

# OPTIMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA W PROCESACH DECYZYJNYCH I JEJ WYKORZYSTANIE W ZARZĄDZANIU ŚRODOWISKIEM W ZRÓWNOWAŻONYCH MIASTACH

**Katarzyna Żykwinska-Rouba**

Politechnika Łódzka

Wydział Zarządzania i Inżynierii Produkcji

katarzyna.zykwinska-rouba@p.lodz.pl

**Streszczenie:** *Optymalizacja wielokryterialna jest narzędziem wspomagającym procesy decyzyjne w wielu dziedzinach i obszarach. Od wielu lat są one wykorzystywane do wspierania decydentów w zakresie podejmowania decyzji związanych z zarządzaniem środowiskiem, będących decyzjami, w których pod uwagę muszą byćbrane sprzeczne kryteria, a wśród interesariuszy są grupy o diametralnie innych potrzebach i interesach. Idea zrównoważonego rozwoju, która zakłada równe traktowanie kwestii społecznych, gospodarczych i środowiskowych, przyczyniła się do wzrostu znaczenia środowiskanaturalnegonaświecie. Z czasem stała się elementem nowoczesnej koncepcji inteligentnych miast tzw. smart city, które ewoluowały w tzw. zrównoważone miasta (sustainable smart city). Mnogość aspektów i problemów, z jakimi spotykały się władze miast, spowodowała ich zainteresowanie narzędziami wspierającymi podejmowanie decyzji. Na przestrzeni ostatnich 10 lat modele analizy i optymalizacji wielokryterialnej zostały mocno rozwinięte i wykorzystywane również na potrzeby zarządzania środowiskiem w inteligentnych miastach. W Indiach podjęto próbę opracowania systemu wspomagania podejmowania decyzji dla zrównoważonych miast (EDSS-SSCI) w latach 2015–2020. Biorąc pod uwagę podejście do rozwiązywania problemów w zakresie zarządzania środowiskiem, zbliżonych dla większości miast na świecie, można podjąć próbę stworzenia założeń dla sustainable smart cities dla polskich miast.*

**Słowa kluczowe:** smart city, sustainable smart city, optymalizacja wielokryterialna, wskaźniki środowiskowe, zarządzanie środowiskiem.

## 1. Wprowadzenie

Idea zrównoważonego rozwoju, szeroko stosowana na świecie, nadal wzbudza wiele dyskusji. Nie opracowano dotychczas jednolitej definicji, ale jej podstawowe intencje są jasno określone – ma na celu ukierunkowanie działań i podejmowanie decyzji przez organizacje (polityków, decydentów, menedżerów itp.) w taki sposób, aby potrzeby obecnych i przyszłych pokoleń zostały spełnione bez pogorszenia obecnego stanu środowiska i z zachowaniem obecnego poziomu życia społeczeństw. Poszczególne kraje i organizacje mają różne priorytety i tym samym różne podejścia do praktyki zrównoważonego rozwoju, dlatego też trudne jest opracowanie uniwersalnych wskaźników określających stopień spełnienia założeń tego podejścia. Rozwój zrównoważony zależy od kontekstu, możliwości i potrzeb określonych w danym regionie/organizacji czy sektorze gospodarczym, bo to, co jest zrównoważonym podejściem w jednym, nie musi oznaczać tego samego dla innego obszaru. Ta obserwacja doprowadziła do nieco bardziej elastycznego zdefiniowania pojęcia trwałego rozwoju, odwołującego się do regionalnych lub sektorowych polityk; tak też powstały pojęcia: „zrównoważony transport”, „zrównoważone miasta” czy „rolnictwo zrównoważone”.

## 2. Smart city i sustainable smart city

Zrównoważoność rozwoju z czasem stała się elementem nowoczesnej koncepcji inteligentnych miast tzw. *smart cities*, które wyróżniają się następującymi czynnikami:

- zaspokajanie potrzeb wszystkich mieszkańców,
- ciągle podnoszenie jakości życia mieszkańców,
- wykorzystanie najnowocześniejszych technologii,
- ponadprzeciętne tempo rozwoju,
- zrównoważoność rozwoju [1].

