

Janusz RAK, Krzysztof BORYCZKO

ZAKŁAD ZAOPATRZENIA W WODĘ I ODPROWADZANIA ŚCIEKÓW  
POLITECHNIKA RZESZOWSKA IM. I. ŁUKASIEWICZA

## **DWUPARAMETRYCZNA METODA OCENY DYWERSYFIKACJI ZASOBÓW WODY W SYSTEMACH ZBIOROWEGO ZAOPATRZENIA W WODĘ Z WYKORZYSTANIEM WSKAŹNIKA SHANNON’A-WEAVER’A**

TWO-PARAMETER METHOD FOR ASSESSING THE WATER  
RESOURCES DIVERSIFICATION OF COLLECTIVE WATER  
SUPPLY SYSTEMS USING SHANNON-WEAVER INDICATOR

*The theme of the publication is to provide a method of determining the diversification degree of water resources in collective water supply systems. For the purposes of the method Shannon-Weaver indicator was adapted. The paper presents a method of two-parameter assessment of water resources diversification with the proposal of collective water supply systems categorization of the diversification degree. The method takes into account the water intakes of and network water tanks. The number of water intakes and their share in the total supply for collective water supply systems, as well as the number and volume of network water tanks allows to calculate the dimensionless diversification ratios and to compare different collective water supply systems. The paper presents the calculation of indicators of diversification for selected collective water supply systems.*

## 1. Wprowadzenie

Znane z ekonomii pojęcie dywersyfikacji portfela to najpopularniejsza oraz określana jako jedna z najefektywniejszych metod ograniczania ryzyka inwestycyjnego. Rozumie się przez to podział portfela na różne rodzaje inwestycji między innymi pod względem rodzaju rynku (np. surowce, waluty, akcje, obligacje), branży (w przypadku akcji) czy zasięgu geograficznego, które obejmują dane podmioty (np. akcje, fundusze akcji przedsiębiorstw z określonego rejonu). W zastosowaniu technicznym, na potrzeby porównania różnych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę, pojęcie dywersyfikacji można wykorzystać w celu opisu różnic w zasobach wodnych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę.

O dywersyfikacji w zaopatrzeniu w wodę myśleli już architekci miast przed naszą erą.

Z podstaw niezawodności wprost wynika, że aby zwiększyć niezawodność danego elementu należy go zdublować w strukturze niezawodnościowej równoległej jako element rezerwy gorącej [1, 3, 4, 13, 14, 27]. W przypadku zasobów wodnych w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę mamy najczęściej kilka ujęć wody o różnych wydajnościach. Jedno ujęcie powoduje, że dany system zbiorowego zaopatrzenia w wodę jest w znaczącym stopniu narażony na brak dostaw wody czy to ze względu na jego awarię [12, 15, 33, 39] czy nieodpowiednią jakość wody [5, 34]. Awaryjne wyłączenie podstawowego, jedynego ujęcia wody powoduje zagrożenia zdrowia i życia dla mieszkańców danej jednostki osadniczej [17, 24, 26, 35, 37]. Z podobną sytuacją mamy do czynienia w przypadku sieciowych zbiorników wodociągowych [2, 6, 9-11, 25], z tym że nie w każdym systemie zaopatrzenia w wodę zbiornik występuje. W takim przypadku, podobnie jak w sytuacji gdy na sieci wodociągowej znajduje się jeden zbiornik, mamy do czynienia z brakiem dywersyfikacji objętości wody [29].

Aglomeracja (łac. Agglomeratio – nagromadzenie) jest to obszar o intensywnej zabudowie, charakteryzujący się znaczącą liczbą ludności przebywającej na danym terenie. Aglomeracje monocentryczne stanowią duże ośrodki miejskie, z położonymi wokół nich miasteczkami satelitarnymi i zurbanizowanymi wioskami. Aglomerację policentryczną tworzy kilka połączonych ze sobą dużych obiektów miejskich. Położone blisko siebie aglomeracje z czasem przekształcają się w jednostkę o wysokim poziomie zurbanizowania określaną mianem megalopolis. Położone blisko siebie dynamicznie rozwijające się aglomeracje mogą tworzyć obszary metropolitarne, w skład których wchodzi kilka/kilkanaście miast wokół znaczącego centrum miejskiego i powiązane z nim funkcjonalnie oraz ekonomicznie.

