

WIELOKRYTERIALNA ANALIZA DECYZYJNA W SYSTEMACH GIS

MATEUSZ PIWOWARSKI
Politechnika Szczecińska

Streszczenie

Zwiększenie funkcjonalności systemów GIS w kontekście wspomagania podejmowania decyzji jest możliwe przez adaptację metod wielokryterialnych. Metody te mogą być wykorzystywane do budowy mapy decyzji oraz końcowej oceny alternatyw decyzji.

Słowa kluczowe: MCDA, wielokryterialna analiza decyzyjna, GIS, geoinformacja

1. Wprowadzenie

Informacja przestrzenna dotyczy lokalizacji obiektów w określonych układach współrzędnych (zazwyczaj odniesionych do powierzchni ziemi), ich właściwości geometrycznych oraz relacji przestrzennych zachodzących pomiędzy nimi. Początki określania położenia interesujących nas rzeczy, przedmiotów, obszarów, czy zjawisk były stosunkowo prymitywne: rysunki, schematy, mapy papierowe o niskiej dokładności. Wraz z rozwojem techniki powstawały coraz bardziej zaawansowane sposoby pozyskiwania, przetwarzania i wizualizacji danych przestrzennych. Oprócz komputerowych baz danych, istnieją obecnie bardzo precyzyjne urządzenia do budowy map numerycznych, a także wyspecjalizowane oprogramowanie do realizacji złożonych analiz przestrzennych. Systemy GIS stanowią coraz częściej narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji na różnych poziomach zarządzania. Nie są one jednak wyposażone w mechanizmy pozwalające na wielokryterialną analizę decyzyjną i uwzględnianie indywidualnych preferencji decydenta.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie problematyki (w oparciu o literaturę światową) integracji metod wielokryterialnych z systemami GIS.

2. Analiza i modelowanie danych przestrzennych

Początek systemów GIS sięga połowy lat sześćdziesiątych XX wieku, kiedy powstał Kanadyjski System Informacji Przestrzennej (ang. Canada Geographic Information System). Celem tego systemu było wspomaganie pomiarów kartometrycznych i prezentacja danych w postaci zestawień tabelarycznych [1]. Następne lata to dynamiczny rozwój systemów geoinformacyjnych w różnych aspektach ich funkcjonowania. Do podstawowych funkcji systemów GIS zalicza się opracowywanie map numerycznych, pomiary kartometryczne, modelowanie, zarządzanie oraz monitoring. Funkcjonalność ta zapewnia szerokie możliwości praktycznego stosowania systemów w wielu obszarach życia. Przykładowo, w administracji lokalnej systemy GIS znajdują zastosowania do wspomagania działań analitycznych w gospodarce mieszkaniowej, inwentaryzacji i planowaniu infrastruktury, użytkowaniu terenów, zarządzaniu kryzysowym, monitoringu środowiska, itp. Systemy geoinformacyjne są również powszechnie stosowane do wspomagania krótko i długo terminowych decyzji lokalizacyjnych, planowaniu działalności i usług gospodarczych, w logistyce, transporcie, środowisku przyrodniczym, hydrologii, zdrowiu, polityce i wielu innych obszarach

[2,3].

O funkcjonalności systemów GIS w znacznym stopniu decydują możliwości z zakresu przeprowadzania analiz przestrzennych. Analiza ta jest podstawową cechą systemów geoinformacyjnych i polega na poszukiwaniu uporządkowania lub odchyień od regularnego rozkładu zmiennych w przestrzeni, a także odnajdowaniu zależności pomiędzy zmiennymi w celu ustalenia związku przyczynowo-skutkowego. Dotyczy ona różnego rodzaju obliczeń i przekształceń (arytmetycznych, geometrycznych, logicznych, statystycznych) w wyniku, których uzyskuje się informacje o charakterze przestrzennym dedykowane zazwyczaj wspomaganie decyzji. Przedmiotem analiz mogą być [8]:

- atrybuty obiektów,
- geometryczne cechy obiektów,
- równocześnie cechy geometryczne i atrybuty obiektów.

Funkcje analityczne systemów GIS obejmują przetwarzanie informacji pochodzącej zazwyczaj z kilku warstw mapy numerycznej w efekcie, czego jest możliwość wykrywania różnorodnych zależności pomiędzy obiektami. W wielu przypadkach operacje te mogą być realizowane zarówno na danych wektorowych jak i rastrowych, chociaż większą funkcjonalność dostarczają dane w formie wektorowym [4].

Do podstawowych metod analizy danych przestrzennych zalicza się [2]:

- kwerendy (zapytania do bazy danych),
- metody pomiaru charakterystyk geometrycznych obiektów (np. pole powierzchni, kształt),
- przekształcenia (wyznaczanie relacji geometrycznych między obiektami).

