

Funkcja agregująca w przestrzennej analizie wielokryterialnej procesów przyrodniczych

Aggregate function in spatial multicriteria analysis
of natural processes

Joanna Jaroszewicz, Katarzyna Rędzińska

Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii
Katedra Gospodarki Przestrzennej i Nauk o Środowisku Przyrodniczym

Słowa kluczowe: opracowanie ekofizjograficzne, infiltracja wód opadowych, funkcja uśredniająca, kompensacja kryteriów, interakcja, GIS

Keywords: eco-physiographic study, rainwater infiltration, averaging function, compensation of criteria, interaction, GIS

Wstęp

W opracowaniach ekofizjograficznych sporządzanych na potrzeby zagospodarowania przestrzennego, kluczowym etapem jest synteza wyników, pozwalająca na przejście od analizy danych do formułowania wniosków, stanowiących podstawę opracowania wytycznych do decyzji planistycznych. Jest to istotne zagadnienie, i odwołując się do ustawy o dostępie do informacji o środowisku przyrodniczym (Ustawa, 2008), proces ten powinien być jawny i zrozumiały. Nawiązując do genezy przestrzennych analiz wielokryterialnych (McHarg, 1969; Malczewski, 2010; Malczewski, Jaroszewicz, 2018) można wskazać na ich silny związek z opracowaniami ekofizjograficznymi. W ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój analiz wielokryterialnych w ujęciu ciągłym, niemniej jednak ich zastosowanie w praktyce jest wciąż stosunkowo rzadkie (Malczewski, 2006).

W obliczu zmian klimatu, wszystkie miasta narażone są na powódzie wynikające z przeciążenia systemów kanalizacji podczas ekstremalnych opadów, które zgodnie z przewidywaniami będą się nasilać (Gorgoń i in., 2014). Dlatego istotne jest ograniczenie ilości bezpośrednich odpływów wód opadowych (Geiger, Dreiseitl, 1999). Według ustawy Prawo wodne (Ustawa, 2017) wody opadowe stanowią zasób, którym należy racjonalnie gospodarować. W tym celu, konieczne jest określenie polityki i zasad gospodarowania wodą opadową w skali miasta w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego. Podstawą powinna być identyfikacja terenów hydrologicznie aktywnych oraz analiza natu-

ralnych predyspozycji terenu do gospodarowania na nich wodami opadowymi. Jednym z głównych celów opracowań ekofizjograficznych, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 roku (Rozporządzenie, 2002), jest wyznaczanie terenów pełniących funkcje przyrodnicze. Analiza funkcjonowania hydrologicznego miasta, w tym identyfikacja procesów hydrologicznych, jest kluczowa dla projektowania zrównoważonych systemów gospodarowania wodami opadowymi w miastach (Januchta-Szostak, 2014; NACTO, 2017; Wolski, 2013). Najbardziej pożądanym sposobem gospodarowania wodą opadową, obok podejmowania działań związanych ze zwiększeniem retencji i ewapotranspiracji jest jej infiltracja do gruntu w miejscu powstania opadu (Januchta-Szostak, 2014; Geiger, Dreiseitl, 1999; Królikowska, Królikowski, 2012; NACTO, 2017; Wolski, 2013). Z wyżej wymienionych względów przedmiotem niniejszych analiz jest wyznaczenie terenów, które ze względu na swoje naturalne cechy umożliwiają infiltrację wód opadowych do gruntu w miejscu ich powstania. Jednym z najważniejszych zastosowań systemów informacji geograficznej (GIS) jest wspieranie procesu podejmowania decyzji środowiskowych (Eastman, 1999; Bielecka, 2006; Gotlib i in., 2008). W modelach analiz wielokryterialnych w systemach informacji geograficznej za pomocą przyjętych reguł łączenia (Chrisman, 1996; Malczewski, Rinner, 2015) następuje integracja danych i informacji o alternatywach (map kryteriów) oraz preferencji decydentów w całościowej ocenie alternatyw. Preferencje decydenta ujawniają się na etapie oceny wartości kryteriów oraz na etapie wyznaczania wag istotności kryteriów. W procedurze oceny wartości kryteriów otrzymywane są wartości pozbawione mian, współmierne, wyrażające, jak bardzo zdaniem decydenta dana wartość kryterium pozwala na osiągnięcie założonego celu. W zależności od przyjętej metody, mogą to być wartości określane między innymi jako: przydatność (ang. *utility*), prawdopodobieństwo (ang. *probability*) lub możliwość (ang. *possibility*) osiągnięcia celu (Grabisch, 1995; Malczewski, 1999). Etap ten nazywa się niekiedy standaryzacją (np. Voogd, 1983). Wyznaczone zestandaryzowane wartości stanowią argumenty x_j dla $j = \{1, 2, \dots, n\}$, które wraz z wagami istotności kryteriów w_j są danymi wejściowymi dla przyjętej reguły łączenia. W ujęciu ciągłym, w zakresie przestrzeni wartości, zarówno wartości argumentów x_j , jak i wagi istotności kryteriów w_j wyrażane są w skali ilorazowej, w zadanym przedziale wartości, na przykład $[0,1]$ (Eastman, 1999; Malczewski, 1999). Dodatkowo, dla wag istotności przyjmowany jest zazwyczaj warunek sumowania się do jedności (Malczewski 1999), tj. $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. W procesie analizy istotny jest właściwy dobór kryteriów, ocena ich wartości, wagi kryteriów oraz właśnie dobór reguły łączenia, która z matematycznego punktu widzenia jest pewną funkcją agregującą. Właściwie dobrana funkcja agregująca ma kluczowe znaczenie w analizie wielokryterialnej (Scott, Antonsson, 1998).

Na podstawie analizy literatury przedstawione zostaną podstawowe założenia dla funkcji agregującej, spełniającej rolę reguły łączenia w przestrzennej analizie wielokryterialnej, oraz wybrane wskaźniki określające jej zachowanie: poziom kompensacji kryteriów oraz stopień interakcji między nimi. Wskazane zostanie znaczenie tych zachowań funkcji agregującej w analizach zjawisk przyrodniczych. Zaprezentowane zostaną wyniki przeprowadzonego *studium przypadku*: analizy występowania procesu infiltracji dla celów projektowania zielonej infrastruktury w mieście Starachowice, jako fragmentu opracowania ekofizjograficznego sporządzonego na potrzeby opracowania studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta, które powinno stanowić główny instrument zarządzania gospodarowaniem wodami opadowymi w mieście (Januchta-Szostak, 2014; Wagner i in., 2014). W badaniach tych porównane zostaną dwie często stosowane funkcje agregujące: liniowa

suma ważona (ang. WLC – *Weighted Linear Combination*) oraz ważona średnia geometryczna (ang. WGM – *Weighted Geometric Mean*) o odmiennych własnościach i typie zachowań. Celem porównania jest zwrócenie uwagi na konieczność właściwego doboru funkcji agregującej odzwierciedlającej relacje pomiędzy poszczególnymi kryteriami.

Funkcja agregująca jako reguła łączenia kryteriów – przegląd literatury

W analizach wielokryterialnych opartych na teorii użyteczności (ang. MUT – *Multi-criteria Utility Theory*) wartości wejściowe (argumenty x_j dla $j = \{1, 2, \dots, n\}$ kryteriów), interpretowane jako wartości preferencji decydeny względem wartości poszczególnych kryteriów, ważone wagami w_j określającymi ich istotność, łączone są za pomocą reguły łączenia (tu: funkcji agregującej $f(\mathbf{x})$) w wynikową wartość $V(A_i)$, określającą ostateczną ocenę w każdej lokalizacji A_i dla $i \in \{1, 2, \dots, m\}$. Zastosowana funkcja agregująca powinna być tak dobrana, by właściwie modelowała analizowane zagadnienie (Grabisch, 1995; Scott, Antonsson, 1998; Langhans et al., 2014). Najczęściej stosowaną funkcją agregującą w przestrzennych analizach wielokryterialnych (w środowisku GIS) jest liniowa suma ważona (WLC) (Eastman, 1999; Malczewski, 2006): $WLC = \sum_{j=1}^n w_j x_j$, która dla wag w_j spełniających założenia: $w_j \in [0, 1]$ oraz $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ jest tożsama z ważoną średnią arytmetyczną (ang. WAM – *Weighted Arithmetic Mean*) i w dalszej części artykułu tak będzie określana.