Krytyczne elementy infrastruktury komunalnej warunkujące sprawne funkcjonowanie dużych, zurbanizowanych obszarów tworzą systemy [40]:

- zaopatrzenia w energię, surowce energetyczne i paliwa,
- łączności,
- sieci teleinformatycznych,
- finansowe,
- zaopatrzenia w żywność,
- zaopatrzenia w wodę,
- ochrony zdrowia,
- transportowe,
- ratownicze,
- zapewniające ciągłość działania administracji publicznej,
- produkcji, składowania, przechowywania i stosowania substancji chemicznych

i promieniotwórczych, w tym rurociągi substancji niebezpiecznych.

Największą aglomeracją Polski jest Górnośląski Okręg Przemysłowy (2,55 mln mieszkańców), a druga aglomeracja warszawska (2,25 mln mieszkańców).

Celem pracy jest przedstawienie metody oceny dywersyfikacji zasobów wody w aglomeracji miejskich z wykorzystaniem wskaźnika Shannon'a Weaver'a. Przedstawiono dwa parametry mające decydujący wpływ na bezpieczeństwo ciągłości dostaw wody oraz zaproponowano ocenę zasobów wody według przyjętej skali i kategorii dywersyfikacji. Zaprezentowano obliczenia stopnia dywersyfikacji dla siedemnastu systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę na terenie Polski. Przedstawiono także zarys teorii Czarnej Łabędzia. Ochroną profilaktyczną przed tego typu rzadkimi zdarzeniami niepożądanymi może być dywersyfikacja źródeł dostawy wody.

## 2. Dywersyfikacja zaopatrzenia w wodę na przykładzie starożytnej Petry

Starożytna Petra leżała na skrzyżowaniu dwóch szlaków handlowych łączących Morze Czarne z Damaszkiem i Zatokę Perską z Gazą. Dzisiaj miasto leży na terytorium Jordanii i jest wpisane na Listę Światowego Dziedzictwa UNESCO. Petrę stworzyli Nabatejczycy jako miasto „wykute w różowej skale” w IV wieku p.n.e. W czasie rozkwitu miasto liczyło 30 tys. mieszkańców, a roczna suma opadów na tym terenie wynosi 150 mm. Miasto Petra zajmowało obszar około 60 kilometrów kwadratowych. Lokalizacja Petry w półpustynnej kotlinie była powodem budowy zaawansowanego systemu zbiorników i zapór, które pozwalały na magazynowanie i rozprowadzanie wody przez gliniane rury.

Projektanci miasta i jego mieszkańcy nie marnowali wody. Nabatejczycy łączyli umiejętności kamieniarskie ze znajomością praw hydrauliki, które w Europie poznawano dopiero 2000 lat później. Nieliczne źródła leżały daleko od doliny, a po obfitych opadach deszczu woda spływała Doliną Mojżesza okresową rzeką wprost do wąwozu o długości 1,5 km prowadzącego do miasta.

Aby zapobiec okresowemu zalewaniu miasta zbudowano tamę, która przekierowywała wodę obok wąwozu poprzez system tuneli, skąd dopiero doprowadzano część wody z powrotem do miasta. Gromadzone nadmiary wody z okresu zimowego i gwałtownych, krótkotrwałych opadów pozwalały przetrwać nawet długie okresy letniej suszy. Okoliczne całoroczne niewielkie ciekły wodne pozwalały jedynie na życie niewielkiej osady.

Znaczny przyrost mieszkańców spowodował konieczność rozbudowy systemu dostawy wody w oparciu o zbiorniki retencyjne, cysterny i doprowadzające do nich kanały. Wybudowano 5 tam zabezpieczających miasto przed zalaniem. W ten sposób pojedyncze tamy wytrzymały napór wody. Powstałe w ten sposób zbiorniki retencyjne stanowiły „wielowarstwowy filtr”. Głazy zatrzymywały się w górnych zbiornikach, a osady w dolnych. Pozyskiwane osady z dolnych zbiorników służyły do upraw rolniczych. Dzięki takiemu systemowi Petra stała się sztuczną oazą samowystarczalną w wodę, gdzie według dzisiejszych szacunków przypadało ok.  $50 \text{ dm}^3/\text{mieszkańca} \cdot \text{dobę}$ . Ze zbiorników woda kierowana była do cystern skąd rozprowadzana była do istniejących budowli. Cały pusty wodociąg zaopatrywany był z 8 źródeł w tym największe z nich to [16]:

- Siq –  $36 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- Wadi Shab Qais –  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- Ain Braq –  $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- Ain Dabdabah –  $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- Ain Ammon i Ain Siyagh -  $<1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ .

System zaopatrzenia w wodę składał się także z 40 zbiorników z tamami, 200 cystern i 200 km rurociągów. W centrum miasta znajdował się basen o wymiarach  $45 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ , a wokół niego - rajski ogród. Nabadejczycy wykorzystywali także wody podziemne. Niektóre zbiorniki robili tak głęboko by znalazły się w warstwie wodonośnej i działały podobnie do studni.

Wejście do miasta miało postać wąskiej, ale wysokiej szczeliny skalnej. Po obu stronach wejścia do miasta znajdowały się kanały wykute w skale. Kanał lewy był otwarty i wodą spływającą ze ścian zasilal małe zbiorniki przeznaczone dla podróżnych. Prawy kanał był zamknięty, dostarczano nim wodę z górskiego źródła Mojżesza położonego 7 km od Petry. Rurociąg składał się z kilkudziesięciu tysięcy kamiennych kawałków o długości około  $30\div 100 \text{ cm}$ , grubości  $1\div 6 \text{ cm}$ , ułożonych ze spadkiem 4 stopni. Rury łączono poprzez kielichy i bosc końce.

W ramach ochrony przeciwpowodziowej miejskiego skarbcza wykonano system pięciu tam i zbiorników retencyjnych. Badacze uważają, że żadna budowa hydrotechniczna nie była pomyślana jak samodzielna. Wszystkie elementy systemu tworzyły całość, mającą na celu gromadzenie osadów na cele rolnicze, zaopatrzenie w wodę i ochronę przeciwpowodziową.

### 3. Krótka charakterystyka teorii Czarnego Łabędzia

Ornitologowie przed odkryciem Australii uważali, że przez setki lat wszystkie łabędzie są białe. W Australii odkryto łabędzie o czarnym upierzeniu. Historię tę wykorzystał wykładowca inżynieria ryzyka w Polytechnic Institute Uniwersytetu Nowojorskiego Nassim Nicholas Taleb [36], jako metaforę do skrajnych nieprzewidywalnych zdarzeń odgrywających nieproporcjonalnie dużą rolę w wielu dziedzinach życia. Wystąpienie wyjątku jakim jest czarny łabędź posłużyło do określenia wyjątkowych zdarzeń jakim jest Czarny Łabędź (ang. Black Swan), których skutki są nieprzewidywalne i niosą negatywne skutki. Teoria Czarnego Łabędzia opiera się o trzy fundamentalne cechy przypisane tego typu zdarzeniom:

- są nietypowe, wykraczają poza domenę zwykłych oczekiwań, ponieważ żadne zdarzenie z przeszłości nie wskazuje wprost na możliwość jego zaistnienia,
- wywierają drastyczne konsekwencje na otaczającą rzeczywistość (w odróżnieniu od ptaka czarnym upierzeniu),
- pomimo braku typowości tych zdarzeń, szukamy po fakcie ich uzasadnienia, tak by stały się wytłumaczalne i przewidywalne.

Triada Czarnego Łabędzia: rzadkość występowania, drastyczny wpływ i retrospektywna, a nie prospektywna przewidywalność, odnosi się do zdarzeń odpowiadających dynamice poważnych awarii i katastrof.

W myśl teorii Czarnego Łabędzia to, czego nie wiemy staje się znacznie ważniejsze od tego, co wiemy. Ponieważ Czarne Łabędzie są nieprzewidywalne, to jednak należy pamiętać, że istnieją. Profilaktyka jest ważniejsza od leczenia, ale mało kto nagrodzony został na kartach podręczników za profilaktykę, gdzie gloryfikowani są ci, którym udało się coś nawet tylko w pewnym stopniu uleczyć. Istnieją dwa podejścia badawcze do otaczających nas zjawisk. Pierwsze podejście preferuje badanie tego co „normalne”. Drugie podejście zakłada, że najpierw należy przyjrzeć się zjawiskom skrajnym, takim jak Czarne Łabędzie, co prowadzi do lepszego zrozumienia zjawisk „normalnych”.