W oparciu o te sposoby i techniki pomiarów można realizować bardziej zaawansowane działania, jak np. [7]:

- konstruowanie wskaźników sumarycznych (miary położenia, rozproszenia, oceny prawidłowości rozmieszczenia, fragmentacja, wymiary fraktalne, itp.),
- weryfikacja hipotez statystycznych,
- stosowanie metod optymalizacyjnych (wyznaczanie np. lokalizacji zjawisk punktowych, wybór najkrótszej, czy optymalnej drogi),
- konstrukcja modeli i modelowanie zjawisk zróżnicowanych przestrzennie.

Szczegółową charakterystykę metod i zastosowań analiz danych przestrzennych przeprowadził Haining R. [5] oraz Maguire D. i inni [6].

Modele przestrzenne konstruuje się w celu znalezienia optymalnego rozwiązania przestrzennego (optymalizacja), zastąpienia rzeczywistych obiektów ich cyfrowymi odpowiednikami, wskazywania rozwiązań alternatywnych, czy też dynamicznego analizowania i obrazowania wyników. Do najistotniejszych kategorii modeli wykorzystywanych w ramach systemów GIS zaliczamy [2]:

- modele statyczne i wskaźnikowe (np. model erozji gleby, ochrony krasowych wód podziemnych),
- modele zagregowane i autonomiczne (np. modelowanie przepływu strumienia wód, modelowanie zachowań ludzi w zatłoczonych miejscach),
- automaty komórkowe (np. symulacja rozwoju urbanizacji).

Przedstawione tutaj typy modeli (inne również) stanowią rozszerzenie funkcjonalności systemów GIS i zazwyczaj nie są częścią ogólnie dostępnych pakietów na rynku. W zdecydowanej większości przypadków modele przestrzenne są realizowane w oparciu o integrację zewnętrznych

pakietów z systemami GIS (ang. coupling). Modele takie są określane modelami słabo związanymi z GIS, gdyż dane z systemów geoinformacyjnych są przekazywane i odbierane w postaci plików (często w ustandaryzowanych formatach). Można też wyróżnić modele silnie związane z GIS, tzw. osadzone (ang. embedded), w których nie występują pośrednie pliki wymiany danych (odczyt i zapis danych przestrzennych przez różne systemy w jednym miejscu) [2,6].

Konstruując modele przestrzenne (wskaźnikowe, ale także bardziej złożone) zazwyczaj w różny sposób można oceniać wagę poszczególnych czynników (parametrów wejściowych modelu), a także w różny sposób dokonywać szacowania czy agregacji zmiennych. Proces ten jest bardzo istotny ze względu na konieczność uzyskania rozwiązań najlepszych, uwzględniających preferencje decydentów. Problematyka rozwiązywania takich zagadnień jest znana w literaturze pod nazwą wielokryterialnej analizy decyzyjnej - MCDA (ang. Multi-Criteria Decision Analysis) lub wielokryterialnego podejmowania decyzji - MCDM (ang. Multi-Criteria Decision-Making).

3. Metody wielokryterialne

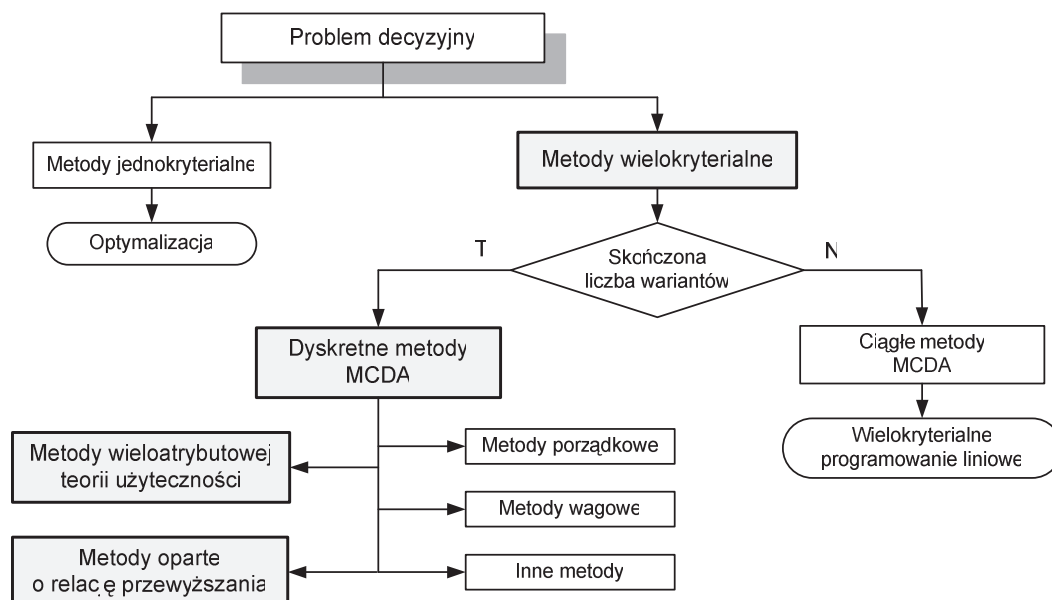
MCDA/MCDM jest zbiorem metod i narzędzi matematycznych umożliwiających porównywanie wariantów decyzyjnych z uwzględnieniem różnych, często sprzecznych ze sobą kryteriów. Z systemami GIS analiza wielokryterialna jest wiązana od lat 90-tych XX w. W roku 2006 J. Malczewski [9] przedstawił pracę zawierającą przegląd aktualnego dorobku światowego z zakresu systemów GIS-MCDA. Analiza tej pracy oraz innych pozycji literatury, które się od tego czasu pojawiły pozwala stwierdzić, iż ten obszar informatyki jest ważny i coraz bardziej doceniany w kontekście wspomaganie decyzji z wykorzystaniem systemów geoinformacyjnych. Dzięki integracji metod MCDA z systemami GIS jest możliwe uzyskanie funkcjonalności łączącej zalety metod wielokryterialnych z możliwościami przetwarzania, analiz i wizualizacji danych przestrzennych.