*Smart city* definiowane jest również jako miasto inwestujące w kapitał ludzki i społeczny, w którym infrastruktura komunikacyjna sprzyja i prowadzi do zrównoważonego rozwoju oraz podnosi jakość życia, gdzie kwestie publiczne rozwiązywane są przy dużym zaangażowaniu różnego rodzaju grup interesariuszy będących partnerami władz [2]. Wśród wielu aspektów koncepcji rozwoju *smart cities* oraz problemów, z jakimi stykają się władze i interesariusze, a istotnych z punktu widzenia niniejszych rozważań, są aspekty zarządzania środowiskiem, które same w sobie w dużej mierze decydują o jakości życia, a także bezpośrednio

wpływają na zdrowie i życie mieszkańców. Są one niestety najczęściej marginalizowane i pomijane. Decyduje o tym brak bezpośrednich i wymiernych korzyści materialnych oraz stosunkowo duże koszty wdrażania działań prośrodowiskowych, a przecież smart city jako takie jest źródłem wielu zagrożeń środowiskowych, co wynika z techniczno-urbanistycznego charakteru miast jako takich. W literaturze przedmiotu podnosi się konieczność zaprojektowania nowych modeli i narzędzi, które będą zapobiegały wystąpieniom zanieczyszczenia środowiska, przeprowadzenia kompletnych badań dotyczących wpływu pozostałych aspektów funkcjonowania smart city na środowisko, jak choćby inteligentnej gospodarki, a także stworzenia warunków prawno-ekonomicznych sprzyjających realizacji proekologicznych rozwiązań, z uwzględnieniem społeczeństwa [1].

W odpowiedzi na problemy środowiskowe miast pojawiła się koncepcja miasta zrównoważonego (*sustainable smart city*), wywodząca się ze wspomnianej koncepcji zrównoważonego rozwoju. Nie ma ona jednolitej definicji, jednakże wyraźnie wskazuje się tu na ograniczanie do minimum wpływu gospodarki i infrastruktury miejskiej na środowisko, a decyzje są podejmowane z uwzględnieniem głosów lokalnej społeczności oraz rachunku ekonomicznego [2]. W literaturze istnieje kilka prób zdefiniowania tego pojęcia, jedną z nich jest definicja Blanco i Mazmanian, którzy postrzegają miasta zrównoważone jako miasta zrównoważone ekologicznie, sprawiedliwe społecznie i opłacalne ekonomicznie, będące aktywną, rozwijającą się, ekologiczną społecznością, zajmującą się problemami teraźniejszości i przewidywalnej przyszłości, przy jednoczesnym stawieniu czoła trwającym wyzwaniom, związanym z rozwojem gospodarczym, równością i sprawiedliwością społeczną oraz ochroną środowiska [3].

### **3. Wielokryterialne wspomaganie decyzji w zarządzaniu środowiskiem**

Te trzy obszary: społeczny, środowiskowy i ekonomiczny/techniczny to płaszczyzny, w których podejmowanie decyzji i procesy decyzyjne wymagają wzięcia pod uwagę wielu sprzecznych ze sobą kryteriów, które muszą uwzględniać perspektywę długoterminową. Decyzje podejmowane we wszystkich tych obszarach muszą odzwierciedlać długoterminowy kompromis pomiędzy utrzymaniem integralności środowiskowej, sprawiedliwości społecznej i efektywności ekonomicznej przy jednoczesnym zaangażowaniu zainteresowanych stron. Dodatkowym elementem, który musi być wzięty pod uwagę, to niepewność, która zwiększa ryzyko podejmowanych działań i je determinuje. W ciągu ostatnich kilku lat narzędzia wspomagające podejmowanie decyzji związanych z rozwojem zrównoważonym bardzo się rozwinęły. Do tych, które zaadoptowano na potrzeby rozwiązywania problemów złożonych i najczęściej wykorzystywanych należą metody analizy wielokryterialnej (MCDM – *Multiple Criteria Decision Making*