Jawi się pytanie retoryczne - czy można zrozumieć zdrowie nie uwzględniając różnych chorób, epidemii i tym podobnych.

W technice, gdzie dominuje rozkład normalny poruszamy się co najwyżej w przedziale  $\pm 3\sigma$ . Zdarzenia typu Czarny Łabędź występują na większych odchyleniach i są pomijalne. Poruszając się tylko w pobliżu wartości średniej uzyskujemy złudną pewność, że poskromiliśmy niepewność. Teorię Czarnego Łabędzia profesora N.N. Taleba można adaptować w zakresie niepewności, nieprzewidywalności i ryzyka zdarzeń niepożądanych związanych z funkcjonowaniem systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Dodatkowo należy być świadomym, że zdarzenia typu Czarny Łabędź występujące poza systemem zbiorowego zaopatrzenia w wodę mogą powodować ich dysfunkcję. Typowym przykładem są „blackouty” energetyczne [28], powodują one przykładowo zaprzestania pracy pompowni, hydroforni, zakładów uzdatniania wody.

Dyweryfikacje zasobów wody można uznać za działania profilaktyczne mające na celu zmniejszenie skutków oddziaływania zdarzeń typu Czarny Łabędź.

## 4. Wybrane wskaźniki dywersyfikacji

### 4.1 Wskaźnik Shannon'a-Weaver'a

Claude Elwood Shannon urodził się w Michigan. W University of Michigan uzyskał dyplomy w dziedzinie matematyki i inżynierii elektrycznej. Doktorat obronił w Massachusetts Institute of Technology w roku 1940; od roku 1958 był tam profesorem. W latach 1936-1940 pracował w Massachusetts Institute of Technology, gdzie współpracował przy budowie mechanicznego analizatora dyferencjałów opracowanego przez Vannevera Busha. W latach 1941-1972 pracował również w słynnych Laboratoriach Bella. Na emeryturę przeszedł w roku 1978.

Stworzył modele procesu komunikacyjnego wykorzystywane później przez psychologów. Jego najsłynniejsze dzieło to „Matematyczna teoria komunikacji” [31] opublikowana w 1948 roku, która położyła podwaliny pod teorię informacji i kodowania. Braki wspomnianej teorii, czyli niemożliwość wytłumaczenia wartości (cenneści) informacji próbowali później uzupełnić inni autorzy.

Shannon zafascynowany był maszynami liczącymi i urządzeniami, określanymi obecnie mianem gadżetów – zaprojektował np. pianino odtwarzające w kolejności losowej zaprogramowane uprzednio utwory muzyczne, czy samouczącą się „mysz” (znajdowała drogę przez labirynt, na którego końcu Shannon kładł kawałek sera). Pracował także nad sztuczną inteligencją, rozwijając koncepcje maszyn Turinga, czego efektem było m.in. stworzenie w 1956 r. komputera szachowego MANIAC 1. Zafascynowany algebrą Boole'a starał się znaleźć jej zastosowanie w programowaniu przełączników obwodów elektrycznych. W wyniku tego zafascynowania w 1938 roku opracował metodę szybkiego przetwarzania danych, które zostało wykorzystane do sterowania elektronicznymi przekaźnikami.

W roku 1948, zajmując się zagadnieniem przepustowości linii telefonicznych, Shannon opracował wiele ważnych do dziś formuł matematycznych, które stanowią podstawę nowoczesnej teorii informacji [30]. Jego twierdzenia nabrały szczególnego znaczenia praktycznego po wynalezieniu układów scalonych. Bez skrępowania można powiedzieć, że teorie tego wielkiego naukowca leżą u podstaw współczesnej ekspansji komputerów i Internetu.

„Rewolucja cyfrowa zaczęła się od niego” powiedział na wieść o śmierci wielkiego uczonego słynny amerykański informatyk Neil Sloane, wydawca i redaktor dzieł zebranych Shannon'a. „Był to jeden z największych umysłów minionego stulecia – dodał – bez niego nie istniałyby dziś najważniejsze zdobycze naszej cywilizacji”.

Shannon Claude Shannon znany był z tego, że uprawianie nauki było dla niego nie tylko poważnym zajęciem, ale również radością i zabawą. Dla czystej zabawy na przykład skonstruował maszynę o nazwie THROBAC-I, która liczyła, wykorzystując rzymski zapis liczb.