Metody wielokryterialne można sklasyfikować na dwie grupy: metody ukierunkowane na rozwiązywanie problemów dyskretnych oraz ciągłych. Zadania dyskretne (poruszane w niniejszym opracowaniu) to takie, w których istnieje skończony zbiór wariantów decyzyjnych oraz skończony zbiór kryteriów i w oparciu o nie należy podjąć decyzję. Dyskretne metody wielokryterialne są przez różnych autorów różnie grupowane [12,13]. Kodikara [11] mówi o pięciu kategoriach, ale najczęściej w literaturze jest mowa o dwóch: grupie metod opartych o relację przewyższania oraz metod opartych o funkcję użyteczności (rys.1).

Metody wielokryterialne to metody, które mogą być rozpatrywane w kontekście czterech problemów wielokryterialnego wspomaganie decyzji [10]:

- wyboru $P.\alpha$ (wyznaczenie najlepszego wariantu decyzyjnego),
- klasyfikacji, sortowania $P.\beta$ (przydział wariantów do określonych kategorii),
- porządkowania, rankingu $P.\gamma$ (uporządkowanie wariantów, podział na klasy wariantów równie dobrych),
- opisu $P.\delta$ (opis potencjalnych wariantów).

Wykorzystanie metody wielokryterialnej do rozwiązania konkretnego problemu decyzyjnego wymaga dokładnej analizy dziedziny problemu oraz znajomości metod.



Rys. 1. Klasyfikacja kategorii metod rozwiązywania problemów decyzyjnych [11].

Metody MCDA oparte o relację przewyższania charakteryzują się występowaniem, tzw. relacji przewyższania, która dotyczy zależności między wariantami decyzyjnymi i która reprezentuje określone preferencje decydenta. Relacja ta może przyjmować jedną z czterech sytuacji preferencyjnych: równoważności wariantów a i b ($a I b$), mocnej preferencji jednego z wariantów względem drugiego, np. a nad b ($a P b$), słabej preferencji jednego z wariantów nad drugim, np. a nie jest zdecydowanie lepszy od b ($a Q b$) oraz nieporównywalności wariantów ($a R b$) [10].

Do najbardziej znanych metod opartych o relację przewyższania można zaliczyć: grupę metod ELECTRE (ELECTRE I [14], ELECTRE II [15], ELECTRE III [16], ELECTRE IV [17], ELECTRE IS [18] oraz ELECTRE TRI [19]), metody PROMETHEE (np. PROMETHEE I, II, III, IV, V, VI [20]), metodę TOPSIS [24], ORESTE [21], TACTIC [22], czy np. REGIME [23]. Ponadto, można tutaj przywołać znacznie więcej metod, które w mniejszym lub większym stopniu opierają się na zasadach wyznaczonych przez metody wiodące.

U podstaw metod ELECTRE I, ELECTRE IV oraz ELECTRE IS znajduje się problematyka wyboru $P.\alpha$. W metodzie ELECTRE I nie występują progi preferencji oraz progi równoważności, zakłada się zatem, iż wszystkie przyjęte kryteria są kryteriami prawdziwymi [14]. Następnie pojawiła się nowa, nieoficjalna wersja ELECTRE IV [29], w której uwzględniono próg weta (dla każdego kryterium oddzielnie). Podobnie jak w wersji poprzedniej po określeniu preferencji decydenta i wyznaczeniu współczynników zgodności dla poszczególnych par wariantów następuje sprawdzanie warunków zgodności oraz braku zgodności, wyznaczenie zbiorów zgodności i niezgodności, a także określenie relacji przewyższania. Ostatnim etapem procedury obliczeniowej jest wyznaczenie grafu zależności. W metodzie ELECTRE IS wprowadzono dodatkowo pseudo-kryteria.

Pojawiły się progi równoważności oraz preferencji. Poza tym procedura przebiega podobnie jak w przypadku ELECTRE I [18].