Z matematycznego punktu widzenia, funkcja agregująca $f(\mathbf{x})$ stosowana w analizach wielokryterialnych, w ujęciu ciągłym, dla wejściowych wartości argumentów $x_j \in [0, 1]$ daje w wyniku wartość rzeczywistą z przedziału $[0, 1]$, co może zostać zapisane (Calvo et al., 2002; Salido, Hurakami, 2003; Bieliakov et al., 2007) jako:

$$f: [0, 1]^n \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

Funkcja agregująca, która może być racjonalnie zastosowana w przestrzennych analizach wielokryterialnych spełnia pewne założenia, do najbardziej istotnych można zaliczyć między innymi (Scott, Antonsson, 1998; Bieliakov et al., 2007):

1) **Monotoniczności:** jeżeli $x_j \leq y_j$ dla wszystkich kryteriów $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, to wówczas: $f(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{y})$. Jeżeli alternatywa decyzyjna A_x , określona przez zbiór wartości \mathbf{x} (zwanymi zmiennymi decyzyjnymi), jest zdominowana przez alternatywę decyzyjną A_y , określoną przez zbiór zmiennych decyzyjnych \mathbf{y} , to wówczas wynikowa wartość funkcji agregującej dla alternatywy A_x (zdominowanej) jest mniejsza lub równa wynikowej wartości dla alternatywy A_y (dominującej). Innymi słowy, poprawiając wartość choć jednego kryterium i nie pogarszając wartości innych kryteriów otrzymamy wyższą lub równą wartość funkcji agregującej.

2) **Idempotentności:** jeżeli $x_j = c$ dla wszystkich kryteriów $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, to wówczas $f(\mathbf{x}) = c$. Jeżeli wszystkie wartości kryteriów są sobie równe, to taką wartość zwraca również funkcja agregująca. Z warunku idempotentności wynikają wartości brzegowe: jeżeli $x_j = 0$ dla wszystkich $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, to wówczas: $f(\mathbf{x}) = 0$ oraz jeżeli $x_j = 1$ dla wszystkich $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, to wówczas $f(\mathbf{x}) = 1$.

3) **Przemienności**: $f(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_k, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_j, \dots, x_n)$. Jeżeli zmieniona zostanie kolejność argumentów x_j , funkcja agregująca zwróci taki sam wynik. Niekiedy definiowanych jest więcej warunków (np. Scott, Antonsson, 1998; Grabisch et al., 2011).

Funkcja agregująca może być koniunktywna (MIN), dysjunktywna (MAX) lub uśredniająca, albo może być złączeniem różnych funkcji operujących na różnych przedziałach wartości. Uśredniająca funkcja agregująca spełnia klasyczny warunek Cauchy'ego (Marichal, 1998; Beliakov et al., 2007, 2016; Grabisch et al., 2009):

$$MIN(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{x}) \leq MAX(\mathbf{x}) \quad (2)$$

oraz, wynikający z niego, warunek dla wartości średnich:

$$\overline{MIN(\mathbf{x})} \leq \overline{f(\mathbf{x})} \leq \overline{MAX(\mathbf{x})} \quad (3)$$

Wartości średnie, przy założeniu jednorodnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa w przedziale $[0,1]$, obliczane są jako (Grabisch et al 2009):

$$\overline{f(\mathbf{x})} = \int_{[0,1]^n} f(\mathbf{x}) dx \quad (4)$$

Z warunków tych wywodzi się pojęcie **alternatywności** (ang. *orness*) lokalizujące położenie $\overline{f(\mathbf{x})}$ w przedziale $[\overline{MIN(\mathbf{x})}, \overline{MAX(\mathbf{x})}]$ (Dujmowić, 1974; Fodor, Roubens, 1994; Marichal 1998, Salido, Murakami, 2003; Grabisch et al., 2009):

$$orness(f) = \frac{(\overline{f(\mathbf{x})} - \overline{MIN(\mathbf{x})})}{(\overline{MAX(\mathbf{x})} - \overline{MIN(\mathbf{x})})} \quad (5)$$

Każda funkcja uśredniająca jest w jakimś stopniu kompensacyjna, a miara alternatywności wyznacza stopień tej kompensacji. Grabisch (1996) wskazał, że miara ta ma związek z postawą decydenta, przy czym zastosowanie funkcji koniunktywnej (MIN) jest postawą skrajnie pesymistyczną, a zastosowanie funkcji dysjunkcyjnej (MAX) postawą skrajnie optymistyczną. Alternatywność (*orness*) określana jest również jako poziom kompensacji wartości kryteriów (Grabisch et al., 2009). Kompensacja ta określa, w jakim stopniu niskie wartości jednych kryteriów mogą być zrekompensowane wysokimi wartościami innych kryteriów (*trade-off*) (Eastman, 1999; Malczewski, Rinner, 2015). W tabeli 1 przedstawiono wartości średnie oraz wartości alternatywności (*orness*) dla funkcji: MIN, WGM, WAM oraz MAX. Średnia geometryczna (GM) i ważona średnia geometryczna (WGM) zawsze charakteryzuje się mniejszą alternatywnością (*orness*) niż ważona średnia arytmetyczna (WAM). Mają niższy poziom kompensacji wartości kryteriów. Biorąc pod uwagę systematykę alternatywności (*orness*) opracowaną przez Dujmowića (2007) można powiedzieć, że WAM charakteryzuje się neutralną wartością alternatywności, natomiast WGM i GM charakteryzują się miękką częściową koniunkcyjnością (ang. *soft partial conjunction*) i obydwie te klasy należą, w kontekście podejmowania decyzji, do kategorii modelowania warunków pożądanych. Jednym ze sposobów przedstawienia całej rodziny uśredniających funkcji agregujących zmieniających się od MIN do MAX jest zastosowanie funkcji w postaci ważonej średniej potęgowej (ang. WPM – *Weighted Power Mean*) (Scott, Antonsson, 1998, 2005; Bieliakov et al., 2007):

$$WPM_s(\mathbf{x}) = \left(\sum_{j=1}^n w_j x_j^s\right)^{1/s} \tag{6}$$

Przy czym, jeżeli $s \rightarrow -\infty$ wówczas $\lim_{s \rightarrow -\infty} WPM_s(\mathbf{x}) = \text{MIN}(\mathbf{x})$ co oznacza zerową kompensację, jeżeli $s \rightarrow 0$ wówczas $\lim_{s \rightarrow 0} WPM_s(\mathbf{x}) = \text{WGM}(\mathbf{x})$, co oznacza pełną kompensację, jeżeli $s \rightarrow 1$ wówczas $\lim_{s \rightarrow 1} WPM_s(\mathbf{x}) = \text{WAM}(\mathbf{x})$, co oznacza superkompensację oraz jeżeli $s \rightarrow +\infty$ wówczas $\lim_{s \rightarrow +\infty} WPM_s(\mathbf{x}) = \text{MAX}(\mathbf{x})$, co oznacza pełną superkompensację (Scott, Antonsson, 1998; Calvo et al., 2002). Zestawienie wartości wykładnika s i klasyfikacja funkcji również zostały zestawione w tabeli 1. W jeszcze bardziej ogólnej postaci tak zwanej średniej quasi-arytmetycznej (ang. GAM – *Quasi-Arithmetic Mean*), funkcja agregująca może być zapisana jako na przykład (Grabisch et al., 2011):

$$QAM_f = f^{-1}\left(\sum_{j=1}^n w_j f(x_j)\right) \tag{7}$$

gdzie f jest ciągłą i ściśle monotoniczną funkcją.