Shannon opracował zasady wyspecjalizowanego komputera do gry w szachy na blisko pół wieku przed głośnym meczem Garriego Kasparowa z komputerem Deep Blue.

Warren Weaver urodził się w 1894 roku. Studia na kierunku inżynieria lądowa ukończył na University of Wisconsin-Madison, gdzie następnie w 1921 roku otrzymał stopień doktora nauk technicznych. Podczas I Wojny Światowej służył jako sierżant w siłach powietrznych Stanów Zjednoczonych. Weaver był w latach 1932-1955 dyrektorem departamentu nauk przyrodniczych w Fundacji Rochefellera, gdzie zajmował się inżynierią molekularną. Prowadził także badania związane z problemami komunikacji w nauce i teorią matematyki w statystyce. Podczas II Wojny Światowej współpracował z wojskiem w kwestiach kryptograficznych. Weaver był zafascynowany pracami Shannon'a dotyczącymi kryptografii i teorii informacji opracowanych podczas wojny. Wspólnie z C. Shannone'em stworzyli pracę [31], w której omówili teorię matematyczną w komunikacji. Shannon skupił się w niej bardziej na aspektach inżynierskich modelu matematycznego, podczas gdy Weaver podchodził do sprawy w sposób bardziej filozoficzny.

Z wspólnych prac Shannon'a i Weaver'a zaczerpnięto wskaźnik dywersyfikacji:

$$d_{SW} = -\sum_{i=1}^n (u_i) \cdot (\ln(u_i)) \quad (1)$$

gdzie:

$u_i$  – udział  $i$ -tego elementu w całości,

$n$  – liczba elementów.

## 4.2 Wskaźnik Pielou

Evelyn Chrystalla Pielou urodziła się w 1924 i była z wykształcenia ekologiem. Rozpoczęła karierę jako badacz dla Kanadyjskiego Departamentu Leśnictwa (1963-64) i Kanadyjskiego Departamentu Rolnictwa (1964-67). Później była profesorem biologii Uniwersytetu Queen jest, Kingston, Ontario (1968-71) i na Uniwersytecie Dalhousie w Halifax, Nowa Szkocja (1974/81), a następnie pracowała na stanowisku profesora na Uniwersytecie w Lethbridge. E. Pielou była drugą kobietą, która zdobyła nagrodę wybitnego ekologa (1986 r.) przyznawanego przez Ecological Society of America. Przyczyniła się znacząco do rozwoju ekologii matematycznej, matematycznego modelowania systemów naturalnych. Jest autorką sześciu książek naukowych na ten temat [18-23].

Z jej prac dotyczących oceny stopnia bioróżnorodności biocenoz zaadoptowano miarę określenia stopnia dywersyfikacji dostaw wody do miasta, który wyznacza się ze wzoru:

$$d_p = \frac{d_{SW}}{d_{SWmax}} \quad (2)$$

przy czym  $d_{SW}$  to wskaźnik Shannon'a-Weaver'a, obliczany zgodnie z wzorem (1) a wartość  $d_{SWmax}$  wyliczana jest jako:

$$d_{SQmax} = \ln(n) \quad (3)$$

### 4.3 Wskaźnik Simpsona

Edward Hugh Simpson urodził w 1922 roku, był absolwentem Uniwersytecie w Cambridge. Edward Simpson pracował jako kryptoanalityk w Bletchley Park (1942-1945) – brytyjskiej centrali łamania kodów podczas II Wojny Światowej. Jeden z jego pierwszych artykułów naukowych dotyczył tabel krzyżowych [32], o publikację którego poprosił Maurice Bartlett, jego opiekun naukowy na Uniwersytecie w Cambridge, gdyż chciał się w swoich publikacjach w oficjalny sposób powołać na wyniki badań swojego podopiecznego.

Simpson pracował także w brytyjskim Ministerstwie Edukacji (1947), a następnie w Skarbu Commonwealth Education Liaison Unit.