Problematyka porządkowania, rankingu $P.\gamma$ jest uwzględniana w metodach ELECTRE II, III i IV. Podobnie jak w ELECTRE I, w ELECTRE II występują kryteria prawdziwe, czyli nie definiuje się progów preferencji i równoważności. Rozróżnia się jednak słabą i silną preferencję, w oparciu o pięć progów podawanych dla testów zgodności (próg silny, wystarczający, słaby) oraz braku niezgodności (próg silny, wystarczający) [15]. W metodzie ELECTRE III określane są progi równoważności i preferencji, wykorzystywane są pseudo-kryteria, progi weta oraz wagi kryteriów. Po wyznaczeniu zbioru kryteriów niezgodności oraz określeniu współczynników wiarygodności, wyznaczenie kolejności wariantów następuje w procedurach destylacji zstępującej oraz wstępującej. Koniec procedury polega na uzyskaniu końcowego rankingu wariantów [16]. Procedura metody ELECTRE IV jest po części podobna do ELECTRE III. Nie definiuje się jednak wagi kryteriów (wszystkie kryteria są równe), wobec czego mają one jednakowe znaczenie przy wyznaczaniu relacji globalnych. Wyznaczane są dwa porządki: wstępujący oraz zstępujący w oparciu, o które generowany jest ranking końcowy wariantów [17]. Do grupy tej metod zaliczane są również metody PROMETHEE. Poszczególne wersje tych metod operują bądź na kryteriach prawdziwych, bądź na pseudo-kryteriach. Po części zbliżona procedura obliczeniowa do większości metod ELECTRE różni się znacząco przy wyznaczaniu współczynnika zgodności, gdzie można wybierać spośród kilku modeli jego wyznaczania. Wyznaczenie rankingu wariantów decyzyjnych stanowi rozróżnienie metod z tej grupy. W przypadku PROMETHEE I decydent może utworzyć ranking częściowy, PROMETHEE II – całkowity, PROMETHEE III – odstępów. Metoda PROMETHEE IV uwzględnia przypadki ciągłe oraz analizę wrażliwości, PROMETHEE V problemy z dodatkowymi ograniczeniami segmentacji, a PROMETHEE VI reprezentację umysłu ludzkiego [20].

Metoda ELECTRE TRI jest ukierunkowana na problematykę sortowania $P.\beta$. Procedura obliczeniowa jest zbliżona do ELECTRE III. Wyznaczane są tutaj współczynniki zgodności, wiarygodności oraz wskaźniki niezgodności. Pewne różnice występują w kontekście przynależności progów równoważności, preferencji oraz weta do poszczególnych przedziałów. Metoda ta jest stosowana często tam, gdzie należy rozpatrzyć dużą liczbę wariantów decyzyjnych [19].

Poza dwoma wiodącymi grupami metod ELECTRE oraz PROMETHEE, praktyczne zastosowania w wielu obszarach życia znajdują również inne.

Na przykład metoda TOPSIS jest stosowana tam, gdzie istnieje konieczność sortowania wariantów pod względem ich podobieństwa do wariantu najbardziej pożądanego. Realizowane jest to przez minimalizację odległości do wzorca (wariantu najbardziej preferowanego) oraz maksymalizację tego dystansu do wariantu najmniej pożądanego [24]. W zależności od uwzględnianych typów danych metoda TOPSIS przyjmuje różne formy: klasyczna (dane wejściowe są znanymi wartościami rzeczywistymi cech dla rozpatrywanych obiektów) [30], interwałowa (wartości cech obiektów są liczbami przedziałowymi - początek przedziału definiuje minimalną, a koniec – maksymalną wartość cechy) [31], rozmyta (wartości cech nie są precyzyjnie wyrażone lub są określone za pomocą poziomów zmiennej lingwistycznej, którym odpowiadają trójkątne liczby rozmyte, reprezentowane przez trzy oceny: pesymistyczną, najbardziej prawdopodobną i optymistyczną) [32].

Metoda ORESTE umożliwia stosowanie niezależnych rankingów dla poszczególnych kryteriów oceny oraz niezależnych rankingów dla alternatyw w stosunku do każdego z przyjętych kryteriów [21]. W metodzie TACTIC jest możliwość posługiwania się kryteriami rzeczywistymi oraz pseudo-kryteriami z wymaganiem w stosunku do poziomu zgodności [22]. Z kolei metoda REGI-

ME w procedurze obliczeniowej wykorzystując macierz dominacji oraz mechanizmy przewyższania [23].

Druga grupa metod – opartych o funkcję użyteczności wykorzystuje klasyczną teorię użyteczności. Do opisu zachowań decydenta definiowana jest tutaj funkcja zwana funkcją użyteczności, która przypisuje wszystkim rozpatrywanym elementom wartość liczbową, tak aby była możliwość uporządkowania zbioru dopuszczalnych wariantów ze względu na preferencje decydenta. W wieloatrybutowej teorii użyteczności (ang. Multiattribute Utility Theory) – znanej również, jako MAUT [26], procedura rozwiązania problemu wielokryterialnego obejmuje dwa podstawowe etapy: określenie użyteczności częściowej poszczególnych wariantów decyzyjnych względem każdego z kryteriów oraz wyznaczenie użyteczności globalnej w oparciu o wieloatrybutową funkcję użyteczności, agregującą użyteczności częściowe [26, 33]. Z podstaw teoretycznych nakreślonych przez MAUT korzysta wiele innych metod opartych na modelu funkcjonalnym (funkcji użyteczności). Najczęściej stosowane metody z tej grupy, to metoda, AHP [25], SMART [27], UTA [28].