stosowane częściej w Stanach Zjednoczonych, natomiast w Europie najczęściej stosowane jest wielokryterialne wspomaganie decyzji MCDA – *Multi Criteria Decision Aid*). Analiza wielokryterialna, jak podaje Bewszko [4] służy podejmowaniu decyzji i rozwiązywaniu problemów w oparciu o wiele kryteriów, a jej głównym celem jest wsparcie decydentów stojących przed koniecznością podjęcia złożonej decyzji. Rozwiązywanie problemów jest tu interpretowane jako wybór „najlepszego” wariantu ze zbioru dostępnych wariantów, gdzie „najlepszy” oznacza najbardziej korzystny dla decydenta lub decydentów, bądź też rozwiązaniem może być wybór niewielkiego zestawu wariantów lub ich grupowanie według różnych zestawów preferencji. Stosowane do niedawna metody optymalizacji jednokryterialnej, w której szukano ekstremum jednego kryterium, traktując pozostałe wskaźniki jako ograniczenia modelu powodowały, iż algorytm optymalizacyjny starał się za wszelką cenę spełnić to ograniczenie, a w przypadku niepowodzenia, uzyskane rozwiązanie traktował jako niedopuszczalne. Podejście to nie sprawdza się w przypadku wielu kryteriów i wielu decydentów, dlatego podjęto udane próby implementacji podejścia wielokryterialnego, które generuje rozwiązanie najlepsze z punktu widzenia wielu kryteriów i dąży do zaspokojenia aspiracji na pewnym poziomie [4]. Optymalizacja wielokryterialna jest uznawana obecnie za jedną z najbardziej rzeczywistych i naturalnych koncepcji podejmowania decyzji. Wykorzystuje się ją wszędzie tam, gdzie wynik rozważań zależy od wielu czynników i gdy w decyzji należy uwzględnić kilka sprzecznych celów, pozwala bowiem na znalezienie dla nich najlepszego kompromisu. Istnieje wiele rodzajów modeli wykorzystujących analizę wielokryterialną. Rdzeniem wybranego MCDA/MCDM jest model decyzyjny, który specyfikuje, jakiego rodzaju informacje będą potrzebne do przeprowadzenia procesu decyzyjnego i wyboru rozwiązania. Jednym z bardziej znanych podziałów jest podział zaproponowany przez Guitouni [5]:

- metody elementarne: suma ważona, metoda leksykograficzna, metoda max-min;
- pojedyncze zsyntetyzowane kryterium: TOPSIS (*Technique for Order by Similarity to Ideal Solution*), MAVT (*Multi-Attribute Value Theory*), UTA (*Utility Theory Additive*), SMART i SMARTER (*Simple Multi-Attribute Ranking Technique; Simple Multi-Attribute Ranking Technique Exploiting Ranks*), MAUT (*multi-attribute utility theory*), AHP/FAHP (*Fuzzy/Analytic Hierarchy Process*) i ANP (*Analytic Network Process*), EVAMIX, rozmyta suma ważona, rozmyte max-min;
- metody przewyższania: ELECTRE (*Elimination et Choice Translating Reality*) I i II, III i IV, PROMETHEE I, PROMETHEE II, MELCHIOR, ORESTE, REGIME, NAIADE (*Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environment*);

- metodę MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*);
- metodę DEA (*Data Envelopment Analysis*).

Metody analizy wielokryterialnej zajmują się oceną zbioru alternatywnych rozwiązań pod względem wielu, zazwyczaj konfliktowych, kryteriów decyzyjnych. Przy podejmowaniu decyzji w zrównoważonym rozwoju jest ona bardzo przydatna z kilku powodów. Po pierwsze, pozwala na jednoczesne uwzględnienie w procesie decyzyjnym wpływu trzech obszarów (gospodarki, środowiska, społeczeństwa), po drugie – umożliwia przetwarzanie danych zarówno ilościowych, jak i jakościowych, po trzecie – angażuje w proces podejmowania decyzji różne grupy interesariuszy, najczęściej przedstawiających odmienne punkty widzenia [6].

Na przestrzeni ostatnich dziesięciu lat zauważono znaczny wzrost wykorzystywania narzędzi optymalizacji wielokryterialnej w procesach decyzyjnych, podejmowanych w kontekście zrównoważonego rozwoju. W literaturze przedmiotu można wyraźnie zauważyć kilka z nich, które stosowane są najczęściej. Najczęściej stosowaną metodą analizy wielokryterialnej jest metoda AHP/ANP. Polega ona na przedstawieniu problemu decyzyjnego w postaci struktury hierarchicznej, na szczycie której znajduje się cel decyzyjny, poniżej istotne i wpływające na niego kryteria, a na samym dole warianty decyzyjne. Niestety, nie zawsze możliwe jest takie ustrukturyzowanie problemów decyzyjnych, gdyż o wiele bardziej przedstawiają one swego rodzaju sieć wzajemnych powiązań i zależności. Tę właściwość uwzględniono w analitycznym procesie sieciowym (ANP), gdzie możliwy jest każdy rodzaj i kierunek wzajemnych relacji między poszczególnymi elementami w dowolnie wybranych grupach [7]. Dostępność tej metody, wynikająca z przyjaznego dla użytkownika oprogramowania do modelowania, a także – co bardzo istotne – możliwość wykorzystania jej w podejmowaniu decyzji grupowych, prawdopodobnie przesądziła o jej popularności.