Opracowana przez niego formuła określania dywersyfikacji ma postać:

$$d_s = \sum_{i=1}^m u_i^2 \quad (4)$$

### 4.4 Wskaźnik Hurlberta

Stuart H. Hurlbert w 1961 roku ukończył studia z zakresu biologii na Amherst College w stanie Massachusetts. Siedem lat później otrzymał stopień doktora w zakresie zoologii na Cornell University w stanie Nowy York. Od 1978 pracuje na stanowisku profesora na Uniwersytecie Stanowym w San Diego oraz pełni dyrektora Center for Inland Waters na tej samej uczelni. Jego zainteresowania naukowe to m.in. limnologia słonych jezior, ich skład chemiczny wody, procesy fizyczne tam zachodzące, bezkręgowce, ryby i ptaki wodne:

jeziorny plankton, biostatystyka [8], ekologia matematyczna [38].

Wskaźnik Hurlberta, pierwotnie służył do określania dywersyfikacji różnych gatunków zwierząt. Wyznacza się go ze wzoru [7]:

$$d_H = \frac{n}{n+1} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n u_i^2\right) \quad (5)$$

Analizując wzór (5) można stwierdzić, że dla jednego ujęcia wskaźnik  $d_H$  jest nieokreślone, dla dwóch niezależnych ujęć o równych wydajnościach  $d_H = 0,333$ .



## 5. Dwuparametryczna ocena dywersyfikacji w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę z wykorzystaniem wskaźnika Shannon'a-Weaver'a

Wskaźnik dywersyfikacji wyliczono zgodnie z wzorem (1). Z wspólnych prac Shannon'a i Weaver'a zaczerpnięto wskaźnik dywersyfikacji, który zaadoptowano do oceny zróżnicowania ujęć wody w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę:

$$d_{sw}(Q) = -\sum_{j=1}^m (u_j) \cdot (\ln(u_j)) \quad (6)$$

gdzie:

$d_{sw}(Q)$  – wskaźnik dywersyfikacji ujęć wody,

$u_j$  – udział wydajności j-tego podsystemu dostawy wody w całkowitej dostawie wody do systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę.

$m$  – liczba podsystemów dostawy wody.

Analogicznie z (6) wyznaczono wskaźnik dywersyfikacji objętości wody w sieciowych zbiornikach wodociągowych:

$$d_{sw}(V) = -\sum_{k=1}^o (u_k) \cdot (\ln(u_k)) \quad (7)$$

gdzie:

$d_{sw}(V)$  – wskaźnik dywersyfikacji objętości wody w sieciowych zbiornikach wodociągowych,

$u_k$  – udział objętości k-tego zbiornika w całkowitej objętości sieciowych zbiorników wodociągowych.

$o$  – liczba sieciowych zbiorników wodociągowych.

W tab. 1 zestawiono wartości liczbowe wskaźnika dla dwóch ujęć wody ( $m = 2$ ).

Tabela 1. Wartości wskaźników dla dwóch niezależnych źródeł i przy różnych udziałach  
Table 1. The indicator values for two independent sources with different shares

m = 2	$u_1 = 0,5$	$u_1 = 0,6$	$u_1 = 0,7$	$u_1 = 0,8$	$u_1 = 0,9$	$u_1 = 0,95$
	$u_2 = 0,5$	$u_2 = 0,4$	$u_2 = 0,3$	$u_2 = 0,2$	$u_2 = 0,1$	$u_2 = 0,05$
$d_{sw}$	0,693	0,673	0,611	0,500	0,325	0,198

Z danych zawartych w tab. 1 wynika, że wskaźniki kształtują się najkorzystniej w przypadku, gdy struktura dostawy wody jest zrównoważona (udziały z dwóch źródeł wynoszą po 50%)

W tab. 2 zestawiono wartości liczbowe wskaźników  $d_{sw}$  dla zrównoważonych udziałów.

Tabela 2. Zestawienie wskaźników dla zrównoważonych udziałów  
Table 2. The indicator values for balanced shares

<b>m</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
$u_i$	0,50	0,33	0,25	0,20	0,1	0,05
$d_{sw}$	0,693	1,097	1,386	1,609	2,303	2,996

W pełni zrównoważone wskaźniki mogą służyć do obiektywnego porównywania stopnia dywersyfikacji w ujęciach wód podziemnych, gdzie każdą ze studni można traktować jako źródło wody.

W tab. 3, 4 i 5 zaprezentowano przykładowe wartości wskaźników dla różnej liczby niezależnych ujęć wody/zbiorników wodociągowych i różnych udziałów dostawy wody/objętości zbiorników.