Metoda AHP stanowi klasyczny przykład metody opartej o funkcję użyteczności. Umożliwia ona uzyskanie wektora skali poprzez porównywanie parami wariantów decyzyjnych na podstawie poszczególnych kryteriów, a także porównywania kryteriów pomiędzy sobą. W procesie porównywania parami wykorzystuje się dziewięciostopniową skalę ocen lub odpowiadający jej opis słowny. Metoda ta nie wymaga bezpośredniego przypisywania wag dla rozpatrywanych kryteriów oraz wariantów decyzyjnych, a operuje jedynie na ocenach względnych porównywanych obiektów. Procedura obliczeniowa AHP determinuje cztery główne etapy: stworzenie hierarchii celów, budowa macierzy porównań istotności kryteriów, budowa macierzy porównań wariantów decyzyjnych dla każdego z kryteriów oraz synteza ważności kryteriów i preferencji alternatyw względem każdego kryterium [25]. Prostota i zrozumiałość algorytmu obliczeniowego, a także dostępność oprogramowania z zaimplementowaną metodą powoduje, iż jest ona powszechnie wykorzystywana do wspomaganie decyzji w różnych aspektach życia.

W metodzie SMART, bazującej na procedurze MAUT i zbliżonej do AHP, ocena alternatywy jest uniezależniona od wartości innych alternatyw. Wagi kryteriów są wyznaczone przez zdefiniowanie im jawnych wartości, a nie wartości w odniesieniu do innego kryterium. Zmiana liczby rozpatrywanych alternatyw zazwyczaj nie wpływa na ocenę alternatyw rozpatrywanych wcześniej, z wyjątkiem sytuacji, w której nieuwzględniane wcześniej alternatywy przyjmują wartości ekstremalne (minimum lub maksimum) w stosunku do któregoś z kryteriów. W takich przypadkach skala ocen dla danego kryterium powinna być ponownie obliczona [27].

Metoda UTA wykorzystuje cząstkowe funkcje użyteczności na podstawie, których wyznaczana jest globalna funkcja użyteczności. Preferencje decydenta są pozyskiwane ze zbioru referencyjnego wariantów decyzyjnych, uszeregowanego w rankingu od najlepszego do najgorszego (możliwość użycia relacji preferencji lub nierozróżnialności). W oparciu o zbiór referencyjny uzyskiwane są cząstkowe funkcje użyteczności dla każdego kryterium, do czego są wykorzystywane metody programowania liniowego [28]. UTA, to zbiór różniących się metod, jak np. UTADIS, UTADIS I, II, III, UTASTAR [34].

Szczegółowy opis przedstawionych tutaj metod oraz wielu innych można uzyskać chociażby w pozycjach [35,36].