Tabela 1. Zestawienie wartości średnich oraz wartości alternatywności dla wybranych funkcji agregujących (opracowano na podstawie: Scott, Antonsson, 1998; Dujmanović, 2007; Grabisch et al., 2009; Beliakov et al., 2016)

Funkcja agregująca	Wartość średnia	Orness (wg Dujmovića)		Kompensacja (wg Scotta i Antonssona)
		$n = 2$	$n \rightarrow +\infty$	Wykładnik s
MIN	$\frac{1}{n+1}$	0 koniunktywność		zerowa $-\infty$
WGM	$\prod_{j=1}^n \frac{1}{w_j + 1}$	$\frac{1 - w_1 w_2}{2 + w_1 w_2}$		pełna 0
GM $w_j = \frac{1}{n}$	$\left(\frac{n}{n+1}\right)^n$	$\frac{1}{3} \approx 0,333$	$\frac{1}{e} \approx 0,368$	pełna 0
		miękką częściową koniunktywność		
WAM	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} = 0,500$ neutralna alternatywność		super-kompensacja 1
MAX	$\frac{n}{n+1}$	1 dysjunktywność		pełna super-kompensacja $+\infty$

Kolejnym istotnym zachowaniem funkcji agregującej jest **poziom interakcji** zachodzącej między kryteriami. Jeżeli interakcja zachodząca między parą kryteriów jest dodatnia (synergia), wówczas obydwa kryteria muszą być spełnione w zadawalającym stopniu, są komple-

mentarne, stanowią niezbędne składniki w analizowanym procesie i ich wartości nie mogą się wzajemnie kompensować. Natomiast w przypadku ujemnej interakcji między parą kryteriów (redundancja), wystarczy że będzie spełnione jedno z nich w sposób zadawalający. O takich kryteriach można powiedzieć, że są wzajemnie wymienne. W przypadku zerowej interakcji otrzymana wartość jest dokładnie sumą indywidualnych wartości ocen kryteriów (kryteria są wzajemnie niezależne) (Grabisch et al., 2009). Przykładem modelu o zerowej interakcji między kryteriami jest WAM. Natomiast dla WGM, przy założeniu dodatnich wartości wag, indeks interakcji przyjmuje wartości dodatnie – wszystkie kryteria są wzajemnie komplementarne (synergiczne). Wartości indeksów interakcji wyznaczone przez Grabisch (2009), wynoszą odpowiednio:

- dla MIN: $1/(n + 1)$,
- dla WGM: $\prod_{k \in [n] \setminus \{j, l\}} (\text{sgn}(w_j w_l) / (w_k + 1))$,
- dla WAM: 0,
- dla MAX: $-1/(n + 1)$.

Zarówno funkcja WAM jak WGM spełniają podstawowe założenia dla funkcji agregujących w analizach wielokryterialnych. Obydwie funkcje są funkcjami kompensacyjnymi. Jednak WAM charakteryzująca neutralną postawę względem ryzyka (*orness* = 1/2), ma wyższy poziom kompensacji kryteriów niż WGM. WGM należy do funkcji typu koniunkcyjnego (AND-like) co odpowiada postawie unikającej ryzyka. Funkcja WAM nie uwzględnia interakcji między kryteriami (indeks interakcji = 0). Zakłada pełną niezależność kryteriów (jest funkcją addytywną). WGM dla wag spełniających zadeklarowane założenia (wagi z przedziału od zera do jeden, sumujące się do jedności) uwzględnia synergię między kryteriami, ich dodatnią interakcję. Ponadto, funkcja WGM posiada element anihilujący: jeżeli choć jedna wartość z ocenionych preferencji wartości kryteriów będzie równa zero, wówczas funkcja zwróci wartość równą zero. Natomiast funkcja WAM nie posiada elementu anihilującego. Alternatywy nieakceptowalne mogą być wówczas wyeliminowane w osobnym etapie uwzględniania barier.

Studium przypadku

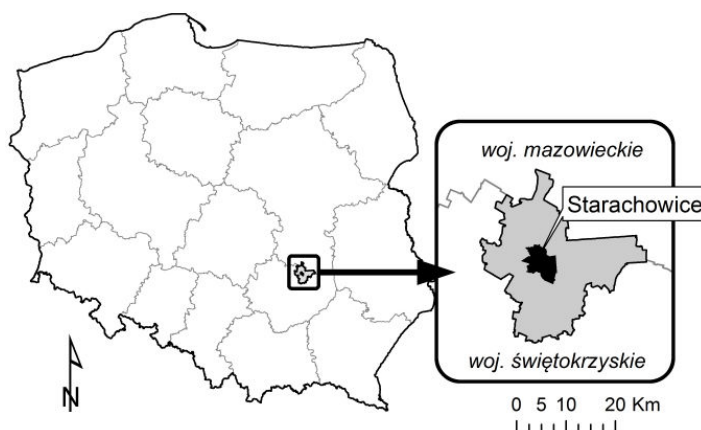
Studium przypadku polegało na określeniu naturalnych predyspozycji terenu do gospodarowania wodą opadową poprzez infiltrację do gruntu w miejscu powstania opadu, na przykładzie miasta Starachowice.

Opis obszaru analizy

Starachowice to miasto o wieloletniej tradycji przemysłowej. Położone jest w województwie świętokrzyskim, przy granicy województwa mazowieckiego (rys.1).

Starachowice znajdują się w granicach zlewni rzeki Kamiennej (dorzecze Wisły). Na obszarze analizy występuje 6 zlewni trzeciego rzędu, 3 dopływy i 3 sztuczne zbiorniki wodne wykorzystywane dla potrzeb przemysłu lub rekreacji. Pierwszy poziom wodonośny (PPW) zgodny jest z morfologią terenu i budową geologiczną. Kierunek spływu wód podziemnych zdeterminowany jest bazą drenażową – doliną rzeki Kamiennej. Dominuje tu słaba przepuszczalność gruntów. Charakterystyczne jest występowanie tylko jednej jednolitej części wód podziemnych (JCWP nr 102) i brak jej naturalnej izolacji. Według danych monitoringu jednolitych części wód podziemnych Państwowego Instytutu Geologicznego (karta informacyjna JCWPD nr 102 monitoring PIG) zasilanie wód podziemnych na badanym obszarze odbywa

Rysunek 1. Lokalizacja obszaru analizy – miasto Starachowice (opracowanie własne na podstawie danych Państwowego Rejestru Granic)



się przez infiltrację opadów atmosferycznych. Powoduje to, iż pomimo dobrego stanu ilościowego, wody podziemne cechuje zły stan jakościowy wynikający z antropopresji, oraz zły stan ogólny. Zagrożone są one niespełnieniem celów środowiskowych. Nie można jednak jednoznacznie stwierdzić przyczyny tego zjawiska (może to być przemysł, nieregulowana gospodarka wodno-ściekowa itp.). Sytuacja ta wskazuje na istotność uwzględnienia występowania procesu infiltracji w podejmowanych decyzjach dotyczących gospodarowania wodami opadowymi na terenie miasta, szczególnie w aspekcie redukcji zanieczyszczeń.