Tabela 3. Wartości wskaźników dla  $m, o = 3$  niezależnych źródeł dostawy wody lub sieciowych zbiorników wodociągowych

Table 3. The indicator values for the  $m, o = 3$  independent water intakes or water tanks

<b>m, o = 3</b>	<b><math>u_1 = 0,33</math></b>	<b><math>u_1 = 0,4</math></b>	<b><math>u_1 = 0,5</math></b>	<b><math>u_1 = 0,6</math></b>	<b><math>u_1 = 0,6</math></b>	<b><math>u_1 = 0,7</math></b>	<b><math>u_1 = 0,8</math></b>
	<b><math>u_2 = 0,33</math></b>	<b><math>u_2 = 0,3</math></b>	<b><math>u_2 = 0,3</math></b>	<b><math>u_2 = 0,3</math></b>	<b><math>u_2 = 0,2</math></b>	<b><math>u_2 = 0,2</math></b>	<b><math>u_2 = 0,1</math></b>
	<b><math>u_3 = 0,33</math></b>	<b><math>u_3 = 0,3</math></b>	<b><math>u_3 = 0,2</math></b>	<b><math>u_3 = 0,1</math></b>	<b><math>u_3 = 0,2</math></b>	<b><math>u_3 = 0,1</math></b>	<b><math>u_3 = 0,1</math></b>
$d_{sw}$	1,097	1,089	1,030	0,898	0,950	0,802	0,639

Tabela 4. Wartości wskaźników dla  $m, o = 4$  niezależnych źródeł dostawy wody lub sieciowych zbiorników wodociągowych

Table 4. The indicator values for the  $m, o = 4$  independent water intakes or water tanks

<b>m, o = 4</b>	<b><math>u_1 = 0,25</math></b>	<b><math>u_1 = 0,3</math></b>	<b><math>u_1 = 0,4</math></b>	<b><math>u_1 = 0,5</math></b>	<b><math>u_1 = 0,6</math></b>	<b><math>u_1 = 0,7</math></b>
	<b><math>u_2 = 0,25</math></b>	<b><math>u_2 = 0,3</math></b>	<b><math>u_2 = 0,3</math></b>	<b><math>u_2 = 0,3</math></b>	<b><math>u_2 = 0,2</math></b>	<b><math>u_2 = 0,1</math></b>
	<b><math>u_3 = 0,25</math></b>	<b><math>u_3 = 0,2</math></b>	<b><math>u_3 = 0,15</math></b>	<b><math>u_3 = 0,1</math></b>	<b><math>u_3 = 0,1</math></b>	<b><math>u_3 = 0,1</math></b>
	<b><math>u_4 = 0,25</math></b>	<b><math>u_4 = 0,2</math></b>	<b><math>u_4 = 0,15</math></b>	<b><math>u_4 = 0,1</math></b>	<b><math>u_4 = 0,1</math></b>	<b><math>u_4 = 0,1</math></b>
$d_{sw}$	1,386	1,366	1,297	1,168	1,089	0,940

Tabela 5. Wartości wskaźników dla  $m, o = 5$  niezależnych źródeł dostawy wody lub sieciowych zbiorników wodociągowych

Table 5. The indicator values for the  $m, o = 5$  independent water intakes or water tanks

m, o = 5	$u_1 = 0,2$	$u_1 = 0,3$	$u_1 = 0,4$	$u_1 = 0,5$	$u_1 = 0,6$
	$u_2 = 0,2$	$u_2 = 0,3$	$u_2 = 0,3$	$u_2 = 0,2$	$u_2 = 0,1$
	$u_3 = 0,2$	$u_3 = 0,2$	$u_3 = 0,1$	$u_3 = 0,1$	$u_3 = 0,1$
	$u_4 = 0,2$	$u_4 = 0,1$	$u_4 = 0,1$	$u_4 = 0,1$	$u_4 = 0,1$
	$u_5 = 0,2$	$u_5 = 0,1$	$u_5 = 0,1$	$u_5 = 0,1$	$u_5 = 0,1$
$d_{sw}$	1,609	1,505	1,418	1,359	1,227