4. Obszary zastosowań metod MCDA w systemach GIS

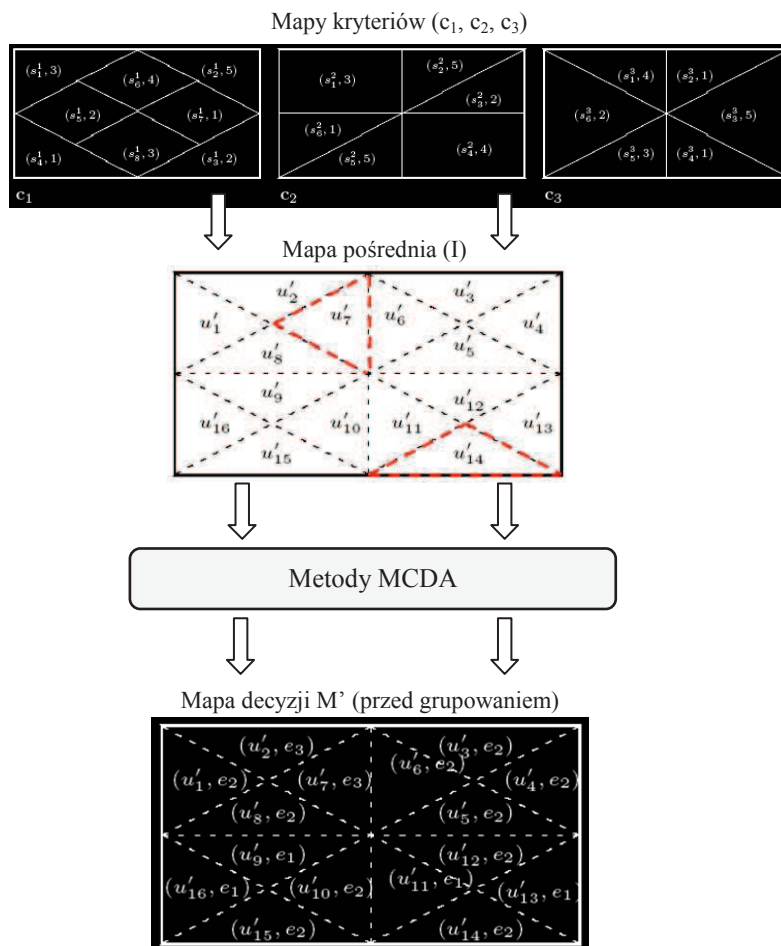
Wielokryterialna analiza decyzyjna jest łączona z systemami GIS celem wielokryterialnego wspomaganie decyzji przestrzennych. Problematykę integracji metod MCDA z systemami geoinformacyjnymi poruszają w swoich pracach naukowych m.in. J. Malczewski [9,37], Chakhar [38] oraz Chakhar i Mousseau [39]. Zagadnienia związane z podejmowaniem decyzji o charakterze przestrzennym mogą zostać zdefiniowane jako te problemy, w których decyzję należy podjąć wybierając pomiędzy kilkoma potencjalnymi alternatywami, związanymi z jakimiś określonymi miejscami w przestrzeni. Do przykładowych problemów przestrzennych można zaliczyć, np.: lokalizację różnych obiektów (zakładów, szkół), planowanie opieki zdrowotnej, planowanie tras przejazdów pojazdów, administrację jednostkami terytorialnymi, itp. W przykładach tych potencjalne alternatywy są scharakteryzowane co najmniej przez ich geograficzne lokalizacje, a ich wybory będą zależały od spełnienia oczekiwań decydenta nakreślonych przez jego preferencje. Rozpatrując zbiór alternatyw decyzji związanych z uwarunkowaniami przestrzennymi należy uwzględnić charakter tego zbioru: dyskretny lub ciągły. W pierwszym przypadku istnieje skończona liczba alternatyw, które mogą być reprezentowane przez punkt, linię lub wielobok (płaszczyznę), ewentualnie ich kombinacje. Drugi przypadek jest związany z nieskończoną liczbą alternatyw decyzji, ale ze względów praktycznych często są one reprezentowane w formie zbioru skończonego [40].

W przeglądzie literatury światowej w kontekście łączenia MCDA z GIS Malczewski [9] dokonał klasyfikacji zastosowań metod wielokryterialnych w systemach geoinformacyjnych z kilku istotnych punktów widzenia. Rozpatrywał stosowalność MCDA dla różnych kategorii tych metod (metody oparte o relację przewyższania, funkcję użyteczności, sumy ważonej, punktu idealnego i innych), wykorzystywanego modelu danych (raster, wektor), czy dokładności precyzowania kryteriów oraz alternatyw przestrzennych. Przeanalizowana liczba pozycji literatury - 319, pokazuje różnorodności doboru i wykorzystania metod wielokryterialnych do wspomaganie analiz przestrzennych. Pewnym wyznacznikiem stosowania metod w systemach GIS jest problematyka wielokryterialnego wspomaganie decyzji [10], innym natomiast znajomość oraz łatwość implementacji poszczególnych metod.

Znaczna część proponowanych rozwiązań MCDA-GIS wykorzystujących funkcję użyteczności bazuje na najbardziej popularnych metodach, typu AHP, SMART [41,42], natomiast w przypadku metod opartych o relację przewyższania, wykorzystywane są najczęściej: ELECTRE oraz PROMETHEE [43-44]. Ta druga grupa metod jest zazwyczaj stosowana, gdy istnieje potrzeba rozważenia kryteriów oceny z heterogenicznymi skalami, czy też np. decydent dysponuje ograniczoną informacją. Metody te mogą znaleźć zastosowania, np. w problemach zarządzania terenami, w których alternatywy są często nieporównywalne [44].

Generalnie można wskazać dwa obszary integracji metod MCDA z systemami GIS. Pierwszy dotyczy konstrukcji mapy decyzji, drugi natomiast oceny wygenerowanych alternatyw decyzji [38-40]. Etap związany z konstrukcją mapy decyzji obejmuje kilka działań, takich jak: budowa mapy kryteriów, budowa mapy pośredniej, wygenerowanie mapy decyzji oraz grupowanie jednostek przestrzennych na mapie decyzji (opcjonalnie). Generowanie mapy decyzji realizowane jest w oparciu o wielokryterialną analizę decyzyjną (MCDA), gdzie np. dokonuje się klasyfikacji obiektów (jakimi są jednostki przestrzenne mapy pośredniej) do określonych kategorii o podobnych cechach (np. metoda ELECTRE TRI). Schemat procedury uzyskiwania mapy decyzji jest przedstawiony na rys. 2. Szczegóły konstrukcji mapy decyzji można uzyskać w [40]. Przedstawio-

na struktura obejmuje tylko pojedynczego decydenta lub grupę osób posiadających ten sam system wartości. Rozszerzenie procedury na grupę decydentów jest tutaj związane z uzyskaniem złożonej mapy decyzyjnej, uwzględniającej preferencje wszystkich współuczestników procesu podejmowania decyzji. Mapa taka może być konstruowana w wyniku nakładania poszczególnych map kryteriów na poziomie ich definicji (wejściowym) i uzyskaniu złożonej mapy pośredniej [45]. Można ją również uzyskać przez kumulowanie na poziomie wyjściowym - każda grupa generuje indywidualną mapę decyzyjną. Następnie otrzymane indywidualne mapy decyzyjne są kumulowane do stworzenia złożonej mapy decyzyjnej.