Na podstawie wstępnego rozpoznania uwarunkowań sformułowano następujące założenia dotyczące naturalnych predyspozycji terenów miasta do infiltracji wód opadowych do gruntu w miejscu ich powstania:

- brak predyspozycji dla infiltracji wód opadowych do gruntu na słabo przepuszczalnych stokach o nachyleniu powyżej 5% oraz pod wodami powierzchniowymi, gdzie prawie zawsze zachodzi zjawisko przeciwne – drenaż,
- znacznie ograniczone możliwości infiltracji na terenie doliny rzeki Kamiennej ze względu na głębokość zwierciadła wody pierwszego poziomu wodonośnego (1 m p.p.t.),
- dobre predyspozycje dla infiltracji na tarasie sandrowym o utworach dobrze przepuszczalnych i poziomie zwierciadła pierwszego poziomu wodonośnego poniżej 5 m p.p.t.,
- średnie naturalne predyspozycje dla infiltracji na pozostałych, niezabudowanych i niezasklepionych terenach, ze względu na ograniczoną przepuszczalność gruntów przy jednocześnie występujących korzystnych uwarunkowaniach, to jest przy dominującym nieznacznym nachyleniu terenu (poniżej 2%) i poziomie zwierciadła PPW poniżej 2 m p.p.t. – przy czym predyspozycje te są mniejsze na obszarach pokrytych lasami i zadrzewieniami, niż na obszarach pokrytych roślinnością niską, takich jak: łąki, pola, bądź nieużytki.

Należy zaznaczyć, że lasy i zadrzewienia mają zdecydowanie korzystny wpływ na stan wód podziemnych i na analizowanym terenie są to lasy ochronne. Natomiast na terenach pól istnieje ryzyko zarówno wymywania składników mineralnych jak i transportu zanieczyszczeń.

Sformułowane założenia opisują jednocześnie oczekiwania odnośnie spodziewanych wyników przeprowadzonej analizy.

Proces analizy wielokryterialnej obejmował następujące etapy:

- opracowanie map kryteriów
- ocena wartości kryteriów
- wyznaczenie wag kryteriów
- zastosowanie reguły łączenia
- opracowanie wyników

Opracowanie map kryteriów

Do analizy potencjału infiltracji przyjęto następujące kryteria: 1) pokrycie terenu, 2) spadki, 3) głębokość zwierciadła pierwszego poziomu wodonośnego (PPW), 4) przepuszczalność gruntu. Do opracowania mapy pokrycia terenu wykorzystano dane BDOT10k uzupełnione informacją o szacunkowej powierzchni biologicznie czynnej terenów zabudowanych, uzyskaną z analizy ortofotomapy, udostępnionej przez miejski portal mapowy (usługa WMS). Z danych BDOT10k wykorzystano klasy obiektów pokrycia terenu, uzupełnione o wybrane obiekty innych klas, uszczegóławiających informację o pokryciu terenu. Należały do nich między innymi budynki (BUBD) oraz odcinki jezdni (SKJZ). W tym drugim przypadku, utworzone zostały bufory o szerokości jezdni oraz uwzględniony został atrybut określający materiał nawierzchni. W podobny sposób wprowadzono również informację uszczegóławiającą z innych, wybranych klas. W rezultacie wyznaczone zostały 63 klasy pokrycia terenu. Mapa pokrycia terenu zostanie w przyszłości zweryfikowana przez studentów w czasie praktyk terenowych. Do opracowania mapy spadków terenu w skali całego miasta wykorzystano NMT w formacie Esri TIN, zawierający rozproszone punkty wysokościowe tworzące nieregularną siatkę trójkątów (*Triangulated Irregular Network*), utworzony na podstawie danych pomiarowych ASCII_TBD, którego błąd średni zawiera się w przedziale od $\pm 0,8$ do $\pm 2,0$ m. Do wykonania mapy spadków wykorzystano narzędzia 3D Analyst (Surface Slope).

Głębokość do zwierciadła PPW została przyjęta na podstawie mapy hydrogeologicznej Polski (PPW WH) w skali 1: 50 000 (Meszczynski, Szczerbicka, 2008). Zauważono rozbieżności względem danych pochodzących z mapy hydrograficznej w skali 1:50 000. Mapę przepuszczalności gruntów opracowano na podstawie danych o utworach powierzchniowych z mapy litogenetycznej Polski w skali 1:50 000 (Rumiński i in., 2007) oraz szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50 000 (Studencki i in., 1989). Informacja o przepuszczalności gruntów z mapy hydrograficznej w skali 1: 50 000 wprowadza zbyt dużą niepewność informacji w klasie „różnicowana” obejmującą tereny zabudowane, które w mieście obejmują znaczną część powierzchni.

Otrzymane mapy kryteriów w formacie wektorowym zostały następnie przekonwertowane do formatu rastrowego. Utworzone mapy rastrowe miały jednorodną rozdzielczość 10×10 metrów. Został również zdefiniowany raster dociągania (*snap raster* w tak zwanym środowisku przetwarzania ArcGIS Esri 10.3) – dzięki czemu wszystkie rastry ocenionych wartości kryteriów miały jednorodny układ pikseli. Ułatwiło to przeprowadzenie obliczeń przy zastosowaniu algebry map w dalszych etapach analizy.

Ocena wartości kryteriów

Ocena wartości kryteriów dokonana została metodą ekspercką i stanowi pewien eksperyment metodyczny. Wartości pokrycia terenu pomierzone są w skali klasyfikacyjnej. Dlatego do przeprowadzenia oceny wartości tego kryterium wykorzystano metodę oszacowania współczynników (Malczewski, 1999; Malczewski, Jaroszewicz, 2018). Podobnie postąpio-

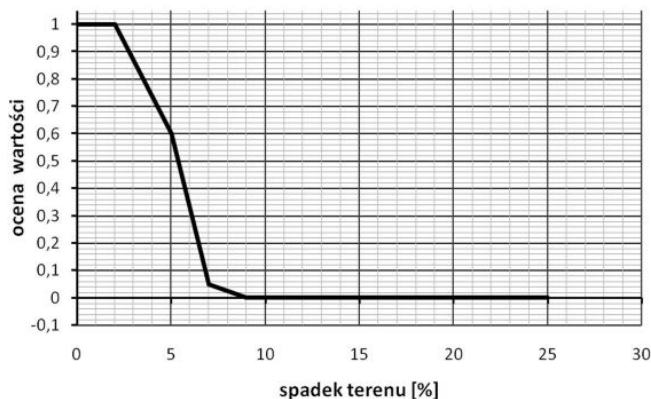
no w przypadku kryterium przepuszczalności gruntu, ocenianego na podstawie utworów powierzchniowych. W tym przypadku uwzględniono dodatkowo współczynniki przepuszczalności – Darcy (za: Pazdro, Kozerski, 1990), przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Podział skał według własności infiltracyjnych przyjęty do oceny przepuszczalności gruntu na podstawie utworów powierzchniowych (źródło: Pazdro, Kozerski, 1990, zmienione)

Charakterystyka przepuszczalności	Współczynnik przepuszczalności (Darcy)	Ocena wartości*
Bardzo dobra. Rumosze, żwiry, gruboziarniste i równoziarniste piaski, skały masywne z bardzo gęstą siecią drobnych szczelin	powyżej 100	0,91–1,00
Dobra. Piaski gruboziarniste nieco ilaste, piaski różnoziarniste, piaski średnioziarniste, kruche słabo spojone gruboziarniste piaskowce, skały masywne z gęstą siecią szczelin	100–10	0,51–0,90
Średnia. Piaski drobnoziarniste, less	10–1	0,36–0,50
Słaba. Piaski pylaste, gliniaste, mułki, piaskowce, skały masywne z rzadką siecią szczelin	1–0,1	0,10–0,35
Skały półprzepuszczalne. Gliny, namuły, mułowce, ily piaszczyste	0,1–0,001	0,05–0,09
Skały nieprzepuszczalne. Iły, łałupki, zwarte gliny ilaste, margle ilaste, skały masywne niespękane	poniżej 0,001	0,001

*Przedziały oceny wartości uwzględniają zróżnicowanie litologiczne na podstawie szczegółowej mapy geologicznej Polski

Wartości kryterium *spadki terenu* oceniono jako destymulantę. W celu opracowania bardziej realistycznego modelu, w procedurze oceny wartości tego kryterium, dokonano transformacji wartości procentowych spadków terenu utworzonej przez złączenie kilku funkcji liniowych (rys. 2).