Kolejną metodą wykorzystywaną w rozwiązywaniu problemów decyzyjnych jest metoda TOPSIS/VIKOR. To metoda identyfikacji najlepszego rozwiązania spośród skończonego zbioru rozwiązań-alternatyw. Według metodyki TOPSIS najlepsze rozwiązanie to takie, które posiada najkrótszą odległość do rozwiązania najlepszego, a zarazem najdalszą od rozwiązania najgorszego [8]. Decyzje środowiskowe podejmowane są zazwyczaj w warunkach niepewności i ryzyka. Do ich wsparcia najczęściej stosuje się metody wykorzystujące zestawy rozmyte, rozkłady prawdopodobieństwa, liczby szare itp. Przesławione powyżej metody AHP, TOPSIS mogą mieć również wymiar rozmyty [6].

Największym problemem, na jaki napotykają decydenci w zakresie podejmowania decyzji środowiskowych są odłożone w czasie ich efekty i możliwe konsekwencje. Pierwszy problem stanowi definicja perspektywy krótko-

i długoterminowej w kontekście określenia liczby lat. Co do zasady, zrównoważony rozwój zakłada pozostawienie obecnych zasobów naturalnych dla przyszłych pokoleń w stanie co najmniej nienaruszonym – pytanie zatem jest, kiedy następuje owa wymiana pokoleń. W literaturze przedmiotu podaje się liczbę od 30 do 150 lat, w zależności od autorów. W pracach opublikowanych na przestrzeni ostatniej dekady zidentyfikowano dwie metody optymalizacji wielokryterialnej, które umożliwiają ocenę długoterminowych efektów, zakładając użycie wielookresowych ewaluacji rozwiązań alternatywnych – wspomnianych już TOPSIS i PROMETHEE [6]. Ta ostatnia jest metodą służącą do wyznaczenia syntetycznego rankingu alternatyw, stosuje się ją poprzez porównania parami i relację przewyższania. W ramach tej metody określane są przepływy preferencji, w których określa się, w jakim stopniu badany wariant przewyższa inne warianty lub jest przewyższany przez pozostałe. Dla każdej z par oblicza się zagregowany indeks preferencji, a następnie wskazuje się dodatni i ujemny przepływ przewyższania. Dodatni przepływ przewyższania jest stopniem, w jakim rozpatrywany wariant przewyższa wszystkie pozostałe, natomiast ujemny przepływ przewyższania wyraża stopień odwrotny, czyli w jakim jest on przewyższany przez wszystkie inne warianty. Uporządkowanie całkowite otrzymuje się, wykorzystując przepływ preferencji netto [7].

Problemy decyzyjne, powstające we wdrażaniu koncepcji zrównoważonego rozwoju, a zwłaszcza zarządzania aspektami środowiskowymi, są bardzo złożone, ze względu na sprzeczne kryteria decyzyjne, zróżnicowane poglądy i wartości prezentowane przez interesariuszy, długoterminowe konsekwencje oceniane przez pryzmat niepewnej przyszłości oraz niedokładność danych, na jakich się opierają. Być może odpowiedzią na to wyzwanie jest ewolucja narzędzi modelowania niepewności, choćby z uwagi na fakt, iż nieprzewidziane zdarzenia mogą mieć wpływ na ocenę odległych rozwiązań alternatywnych.

#### **4. Systemy wspomaganie decyzji środowiskowych i ich wykorzystanie w zarządzaniu środowiskiem w zrównoważonych miastach: studium przypadku**

W odpowiedzi na wyzwania opisane powyżej, podjęto wysiłki zmierzające do stworzenia nowych narzędzi, umożliwiających radzenie sobie z bardziej złożonymi systemami, w wyniku których powstał środowiskowy system wspomaganie decyzji (EDSS – Environmental Decision Support Systems) [9]. System ten wykorzystywany jest do monitorowania i przechowywania danych, analizy sytuacji decyzyjnych, planowania, kontrolowania i przygotowywania działań naprawczych oraz komunikacji ze społeczeństwem. EDSS jest inteligentnym systemem,

który zdecydowanie skraca czas podejmowania decyzji, a także podnosi ich jakość. Składa się z systemów sztucznej inteligencji, elementów systemu informacji geograficznej, metod numerycznych i statystycznych oraz ontologii środowiska.