Rys. 2. Procedura konstrukcji mapy decyzyjnej w oparciu o metody MCDA, szczegóły w [40].

Proces generowania alternatyw decyzji obejmuje dwa podstawowe kroki. Pierwszy dotyczy konstrukcji alternatyw decyzji (alternatywy bazujące na punkcie, linii, kształcie lub złożone), drugi natomiast oceny opartej na wielu kryteriach. Ocena ta wymaga zdefiniowania i użycia metod wie-

lokryterialnej analizy decyzyjnej. Kryteria oceny użyte w tym kroku mogą się różnić od tych używanych przy budowaniu mapy decyzyjnej. Takie podejście ma dwie główne zalety [38]:

- po pierwsze daje możliwość zajęcia się w pierwszej fazie (przy budowie mapy decyzyjnej) tylko kryteriami technicznej oceny ukierunkowanymi na wymiary przestrzenne i pozostawienie kryteriów ekonomicznych, socjalnych (i innych) do opracowania w drugiej fazie,
- po drugie daje możliwość zastosowania kryterium wykluczającego podczas oceny wielokryterialnej, ułatwiając w ten sposób analizę wrażliwości i wyznaczenie końcowej rekomendacji.

Ostateczna rekomendacja w analizie wielokryterialnej przyjmuje różne formy, w zależności od sposobu postawienia problemu. Generalnie definiujemy trzy główne typy rekomendacji, a mianowicie: wybór (wybranie określonego zbioru alternatyw), ranking (klasyfikacja alternatyw od najlepszej do najgorszej), sortowanie (przypisywanie alternatyw do różnych wcześniej zdefiniowanych kategorii).

5. Wnioski

W artykule zaprezentowane zostały rozważania teoretyczne związane z potrzebami, możliwościami i kierunkami łączenia metod MCDA z systemami GIS. Analiza metod wielokryterialnych pozwoliła dokonać klasyfikacji tych metod oraz wskazać konkretne obszary ich zastosowań, uwzględniające problematyki wielokryterialnego podejmowania decyzji. Zostały zaprezentowane dwa kierunki integracji MCDA-GIS. Pierwszy dotyczy konstrukcji mapy decyzyjnej, drugi natomiast końcowej oceny alternatyw decyzji.

Niniejsza analiza wskazuje potrzeby rozwoju tego kierunku prac badawczych (MCDA-GIS), ale jednocześnie uświadamia o dużej złożoności tej problematyki.

Bibliografia

1. Foresman T.W., GIS Early Years and the Threads of Evolution, The History of Geographic Information Systems: Perspectives from the Pioneers, Foresman T.W., Ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998, pp. 3-17.
2. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhing D.W., GIS. Teoria i praktyka, PWN, Warszawa, 2008.
3. O'Looney J.A., Beyond Maps: GIS Decision Making in Local Government, ESRI Press, 2000.
4. O'Sullivan D., Unwin D.J., Geographic Information Analysis, NJ Wiley, 2002.
5. Haining R., Spatial Data Analysis: Theory and Practice, Cambridge University Press, 2003.
6. Maguire D., Batty M., Frank M., GIS, Spatial Analysis and Modeling, ESRI Press, 2005.
7. Shi W.J., Lia Z., Bedard Y., Theme issue: advanced techniques for analysis of geo-spatial data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 59, Issue: 1-2, August, 2004, pp. 1-5.
8. Litwin L., Myrda G., Systemy Informacji Geograficznej. Zarządzanie danymi przestrzennymi w GIS, SIP, SIT, LIS, Helion, 2005.
9. Malczewski J., GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, No. 7, August 2006, pp. 703-726.