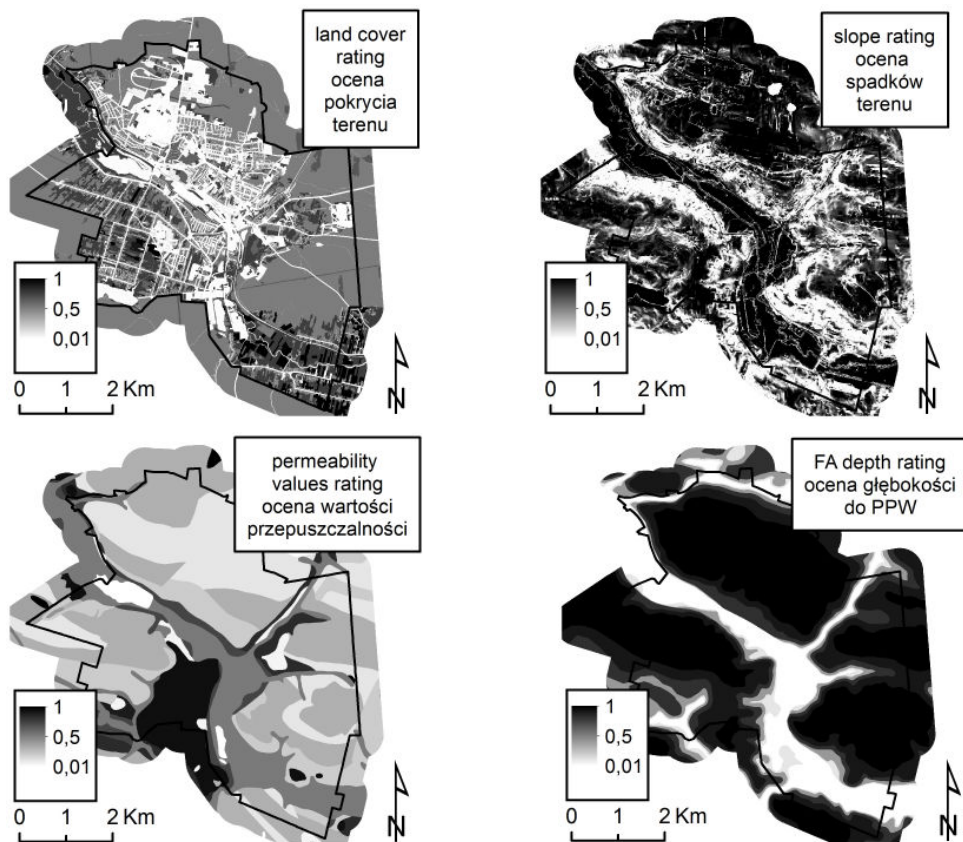
$$Q = \begin{cases} 1,00 & \text{dla } S_{\%} \leq 2,00 \\ \frac{5,00 - S_{\%}}{3,00} * 0,40 + 0,60 & \text{dla } 2,00 < S_{\%} \leq 5,00 \\ \frac{7,00 - S_{\%}}{2,00} * 0,55 + 0,05 & \text{dla } 5,00 < S_{\%} \leq 7,00 \\ \frac{9,00 - S_{\%}}{2,00} * 0,05 & \text{dla } 7,00 < S_{\%} \leq 9,00 \\ 0,00 & \text{dla } 9,00 < S_{\%} \leq 25,0 \end{cases}$$

Rysunek 2. Ocena wartości spadków terenu dla infiltracji, gdzie: Q – ocena preferencji wartości kryterium; $S_{\%}$ – wartość procentowa spadku terenu; spadki terenu powyżej 25% stanowiły wykluczenie z dalszej analizy (opracowanie własne)

Wartości głębokości do zwierciadła PPW na mapie hydrogeologicznej Polski (PPWWH) (Meszczczyński, Szczerbicka, 2008) w skali 1: 50 000 podane są w ujęciu skokowym (wartości podzielone na klasy). Głębokość do zwierciadła PPW stanowi stymulantę dla procesu infiltracji. Ze względu na brak izolacji infiltracja zachodzi na całym obszarze, ale za bardziej predestynowane obszary uznano te, charakteryzujące się niższym poziomem zwierciadła PPW. W ocenie wartości uwzględniono istotne ograniczenie infiltracji powyżej poziomu 2 m p.p.t. Jednak w celu uwzględnienia specyfiki zastosowanej metody ciągłej (ciągłość w przestrzeni wartości), przyjęto zamiast progowego, stopniowy rozkład wartości oceny. Zastosowano tu eksperyment metodyczny. Przyjęta ocena wartości przedstawiona została w tabeli 3.

Tabela 3. Ocena wartości głębokości PPW dla infiltracji (opracowanie własne)

Głębokość do PPW [m]	0–1	1–2	2–5	5–10	10–20	20–50
Przyjęta do analizy stopniowa ocena infiltracji	0,01	0,1	0,4	0,8	0,9	1,0
Klasyczna progowa ocena infiltracji	0,01			1,0		



Rysunek 3. Ocenione wartości kryteriów: najwyższej oceniona wartość (1) – barwa czarna, najniższa (0) – barwa biała (opracowanie własne przy zastosowaniu programu ArcGIS 10.3 Esri)

Na rysunku 3 przedstawiono mapy ocenionych wartości poszczególnych kryteriów przyjętych do analizy. Mapy te charakteryzują się różną szczegółowością przestrzenną, co wynika z przyjętych do analizy danych źródłowych. W szczególności głębokość do zwierciadła PPW i przepuszczalność gruntu mają większą zmienność lokalną, niż to jest przedstawione na mapach w skali 1:50 000. Ten aspekt może zostać ujęty w analizie przez wprowadzenie poprawek do wag kryteriów, uwzględniające nośność informacyjną map kryteriów, opartą na współczynniku entropii (Malczewski, Rinner, 2015). Innym rozwiązaniem jest uszczegółowienie danych na podstawie badań terenowych. Dla opracowania założeń do polityki gospodarowania wodą opadową w skali całego miasta można uznać te dane za wystarczająco szczegółowe. Natomiast dla określenia zasad gospodarowania wodą opadową i opracowania konkretnych ustaleń w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego konieczne jest uszczegółowienie danych.

Wyznaczenie wag kryteriów

Opracowano dwa warianty analizy. W pierwszym wariantcie przyjęto równą istotność kryteriów, tj.: $w_j = 1/n$ dla $j \in \{1, 2, \dots, n\}$. Zatem wagi wynosiły: $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0,25$. W drugim wariantcie przyjęto następujące wagi: pokrycie terenu 0,1, spadki 0,2, głębokość PPW 0,3, przepuszczalność gruntu 0,4. Przyjęte wartości zróżnicowanych wag odzwierciedlają ocenę istotności kryteriów, gdzie najważniejsze są właściwości hydrogeologiczne terenu, które modyfikowane są przez jego ukształtowanie. Natomiast pokrycie terenu może być modyfikowane w procesie zagospodarowania przestrzennego.