Wykorzystanie w systemie EDSS modeli numerycznych i sztucznej inteligencji zapewnia bezpośredni dostęp do wiedzy i nadaje temu narzędziu elastyczność i zdolność uczenia się. Ich integracja z modelami statystycznymi sprzyja większej dokładności i niezawodności, a także zwiększa przydatność do stosowania w różnych problemach. Jego budowa opiera się na pięciu poziomach:

1. Gromadzenie danych (budowa bazy danych, przetwarzanie informacji, dobór właściwych wskaźników).
2. Diagnostyka (wybór modelu do danego procesu).
3. Wspomaganie decyzji (wybór kryteriów, celów i zadań, wnioskowanie i przetwarzanie otrzymanych wariantów rozwiązań).
4. Przedstawienie zaproponowanych wariantów i modeli decydującym (zestawu czynności do wykonania w celu rozwiązania problemu).
5. Podjęcie działań oraz wyznaczenie poszczególnych wartości, które powinny być brane pod uwagę przez decydentów [9].

Kwestie ochrony środowiska należą do tych obszarów działalności człowieka, w których błędne decyzje w zakresie zarządzania mogą mieć katastrofalne konsekwencje zarówno społeczne, ekonomiczne, jak i ekologiczne. Podejmowanie decyzji o wsparciu procesu zarządzania modelem EDSS musi być wspólne dla decydentów i grup interesariuszy, w tym także dla społeczeństwa, którego podjęte decyzje będą dotyczyły bezpośrednio. EDSS przyczynia się nie tylko do znalezienia optymalnego rozwiązania spośród zestawu rozmaitych preferencji, ale powoduje także, iż mechanizm całego procesu jest bardziej otwarty i przejrzysty. EDSS może odgrywać kluczową rolę w interakcji pomiędzy ludźmi a ekosystemami, ponieważ jest narzędziem, które jest w stanie sprostać wielodyscyplinarnemu charakterowi i wysokiej złożoności problemów środowiskowych.

Biorąc pod uwagę dotychczasowe zastosowanie tego narzędzia w literaturze przedmiotu, pojawiły się wnioski i zalecenia dotyczące dalszych kierunków rozwoju. Przede wszystkim zauważono niebezpieczny trend pomijania grup użytkowników lub grup interesariuszy w procesie decyzyjnym, co – być może – jest spowodowane niejasnymi kryteriami lub też innymi problemami w identyfikacji tych grup. Aby grupa była wiarygodna, musi być zróżnicowana i reprezentatywna, dlatego dobór członków nie powinien stwarzać podejrzeń o stronniczość i faworyzowanie jednej z grup. Zaangażowanie przedstawicieli różnych obszarów, zwłaszcza w zarządzaniu środowiskiem, jest bardzo istotne, gdyż posiadają oni szeroką wiedzę i doświadczenie niezbędne do procesu podejmowania

decyzji w tym obszarze i jednocześnie dają bardzo ważne informacje zwrotne. Dopuszczenie ich do całego procesu podejmowania decyzji buduje poczucie odpowiedzialności i zwiększa prawdopodobieństwo zaakceptowania sugerowanych rozwiązań. Do procesu należy również zaprosić ekspertów – nie są oni interesariuszami. Ci drudzy mają wpływ na rozwój i określenie czynników, a pierwsi dogłębną wiedzę z danego tematu. Ich współpraca może zaowocować określeniem rodzaju poszukiwanych informacji (np. jakościowe, ilościowe, koncepcyjne), wyborem metody czy sposobu pozyskiwania informacji [6].

Sporym problemem dla decydentów w podejmowaniu decyzji środowiskowych jest wybór metody wspomagania decyzji. Przez wiele lat korzystano z systemów opartych na wiedzy, ocenie cyklu życia LCA, analizie kosztów i korzyści oraz analizie wielokryterialnej. Analiza kosztów i korzyści oraz LCA służą bardziej ocenie środowiskowej problemu, same w sobie nie są rzeczywistymi metodami wspierania decyzji, mogą natomiast służyć wsparciu innych systemów. Literatura przedmiotu wskazuje, iż na znaczeniu zyskuje optymalizacja wielocelowa lub wielowektorowa. Zdecydowanie najpopularniejszymi metodami są AHP/FAHP, PROMETHEE i ELECTRE. Analiza przypadków stwierdza jednak, iż stosowanie różnych metod może prowadzić do różnych wyników, co utrudnia decydentom podjęcie decyzji o tym, którą z metod wykorzystać. Z drugiej strony może to być argument za zastosowaniem kilku metod do jednego problemu, bo to pozwala na spojrzenie z różnych perspektyw i daje szansę na lepsze zrozumienie złożonych sytuacji, a tym samym wybór właściwego rozwiązania i ewentualnych alternatyw. Ważną kwestią, która rzadko jest poruszana przy okazji dyskusji nad rozwojem narzędzia EDSS, jest możliwość uzyskania zmiennych wyników w ramach jednej metody optymalizacyjnej. Ma to znaczenie we właściwym podejmowaniu decyzji, ponieważ decyzje mają charakter subiektywny, a zatem nie ma obiektywnie właściwej odpowiedzi. Przedstawienie sytuacji decyzyjnej na różne sposoby może prowadzić do różnych wyników i wyboru różnych alternatyw. Dodatkowo istnieje tendencja nadawania wyższej rangi kryteriom środowiskowym i społecznym niż celom ekonomicznym czy technicznym. Jest to uważane za bardziej akceptowalne społecznie (moralnie), niż sprzyjanie korzyściom ekonomicznym [6].

