarowanie wszystkich pojazdów wycofywanych z eksploatacji wymaga prawie podwojenia liczby działających w sieci młynów przemysłowych.

- W polskich warunkach funkcjonowanie punktów zbierania nie jest korzystnym rozwiązaniem, z uwagi na wysokie koszty stałe działania tych podmiotów, będące pochodną wysokich nakładów inwestycyjnych określonych w regulacjach prawnych.
- Koszty transportu nie wpływają znacząco na lokalizację podmiotów, podstawowe znaczenie dla optymalizacji mają koszty działalności przedsiębiorstw.

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.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [2] Merkisz-Guranowska A.: A formalization of the description of the recycling network for motor vehicles, *Archiwum Transportu* 2009, volume 21, issue 3-4, Warszawa 2009.
- [3] Merkisz-Guranowska A.: Recykling samochodów w Polsce, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań-Radom 2007.
- [4] Michalewicz Z., Fogel D.B.: Jak to rozwiązać czyli nowoczesna heurystyka, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie minimalnych wymagań dla strzępiarek oraz metod rozdziału odpadów na frakcje materiałowe z 12.10.2005, Dz.U. nr 214, poz. 1807, 2005.
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie wymagań dla punktów zbierania pojazdów wycofanych z eksploatacji z 12.10.2005, Dz.U. nr 214, poz. 1806, 2005.
- [7] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie wymagań dla stacji demontażu oraz sposobu demontażu pojazdów wycofanych z eksploatacji z 28.07.2005, Dz.U. nr 143, poz. 1206, 2005.
- [8] Ustawa o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji z 20.01.2005, Dz.U. nr 25, poz. 202, 2005 z późniejszymi zmianami.

MODELING OF THE VEHICLE RECYCLING NETWORK ENTITY LOCATION ON THE POLISH RECYCLING NETWORK EXAMPLE

Abstract:

The paper discusses the issue of modeling of the vehicle recycling network. Organization and operation of the recycling network involves interests of different stakeholders including government offices, recycling network operators, car industry, especially car manufacturers and end-of-life vehicles owners. Interests of these stakeholders must be taken into account in the decision-making process. In this paper an example of a decision support bi-criteria model that reflects both vehicles owners and recycling network operators requirements has been presented. The mathematical model description containing a system of constraints as well as the objective function that constitutes the basis for the evaluation of the proposed solutions was formulated and the optimization task for Polish recycling network presented.

Key words: location modeling, end-of-life vehicles, recycling network optimization