10. Roy B., *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*, WNT, Warszawa, 1990.
11. Kodikara P.N., *Multi-Objective Optimal Operation of Urban Water Supply Systems*, Engineering and Science Victoria University, Australia, 2008.
12. Vincke P., *Multicriteria Decision-Aid.*, J. Wiley, New York, 1992.
13. Pomerol J.C., Barba-Romero S., *Multi-criterion decisions in management: Principles and practice*, Kluwer, Massachusetts, 2000.
14. Roy B., *Classement et choix en présence de point de vue multiples: Le méthode ELECTRE*, *Revue Francaise d'Informatique et de Recherche Opérationnelle* (8), 1968, pp. 57-75.
15. Roy B., Bertier P., *La methode ELECTRE II, Une application au mediaplanning*, *Operations Research '72*, M. Ross, ed., North-Holland, 1973, pp. 291-302.
16. Roy B., *ELECTRE III: Un algorithme de rangement fonde sur une representation floue des preferences en presence de criteres multiples*, *Cahiers du Centre d'etudes de recherche operationnelle*, 20, 1978, pp. 3-24.
17. Roy B., Hugonnard J.C., *Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by multicriteria methods*, *Transportation Research*, 16A(4), 1982, pp. 301-312.
18. Roy B., *ELECTRE IS, Aspects methodologiques et guide d'utilisation*, Universite de Paris-Dauphine, Paris, 1985.
19. Mousseau V., Figueira J., Naux J.P., *Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method : Some experimental results*, *Cahier du Lamsade, University of Paris-Duphine*, 30(150), 1997.
20. Brans J.P., Mareschal B., *PROMETHEE methods*, in Figueira J., Greco S., Ehrgott M. (Eds), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, New York, NY, Ch. 5, 2005, pp.163-98.
21. Roubens M., *Preference relation in actions and criteria in multicriteria decision making*, *European Journal of Operational Research*, 10, 1982, pp. 51-55.
22. Vansnick, J.C., *On the problem of weights in multiple criteria decision making, the non-compensatory approach*, *European Journal of Operational Research*, 24, 1986, pp.288-294.
23. Hinloopen E., Nijkamp P., Rietveld P., *The REGIME method: a new multicriteria technique*, *Essays and surveys on multiple criteria decision making*, P. Hansen, ed., Springer, 1983, pp.146-155.
24. Chen S.J., Hwang C.L., *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
25. Saaty T.L., *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York, 1985.
26. Keeney R.L., Raiffa H., *Decisions with multiple objectives-preferences and value tradeoffs*, Cambridge University Press, Cambridge & New York, 1993.
27. Von Winterfeldt D., Edwards W., *Decision analysis and behavioral research*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
28. Jacquet-Lagrèze E., Siskos J., *Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision making; the UTA method*, *European Journal of Operational Research*, 10(2), 1982, pp.151-164.
29. Maystre L., Pictet J., Simos J., *Les Methodes Multicriteres ELECTRE*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1994.

-
30. Hwang C.L., Yoon K., *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, New York, 1981.
 31. Jahanshahloo G.R., Lotfi F.H., Izadikhah M., An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval data, *Applied Mathematics and Computation* 175 (2), 2006, pp. 1375-1384.
 32. Jahanshahloo G.R., Lotfi F.H., Izadikhah M., Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. *Applied Mathematics and Computation* Volume. 181 (2), 2006, pp. 1544-1551.
 33. Trzaskalik T., *Metody wielokryterialne na polskim rynku finansowym*, PWE, Warszawa, 2006.
 34. Siskos Y., Grigoroudis E., Matsatsinis N.F., UTA Methods, in Figueira J., Greco S., Ehrgott M., *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London, 2005, pp. 297-344.
 35. Figueira J., Greco S., Ehrgott M., *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, London, 2005.
 36. Triantaphyllou E., *Multi-Criteria Decision Making Methods: A comparative Study*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
 37. Malczewski J., *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, Wiley, New York, 1999.
 38. Chakhar S., *Multicriteria decisional cartography: Formalization and implementation*. PhD thesis, University of Paris Dauphine, Paris, France, 2006.
 39. Chakhar S., Mousseau V., Spatial multicriteria decision making. In Shehkar and H. Xiong, editors, *Encyclopedia of Geographic Information Science*, Springer-Verlag, New York, 2007.
 40. Chakhar S., Mousseau V., GIS-based multicriteria spatial modeling generic framework, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 22 , Issue 11-12, 2008, pp. 1159-1196.
 41. Araujo C., Mecedo A., Multicriteria geologic data analysis for mineral favourability mapping: Application to a metal sulphide mineralized area, Ribeira Valley Metalogenic Province, Brazil. *Natural Resources Research*, 11, pp.29-43, 2002.
 42. Ho W., Integrated analytic hierarchy process and its applications. A literature review. *Eur. J. Operat. Res.*, 186, 2008, pp. 211-228.
 43. Marinoni O., A discussion on the computational limitations of outranking methods for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1), pp.69-87, 2006.
 44. Joerin F., Theriault M., Musy A., Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, 15, pp.153-174, 2001.
 45. Procaccini C., Chakhar S., Pusceddu C., Extending decision map concept to support participative spatial multicriteria decision making. In *The XXI Association of European Schools of Planning Conference*, Naples, Italy, 2007.

MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS IN GIS SYSTEMS

Summary

Enlargement of the functionality of systems GIS in the context of the aid of making the decision is possible by the adaptation multicriteria methods. These methods can serve to the building of the decision map and final evaluation of the decision alternatives.

Keywords: MCDA, Multi-criteria decision analysis, GIS, geoinformation

Mateusz Piwowarski
Wydział Informatyki
Politechnika Szczecińska
71-210 Szczecin, ul. Żołnierska 49
e-mail: mpiwowarski@ps.pl