Biorąc pod uwagę doświadczenia zdobyte na przestrzeni lat oraz zaadopowanie idei zrównoważonego rozwoju przez zrównoważone miasta, w Indiach w 2015 r. powstał projekt opracowania, opartego na systemie EDSS programu EDSS-SSCI (*Environmental Decision Support System for Sustainable Smart City*) na potrzeby miast indyjskich [10]. Punktem wyjścia dla niego było znalezienie, a następnie zdefiniowanie 14 parametrów związanych ze środowiskiem, stosowanych przez Bank Światowy jako wskaźniki i kryteria rozwoju środowiska.



Są to parametry związane z następującymi obszarami:

- zarządzanie gospodarką odpadami (m.in. plan gospodarki odpadami, ilość odpadów poddanych recyklingowi i utylizacji, ilość zagospodarowanych bioodpadów, ilość energii i paliw pozyskanych w procesie utylizacji odpadów itd.);
- zarządzanie gospodarką wodną (m.in. identyfikacja strat wody, monitoring zasobów i zaopatrzenia w wodę, koszty obsługi systemu itd.);
- zarządzanie gospodarką ściekową (m.in. koszty obsługi systemu, dostęp do kanalizacji, oczyszczanie ścieków itd.);
- zarządzanie wodami opadowymi (odprowadzanie wody burzowej);
- zanieczyszczenie powietrza [10].

Oprócz tego pod uwagę wzięto wskaźniki środowiskowe z opracowania wytycznych dla Kluczowych Wskaźników dla Smart City, parametry stosowane w innych krajach (m.in. w Japonii i Niemczech). Efektem było powstanie systemu EDSS-SSCI opartego na 24 wskaźnikach środowiskowych, które następnie wykorzystano jako dane wejściowe (bazę danych) do stworzenia narzędzia decyzyjnego, służącego przeprowadzeniu procesu decyzyjnego, analizy porównawczej, oceny wyników i wdrożenia wybranych rozwiązań w jak najbardziej efektywny sposób, wykorzystując zasoby miejskie i zapewniając harmonijny rozwój miasta. System ten ma istotne znaczenie przy planowaniu strategicznym, szczególnie w kontekście decyzji politycznych, dotyczących rozwoju infrastruktury miejskiej. Przeprowadzono dogłębne analizy, dotyczące możliwości pozyskania danych do oceny wskaźników, bo – jak się okazało w trakcie prowadzenia analiz – dostępność danych jest bardzo istotna z punktu widzenia doboru wskaźników. Dane powinny być pozyskiwane ze sprawozdań rządowych, źródeł publicznych, wywiadów i obserwacji. Te z nich, których uzyskanie jest kosztowne lub też wymagają obszernych obliczeń (jak np. proponowany przez Bank Światowy wskaźnik śladu węglowego) nie powinny być uwzględniane. Zidentyfikowano kryteria, jakie należy zastosować do doboru wskaźników tak, aby mogły być one w pełni adekwatne. Należą do nich: istotność, kompletność, dostępność, zdolność do zmierzenia, wiarygodność i niezależność [10].

W poniższej tabeli przedstawiono 24 wskaźniki, które zastosowano we wspomnianym systemie EDSS SSCI, w podziale na obszary zarządzania środowiskiem w mieście.