Zastosowanie reguły łączenia

Zastosowano dwie różne reguły łączenia: ważoną średnią arytmetyczną (WAM) tożsamą z liniową sumą ważoną (WLC) oraz ważoną średnią geometryczną (WGM). W przypadku WAM uwzględniono dodatkowo mapę barier (MASKA). Jest to raster o binarnych wartościach pikseli: 1 dla lokalizacji, w których istnieje możliwość infiltracji oraz 0 dla lokalizacji, w których nie ma możliwości infiltracji. W rezultacie wynik obliczany jest w następujący sposób:

$$WAM = (w_1 \times M_1 + w_2 \times M_2 + w_3 \times M_3 + w_4 \times M_4) \times MASKA \quad (8)$$

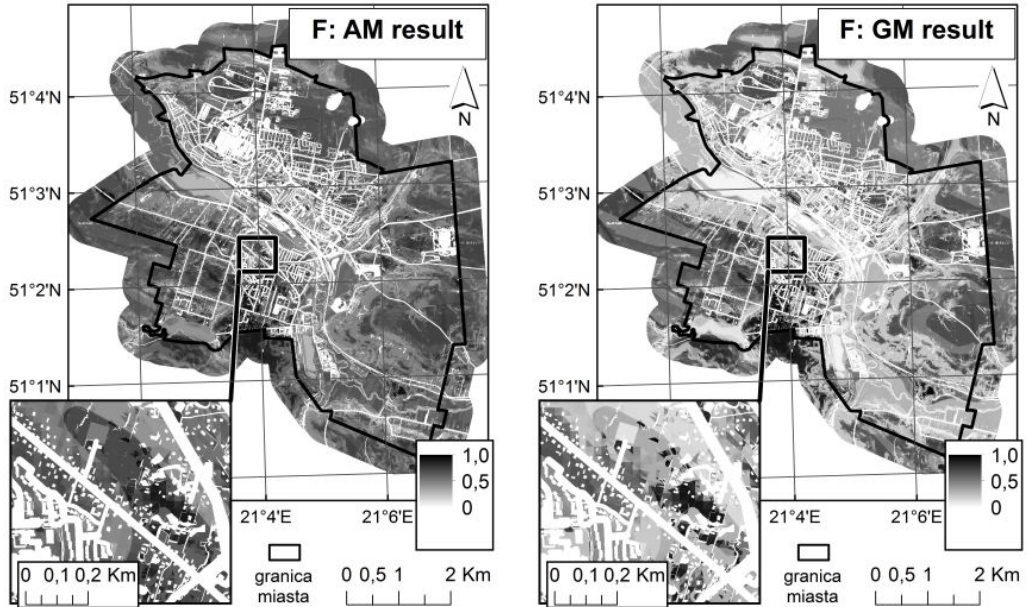
gdzie: w_1, \dots, w_4 są to wagi, dla map preferencji wartości kryteriów, odpowiednio: M_1, \dots, M_4 , natomiast *MASKA* to mapa o wartościach binarnych: 1 – dla akceptowalnych alternatyw decyzyjnych oraz 0 dla nieakceptowalnych.

W przypadku ważonej średniej geometrycznej (WGM), wynikowa mapa wyznaczona została w następujący sposób:

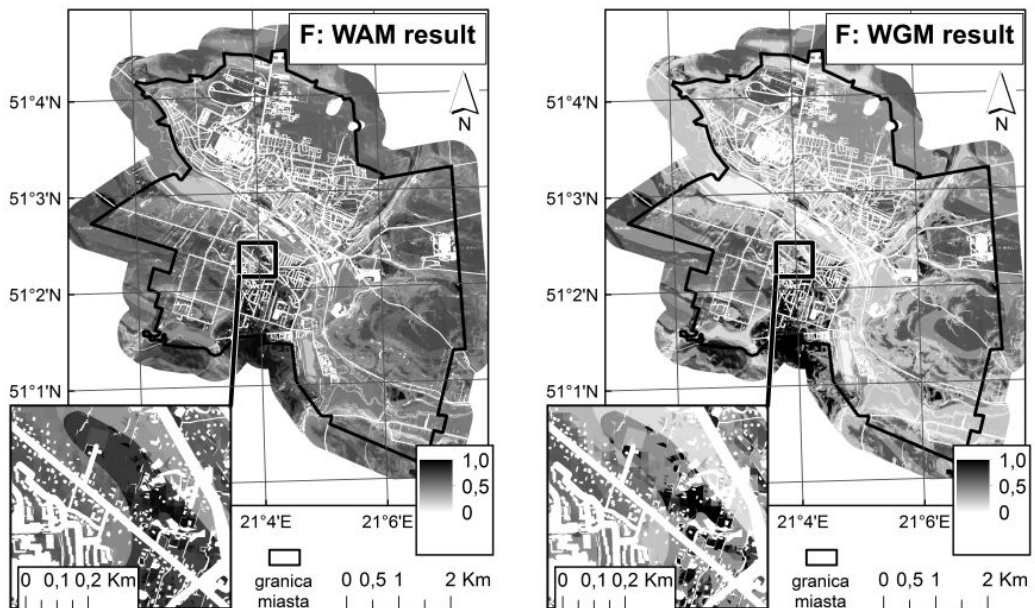
$$WGM = M_1^{w1} \times M_2^{w2} \times M_3^{w3} \times M_4^{w4} \quad (9)$$

z tym, że wartości w akceptowalnych alternatywach zostały powiększone o pewną małą wartość $\alpha = 0,001$, natomiast nieakceptowalne zachowały wartość równą 0. Takie rozwiązanie pozwala na uniknięcie wpływu elementu anihilującego (Langhans et al., 2014).

Otrzymane wynikowe mapy dla pierwszego wariantu z równymi wartościami wag przedstawiono na rysunku 4, natomiast wyniki dla drugiego wariantu analizy, w którym przyjęto zróżnicowane wartości wag, na rysunku 5.



Rysunek 4. Wyniki analizy dla funkcji agregującej AM (średnia arytmetyczna) oraz GM (średnia geometryczna) (opracowanie własne w ArcGIS 10.3 Esri)



Rysunek 5. Wyniki analizy dla funkcji agregującej WAM i WGM dla drugiego zestawu wag kryteriów (opracowanie własne w ArcGIS 10.3 Esri)

Wynik otrzymany przy zastosowaniu linowej sumy ważonej, dla obydwu wariantów wag, jest niezgodny z oczekiwaniami (przyjęte założenia dotyczące naturalnych predyspozycji terenów miasta do infiltracji wód opadowych do gruntu w miejscu ich powstania) ze względu na małe zróżnicowanie ocen i zbyt korzystne wyniki przede wszystkim dla:

- terenów stoków zbudowanych ze skał o słabej przepuszczalności, o nachyleniu powyżej 5% – tutaj dominuje proces spływu powierzchniowego, a udział procesu infiltracji jest praktycznie bardzo mały,
- terenów doliny rzeki Kamiennej, gdzie mimo przepuszczalnych, holocenijskich utworów powierzchniowych, które jednak cechuje mała miąższość i położenie na słabo przepuszczalnych utworach starszego pochodzenia, czynnikiem istotnie ograniczającym proces infiltracji jest mała głębokość do PPW (powyżej 2 m p.p.t.), a dominujące procesy to retencja (wody) oraz parowanie,
- terenów zbudowanych ze słabo przepuszczalnych skał, o małym nachyleniu, pokrytych lasami i zadrzewieniami – przeważają tu bowiem procesy intercepcji i ewaporacji, dlatego mniejsza ilość wód opadowych dociera do gruntu, gdzie jest również wychwytywana przez korzenie roślin i wykorzystana w procesie transpiracji.

W przypadku zastosowania funkcji agregującej WGM uzyskano, dla obydwu wariantów wag, wynik o wiele bardziej zgodny z oczekiwanym. Dopiero zastosowanie WGM jako funkcji agregującej pozwoliło na uwzględnienie zachodzących między kryteriami interakcji (synergii). Jednocześnie WGM, w porównaniu do WAM, w mniejszym stopniu pozwala na kompensację niskich wartości jednych kryteriów wysokimi wartościami drugich. Otrzymany wynik obarczony jest mniejszym ryzykiem przeszacowania terenów predestynowanych do infiltracji (przesunięty jest w kierunku funkcji koniunkcyjnej). Wydaje się, że zdecydowanie bardziej odpowiada to rzeczywistym relacjom zachodzącym w przyrodzie. Uwzględnienie zróżnicowanych wartości wag pozwoliło dodatkowo modelować istotność kryteriów.

Podsumowanie i wnioski

Dobór funkcji agregującej w modelu wielokryterialnej analizy przestrzennej powinien odpowiadać w jak największym stopniu realiom analizowanego procesu. Najczęściej stosowana funkcja agregująca WAM (związana z metodą liniowej sumy ważonej WLC) nie zawsze prowadzi do dobrych wyników. Przede wszystkim jest to addytywna funkcja agregująca, która nie pozwala na uwzględnienie interakcji między preferencjami wartości kryteriów (argumentami x_i). W rozważanym problemie infiltracji wód opadowych do gruntu, przyjęte kryteria są ze sobą synergicznie powiązane, co oznacza, że równoczesne spełnienie ich w wysokim stopniu jest ważniejsze niż osiągnięcie nawet najlepszego wyniku jednego kryterium przy stosunkowo słabszym spełnieniu pozostałych. W analizowanym przykładzie oznacza to, że nawet, jeśli właściwości hydrogeologiczne i ukształtowanie terenu są sprzyjające infiltracji to pokrycie terenu na przykład zasklepienie gruntów – zabudową lub nawierzchniami nieprzepuszczalnymi – nie tylko ogranicza, ale wręcz uniemożliwia zachodzenie tego procesu. Taka sama zależność występuje, gdy pokrycie i ukształtowanie terenu oraz przepuszczalność gruntu są korzystne dla infiltracji natomiast zwierciadło PPW jest powyżej 2 m p.p.t – wówczas również infiltracja jest co najmniej istotnie ograniczona. Podobnie jest w przypadku nachylenia terenu – im wyższe nachylenie tym bardziej intensywny jest spływ powierzchniowy, mimo że pokrycie terenu zadrzewieniami może wpływać na niego ograni-

czająco. Dla synergicznie powiązanych kryteriów lepszym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie ważonej średniej geometrycznej WGM. Jest to funkcja, która pozwala na uwzględnienie synergicznego oddziaływania między kryteriami. Jednak ze względu na występowanie wartości anihilującej (wartość kryterium równa 0), część autorów (np. Langhans et al., 2014) proponuje stosowanie średniej geometrycznej z małym parametrem przesunięcia wartości kryterium, tak by uniknąć wartości zerowych. Wartości zerowe mogą być zastosowane dla modelowania barier (nieakceptowalnych alternatyw decyzyjnych). Obok interakcji kryteriów, istotny jest również poziom kompensacji ich wartości. Funkcja WAM leży dokładnie między rozwiązaniem koniunkcyjnym (MIN) i dysjunkcyjnym (MAX) i posiada wartość alternatywności (*orness*) równą $1/2$. Ważona średnia geometryczna (WGM) posiada wartość alternatywności zależną od liczby kryteriów i wartości wag istotności przypisanych do nich. Przy równych wagach zmienia się od wartości *orness* = $1/3$ dla dwóch kryteriów do wartości asymptotycznie zbliżającej się do *orness* = $1/e$ dla liczby kryteriów dążących do nieskończoności. Stale jest bardziej koniunktywna niż ważona średnia arytmetyczna WAM. Zastosowanie funkcji WGM promuje bardziej te alternatywy, w których poprawie ulegają słabsze wartości większej liczby kryteriów, niż te, w których poprawiają się najlepsze wartości pojedynczych kryteriów. Zatem WGM jest funkcją o niższym poziomie kompensacji kryteriów rozumianym jako *trade-off*. Przedstawiona prosta analiza przypadku miasta Starachowice potwierdziła przedstawione rozważania teoretyczne. Wyniki otrzymane przy zastosowaniu funkcji agregującej WGM okazały się bardziej wiarygodne, w rozumieniu oczekiwanego wyniku, niż rezultaty otrzymane przy zastosowaniu WAM. W artykule ograniczono się do porównania tylko dwóch funkcji agregujących: WAM i WGM, głównie ze względu na ich prostotę i częstość stosowania. Należy zaznaczyć jednak, iż w ostatnich latach podejście do analiz wielokryterialnych opartych na doborze funkcji agregującej jest bardzo dynamicznie rozwijającym się zagadnieniem, szczególnie w powiązaniu z teorią zbiorów rozmytych.

Podziękowania: Autorki składają podziękowania dwóm anonimowym Recenzentom za wszystkie wnikliwe, merytoryczne i rzeczowe uwagi.

Finansowanie: Praca finansowana ze środków statutowych Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej.

Litertaura (References)

- Bielecka Elżbieta, 2006: Systemy Informacji Geograficznej. Teoria i zastosowania (Geographic information systems. Theory and practical applications). Warszawa, Wydawnictwo PJWSTK.
- Bieliakov Gleb, Pradera Ana, Calvo Tomasa, 2007: Aggregation Functions: a Guide for Practitioners. [In:] Kacprzyk J. (ed.), Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 221: 361 p., Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Beliakov Gleb, Bustince Sola Humberto, Calvo Sánchez Tomasa, 2016: A Practical Guide to Averaging Functions. [In:] Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 329: 352 p., Springer International Publishing Switzerland. DOI 10.1007/978-3-319-24753-3_2.
- Calvo Tomasa, Mayor Gaspar, Mesiar Radko, 2002: Aggregation Operators : New Trends and Applications. [In:] Kacprzyk J. (ed.), Studies in Fuzziness and Soft Computing. Heidelberg, Physica-Verlag HD. ISBN: 9783662003190, e-ISBN: 9783790817874.
- Chrisman Nicholas R., 1996: Exploring Geographic Information Systems. New York, Wiley.
- Dujmovič Jozo J., 1974: Weighted conjunctive and disjunctive means and their application in system evaluation. Univ. Beograd. Publ. Elektrotechn. Fak. No. 461-497: 147-158.

- Dujmovič Jozo J., 2008: Continuous preference logic for system evaluation. *IEEE Transaction Fuzzy Systems* 15(6): 1082-1099.
- Eastman J. Ronald, 1999: Multi-criteria evaluation and GIS. *Geographical information systems* 1 (1): 493-502.
- Fodor Janos C., Roubens Marc, 1994: Fuzzy Preference Modelling and Multicriteria Decision Support. Kluwer, Dordrecht.
- Geiger Wolfgang, Dreiseitl Herbert, 1999: Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych (Neue Wege für das Regenwasser). Poradnik. Bydgoszcz, Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO: 334 s. ISBN: 83-906015-4-4.
- Gorgoń Justyna (kierownik), Starzewska-Sikorska Anna, Staszewski Tomasz, Bronder Joachim, Nowak Bartosz, Krupaneck Janusz, Działoszyńska-Wawrzekiewicz Monika, Michaliszyn-Gabryś Beata, Strzelecka-Jastrzab Ewa, Cenowski Marian, 2014: Ocena wrażliwości terenów miejskich na zagrożenia wynikające ze zmian klimatu (Evaluation of sensitivity of urban areas to threats caused by climate changes). Katowice, Instytut Ekologii Terenów Przemysłowych. Dostęp 24.02.2014 r. nfosigw.gov.pl/download/gfx/nfosigw/pl/nfoekspertyzy/858/211/1/2014-425.pdf
- Gotlib Dariusz, Iwaniak Adam, Olszewski Robert, 2008: GIS. Obszary zastosowań. (GIS. The areas of applications). Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Grabisch Michel, 1995: Fuzzy integral in multicriteria decision making. *Fuzzy Sets and Systems* 69 (3): 279-298.
- Grabisch Michel, 1996: The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making. *European Journal of Operational Research* 89 (3): 445-456.
- Grabisch Michel, Marichal Jean-Luc, Mesiar Radko, Pap Endre, 2009: Aggregation Functions. [In:] Encyclopedia of Mathematics and its Applications vol. 127. Cambridge University Press.
- Grabisch Michel, Marichal Jean-Luc, Mesiar Radko, Pap Endre, 2011: Aggregation functions: Means. Information Sciences. Elsevier. 181 (1): 1-22.
- Januchta-Szostak Anna, 2014: Rola urbanistyki i architektury w gospodarowaniu wodą (The role of city planning and architecture in water management). [W:] Zrównoważony Rozwój – Zastosowania. Woda w mieście 5: 31-47, Fundacja Sędzimir. Dostęp 15.12.2018 r. http://www.sendzimir.org.pl/images/zrz-5-pl/ZRZ5_all.pdf
- Karta informacyjna JCWPD nr 102. Monitoring Państwowego Instytutu Geologicznego. Dostęp 11.03.2019 r. <https://www.pgi.gov.pl/docman-tree/psh/zadania-psh/jcwpd/jcwpd-100-119/4535-karta-informacyjna-jcwpd-nr-102/file.html>
- Keeney Ralph L., 1992: Value-focused thinking: A path to creative decision making. Cambridge: Harvard University Press.
- Królikowska Jadwiga, Królikowski Andrzej, 2012: Wody opadowe – odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie i wykorzystanie (Rainwaters – disposal, management, treatment and use). Piaseczno: Wydawnictwo Seidel-Przywecki.
- Langhans Simone D., Reichert Peter, Schuwirth Nele, 2014: The method matters: A guide for indicator aggregation in ecological assessments. *Ecological Indicators* 45: 494-507.
- Malczewski Jacek, 1999: GIS and Multicriteria Decision Analysis. New York, John Wiley and Sons.
- Malczewski Jacek, 2006: GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographic Information Science* 20 (7): 703-726.
- Malczewski Jacek 2010: Multiple criteria decision analysis and geographic information systems. [In:] Ehr Gott M., Figueira J., Greco S. (eds) Trends in Multiple Criteria Decision Analysis. International Series in Operations Research & Management Science, vol 142: 369-395. Springer, Boston, MA.
- Malczewski Jacek, Rinner Claus, 2015: Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science. Advances in Geographic Information Science. Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- Malczewski Jacek, Jaroszewicz Joanna, 2018: Podstawy analiz wielokryterialnych w systemach informacji geograficznej (Foundations of multi-criteria analysis in geographic information systems). Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: 254 s. ISBN 978-83-7814-762-6.
- Marichal Jean-Luc, 1998: Aggregation operators for multicriteria decision aid. (Doctoral dissertation, University of Liège, Belgium). Dostęp: 15.11.2018 r. <http://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/7224/1/PhD-Thesis.pdf>