Tabela 1. Wskaźniki stosowane w systemie EDSS-SSCI w poszczególnych obszarach zarządzania środowiskiem w mieście

Obszar zarządzania środowiskiem w mieście	Wskaźniki
Gospodarka odpadami	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Recykling i redukcja odpadów budowlanych i rozbiórkowych.</li> <li>2. Stopień segregacji.</li> <li>3. Programy gospodarki odpadami stałymi prowadzone w mieście w ciągu ostatnich trzech lat.</li> <li>4. Skuteczność zbierania odpadów komunalnych stałych.</li> <li>5. Zakres odzyskanych odpadów stałych.</li> <li>6. Stopień unieszkodliwiania.</li> <li>7. Koszty funkcjonowania gospodarki odpadami.</li> </ol>
Gospodarka wodna i wodociągowa	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. Odpowiednie zaopatrzenie w wodę.</li> <li>9. Ciągłość dostaw wody pod względem średniej liczby godzin na dobę.</li> <li>10. Inteligentne liczniki i wodomierze.</li> <li>11. Identyfikacja źródeł wody i eksploatacja wód podziemnych.</li> <li>12. Identyfikacja wycieków i awarii.</li> <li>13. Monitorowanie jakości wody.</li> <li>14. Koszty usług wodociągowych.</li> </ol>
Kanalizacja i urządzenia sanitarne	<ol style="list-style-type: none"> <li>15. Ilość toalet w przeliczeniu na mieszkańca.</li> <li>16. Adekwatność przepustowości oczyszczalni ścieków.</li> <li>17. Gospodarka ściekowa, w tym ilość ścieków oczyszczonych do ilości odebranych.</li> <li>18. Wydajność odbioru sieci kanalizacyjnej.</li> <li>19. Koszty systemu gospodarki ściekowej.</li> <li>20. Jakość oczyszczonych ścieków.</li> </ol>
Woda deszczowa	<ol style="list-style-type: none"> <li>21. Pokrycie obszaru zurbanizowanego siecią kanalizacji deszczowej.</li> </ol>
Zanieczyszczenie powietrza	<ol style="list-style-type: none"> <li>22. Jakość powietrza.</li> <li>23. Hałas.</li> <li>24. Jakość wód powierzchniowych i akwenów wodnych.</li> </ol>

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10].

Jak twierdzą autorzy opracowania, wybrane wskaźniki mogą z powodzeniem zostać wykorzystane do oceny porównawczej wyników miast w zakresie inteligentnego i zrównoważonego rozwoju, biorąc pod uwagę rosnące inwestycje i poprawę infrastruktury miejskiej. Program zrównoważonego miasta na bazie wyników pochodzących z EDSS-SSCI był przewidziany do wdrożenia w latach 2015–2020, nie ma zatem jeszcze danych i informacji o efektach jego wdrożenia.

Jak twierdzą autorzy opracowania, wybrane wskaźniki mogą z powodzeniem zostać wykorzystane do oceny porównawczej wyników miast w zakresie inteligentnego i zrównoważonego rozwoju, biorąc pod uwagę rosnące inwestycje i poprawę infrastruktury miejskiej. Program zrównoważonego miasta na bazie wyników pochodzących z EDSS-SSCI był przewidziany do wdrożenia w latach 2015-2020, nie ma zatem jeszcze danych i informacji o efektach jego wdrożenia.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym rozdziale narzędzia optymalizacji wielokryterialnej, ich wykorzystanie do zarządzania środowiskiem, również w *smart cities* oraz *sustainable smart cities*, a także doświadczenia miast indyjskich w dostosowaniu EDSS do własnych potrzeb wyraźnie pokazują, iż systemy wspomagania decyzji są bardzo pomocne w tych obszarach, gdzie decyzje są trudne, wieloaspektowe, złożone, a możliwe warianty rozwiązań mało oczywiste. Wydaje się, iż jedyną drogą rozwoju dla obszarów zurbanizowanych jest droga zrównoważonego rozwoju, a zatem ważne jest stworzenie narzędzi ułatwiających decydom podejmowanie właściwych decyzji.

W Polsce do miana *smart city* zaliczonych jest osiem miast: Warszawa, Wrocław, Kraków, Gdańsk, Gdynia, Opole, Katowice i Lublin. Siedem na osiem z nich znajduje się w Polsce zachodniej i centralnej, a tylko jedno – Lublin – we wschodniej części kraju. Wszystkie wymienione miasta to miasta na prawach powiatu, do których w Polsce należy jedynie ok. 3% jednostek samorządu terytorialnego, a to świadczy o silnym wpływie poziomu rozwoju gospodarczego, społecznego i cywilizacyjnego na możliwości powstania i rozwoju inteligentnych miast. Warto zauważyć, iż obszarem, który także jest mniej intensywnie rozwijany w inteligentnych miastach w Polsce jest obszar środowiskowy. Biorąc pod uwagę, iż inteligentne miasta są przestrzeniami silnie zurbanizowanymi i uprzemysłowionymi, a – co się z tym wiąże – generują szereg groźnych dla zdrowia i życia ludzkiego zagrożeń o długofalowym oddziaływaniu. Niewielkie zainteresowanie kwestiami środowiskowymi podyktowane jest przede wszystkim tym, że generują one koszty, dają niewielki zwrot inwestycji, efekty są odroczone w czasie, a skutki długofalowe. Cała odpowiedzialność za stan środowiska i zarządzania nim spoczywa na władzach lokalnych lub regionalnych, dla tych z kolei nie jest to priorytetem [1].

Wydaje się zatem, iż istnieje uzasadniona potrzeba podjęcia próby stworzenia wytycznych dla *sustainable smart cities*, które mogą powstać na bazie obecnie istniejących w Polsce *smart cities*, z wykorzystaniem istniejących i sprawdzonych narzędzi optymalizacji wielokryterialnej.

## Literatura

- [1] Jonek-Kowalska I., *Zrównoważony rozwój inteligentnych miast. Dotychczasowe osiągnięcia i nowe wyzwania*, „Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Organizacja i Zarządzanie” 2018, z. 118, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Katowice.
- [2] Hajduk S., *Modele smart city a zarządzanie przestrzenne miast*, „Gospodarka narodowa” 2020, nr 2(302).
- [3] Janik A., Ryszko A., Szafraniec M., *Inteligentne i zrównoważone miasta: w poszukiwaniu kompleksowych ram teoretycznych*, „Prace naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Organizacja i Zarządzanie” 2019, nr 140.
- [4] Bewszko T., *Wielokryterialna analiza zasilania w energię odbiorcy komunalno-bytowego*, praca doktorska, Rzeszów 2004, [komputeropis].
- [5] Guitouni, A., Martel, J., *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method*, “European Journal of Operational Research” 1998, no. 109.
- [6] Kandakoglu A., Frini A., Amor S., *Multicriteria decision making for sustainable development: A systematic review*, “Journal of Multi-Criteria Decision Analysis” 2019, no. 26.
- [7] Stecyk A., *Zastosowanie metody PROMETHEE II do wyboru kursu e-learningowego w przedsiębiorstwie*, strona internetowa czasopisma naukowego „e-mantor”, <http://www.e-mentor.edu.pl/arttykul/index/numer/78/id/1398> (dostęp: 28.10.2020).
- [8] Wątróbski J., Szarafiska M., (2009), *Zastosowanie metod wielokryterialnych do oceny technik modelowania procesów biznesowych – BPM*, [w:] *Polskie stowarzyszenie zarządzania wiedzą. Seria: Studia i materiały*, Bydgoszcz, nr 21.
- [9] Poch M., Comas J., Rodriguez-Roda I., Sanchez-Marre M., Cortes U., *Designing and building real environmental decision support systems*, “Environmental Modelling & Software” 2004, no. 19.
- [10] Singh P.K., Ohri K., *Selecting Environmental Indicators for Sustainable Smart Cities Mission in India*, “Nature Environment and Pollution Technology” 2020, vol. 19, no. 1.

## MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION IN DECISION-MAKING PROCESSES IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

**Abstract:** *Multi-criteria optimization is a tool to support decision-making processes in many areas and areas. For many years they have been used to support decision makers in environmental management decisions, which are decisions where conflicting criteria have to be taken into account, and there are groups of stakeholders with diametrically different needs and interests. The idea of sustainable development, which assumes equal treatment of social, economic and environmental issues, has contributed to the importance of the global environment. Over time, it became an element of the modern concept of smart cities, which evolved into so-called sustainable smart cities. The multitude of aspects and problems encountered by city authorities resulted in their interest in tools supporting decision making. Over the last 10 years models of multi-criteria analysis and optimization have been strongly developed and used also for environmental management in smart cities. In India, an attempt has been made to develop a environmental decision support system for sustainable cities (EDSS-SSCI) between 2015-2020. Given the approach to solving environmental management problems, similar for most cities in the world, it is possible to try to create assumptions for sustainable smart cities for Polish cities.*

**Keywords:** smart city, sustainable smart city, multi-criteria optimization, environmental indicators, environmental management