- McHarg Ian L., 1969: Design with nature. American Museum of Natural History, New York, Natural History Press.
- Meszczyński Jacek, Szczerbicka Maria, 2008: Mapa hydrogeologiczna polski. Piorwszy poziom wodonośny. Występowanie i hydrodynamika. Mapa zbiorcza. 1: 50 000; arkusz 780 – Starachowice (m-34-31-c). (A hydro-geological map of Poland. The first water-bearing level. The presence and hydrodynamics. A collective map. 1:50 000; the map sheet 780 – Starachowice (m-34-31-c)). Warszawa: PIG-PIB i MŚ.
- NACTO Project, 2017: Urban Street Stormwater Guide, vol. 1. Washington/Covelo/London: National Association of City Transportation Officials, IslandPress.
- Pazdro Zdzisław, Kozerski Bogdan, 1990: Hydrogeologia ogólna (General hydrogeology). Warszawa, Wydawnictwa Geologiczne.
- Rumiński Jacek, Romanek Andrzej, Żarski Marcin, 2007: Mapa Litogenetyczna Polski 1:50 000 (A lithogenetic map, 1:50,000 scale). Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny. ISBN978-83-7538-127-6.
- Salido J.M. Fernandez, Murakami Shuta, 2003: Extending Yager's orness concept for the OWA aggregators to other mean operators. *Fuzzy Sets and Systems* 139 (3): 512-542.
- Scott Michael J., Antonsson Eric K., 1998: Aggregation functions for engineering design trade-offs. *Fuzzy Sets and Systems* 99 (3): 253-264.
- Scott Michael J., Antonsson Eric K., 2005: Compensation and Weights for Trade-offs in Engineering Design: Beyond the Weighted Sum. *Journal of Mechanical Design* 127 (6): 1045-1055.
- Studencki Mieczysław, Romanek Andrzej, Fortuna Jerzy, 1989: Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski (The Detailed Geological Map of Poland). Warszawa, Wydawnictwa Geologiczne.
- Voogd Henk, 1983: Multi-criteria evaluation for urban and regional planning. London, Pion.
- Wagner Iwona, Januchta-Szostak Anna, Waack-Zajac Anita, 2014: Narzędzia planowania i zarządzania strategicznego wodą w przestrzeni miejskiej (Tools for planning and strategic management of water in an urban area). [W:] Zrównoważony Rozwój – Zastosowania. Woda w mieście 5: 17-29, Fundacja Sędzimir. Dostęp 12.11.2018 r. http://www.sendzimir.org.pl/images/zrz-5-pl/ZRZ5_all.pdf
- Wolski, Przemysław, 2013: Znaczenie okien hydrogeologicznych (The importance of hydrological windows). *Problemy ekologii krajobrazu* 36:129-144.

Akty prawne:

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie opracowań ekofizjograficznych (Decree of the Minister of the Environment of September 9, 2002 on eco-physiographic works). Dz.U. 2002 nr 155 poz. 1298.
- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (The act of July 20, 2017, the Water Law). Dz. U. 2017 poz. 1566 z późn. zm.
- Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (The act of October 3, 2008 on distribution of information on the environment and its protection, participation of the society in environmental protection and on environmental impact assessments). Dz. U. 2008 nr 199 poz. 1227.
- Dane monitoringu jednolitych części wód podziemnych Państwowego Instytutu Geologicznego (monitoring JCWP PIG) (Data from monitoring of uniform parts of underground waters of the Polish Geological Institute). <https://www.pgi.gov.pl/docman-tree/psh/zadania-psh/jcwpd/jcwpd-100-119/4535-karta-informacyjna-jcwpd-nr-102/file.html>

Streszczenie

Wytyczne dla decyzji planistycznych powinny wykorzystywać analizy uwarunkowań przyrodniczych wykonywanych w opracowaniu ekofizjograficznym. Kluczowym etapem transparentnej analizy jest synteza wyników, pozwalająca na przejście od analizy danych do formułowania wniosków. Przy wykorzystaniu analiz wielokryterialnych etap ten związany jest z właściwym doбором funkcji agregującej. Najczęściej stosowanym podejściem jest liniowa suma ważona. Jednak zastosowanie liniowej, addytywnej funkcji agregującej nie zawsze jest właściwe. Nie pozwala na uwzględnienie interakcji

między kryteriami. W artykule omówiono własności wybranych funkcji agregujących oraz opracowano analizę wielokryterialną możliwości infiltracji wód opadowych do gruntu. Badania przeprowadzono na obszarze miasta Starachowice. Wyniki potwierdziły rozważania teoretyczne. Zastosowanie funkcji agregującej, uwzględniającej interakcje między kryteriami, dostarczyło bardziej wiarygodne wyniki niż zastosowanie liniowej sumy ważonej.

Abstract

Planning decisions should be based on analyses of natural conditions performed as eco-physiographic studies. The key step in the transparent analysis is the synthesis of results, allowing the transition from data analysis to formulation of conclusions. When using multi-criteria analyses, this stage is related to the selection of the proper aggregation function. The most commonly used approach is a linear weighted sum. However, the use of an additive aggregation function is not always appropriate. It does not allow taking into account the interaction between criteria. The paper discusses the properties of selected aggregation functions. The multi-criteria analysis of possibilities of the rainwater infiltration into the ground was developed. Research works have been carried out in the area of the city of Starachowice. The results confirmed theoretical considerations. The use of an aggregate function that considers interactions between criteria provided more reliable results than the use of a linear weighted sum.

Dane autorek / Authors details:

dr inż. Joanna Jaroszewicz
<https://orcid.org/0000-0002-6112-5240>
joanna.jaroszewicz@pw.edu.pl

dr inż. Katarzyna Rędzińska
<https://orcid.org/0000-0001-8621-0073>
katarzyna.redzinska@pw.edu.pl

Przesłano /Received	31.01.2019
Zaakceptowano / Accepted	14.03.2019
Opublikowano / Published	30.03.2019