Analiza wskaźników wskazuje, że stopień dywersyfikacji dla ujęć wody w miarę zrównoważonych (podobne udziały) zależy od ich liczby. W przypadku dużych różnic w udziałach poszczególnych ujęć wody zasada ta nie obowiązuje. Stopień dywersyfikacji o mniejszej liczbie niezależnych ujęć wody, ale zrównoważonych może być większy od większej liczby ujęć wody, ale przy bardzo zróżnicowanych udziałach. Dla przykładu:

$m, o = 4:$	$u_1 = 0,7$	$u_2 = 0,1$	$u_3 = 0,1$	$u_4 = 0,1;$	$d_S = 0,940,$	
$m, o = 3:$	$u_1 = 0,5$	$u_2 = 0,3$	$u_3 = 0,2;$		$d_S = 1,030,$	
co daje $1,030 > 0,940$ . Podobnie:						
$m, o = 5:$	$u_1 = 0,6$	$u_2 = 0,1$	$u_3 = 0,1$	$u_4 = 0,1;$	$u_5 = 0,1;$	$d_S = 1,227$
$m, o = 4:$	$u_1 = 0,4$	$u_2 = 0,3$	$u_3 = 0,15$	$u_4 = 0,15;$		$d_S = 1,297$
a także:						
$m, o = 3$	$u_1 = 0,8$	$u_2 = 0,1$	$u_3 = 0,1;$			$d_S = 0,639$
$m, o = 2$	$u_1 = 0,6$	$u_2 = 0,4$				$d_S = 0,673$

Dwuparametryczną ocenę dywersyfikacji zasobów wody przeprowadzono według modelu addytywnego:

$$d = d_{sw}(Q) + d_{sw}(V) \quad (8)$$

gdzie:

$d$  – dwuparametryczny wskaźnik dywersyfikacji zasobów wody.

Przyjęto następującą skalę porównawczą dla wskaźnika  $d$ :

- brak dywersyfikacji  $d < 0,5$
- niska dywersyfikacja  $0,5 < d \leq 1,0$
- średnia dywersyfikacja  $1,0 < d \leq 1,7$
- wystarczająca dywersyfikacja  $1,7 < d \leq 2,3$
- b. zadowalająca dywersyfikacja  $d > 2,3$

W obliczeniach przyjęto, że w przypadku  $u_j = 1,0$  lub  $u_k = 1,0$ , wartość wskaźnika  $d_{sw}(Q)$  lub  $d_{sw}(V)$  brana do obliczenia wskaźnika  $d$  z wzoru (7) wynosi 0,0.

## 6. Przykłady oceny dywersyfikacji zasobów wody

Dla wybranych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę na terenie Polski zaprezentowano metodykę wyznaczenia dwuparametrycznego wskaźnika Shannon'a-Weaver'a. Poszczególne udziały wyznaczono w oparciu o dobowe zdolności produkcyjne ujęć wody i objętości sieciowych zbiorników wodociągowych.

- Białystok

- Q - dwa ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,46$$

$$u_2 = 0,54$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,46 \times \ln(0,46) + 0,54 \times \ln(0,54)) = 0,69$$

- V- brak zbiorników,

$$d_{sw}(V) = 0$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,69$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Białystok stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie niskim.

- Brzesko

- Q - dwa ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,95$$

$$u_2 = 0,05$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,95 \times \ln(0,95) + 0,05 \times \ln(0,05)) = 0,199$$

- V- dwa zbiorniki, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = 0,091$$

$$u_2 = 0,909$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(0,091 \times \ln(0,091) + 0,909 \times \ln(0,909)) = 0,305$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,199 + 0,305 = 0,504$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Brzesko stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie niskim.

- Bydgoszcz

- Q - dwa ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,704$$

$$u_2 = 0,296$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,704 \times \ln(0,704) + 0,296 \times \ln(0,296)) = 0,607$$

- V- brak zbiorników,

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,607$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Rzeszowa stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie niskim.

- Częstochowa

- Q - trzy ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,32$$

$$u_2 = 0,62$$

$$u_3 = 0,06$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,32 \times \ln(0,32) + 0,62 \times \ln(0,62) + 0,06 \times \ln(0,06)) = 0,83$$

- V- jedenaście zbiorników sieciowych, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = u_2 = 0,017$$

$$u_3 = 0,07$$

$$u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = 0,086$$

$$u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = 0,138$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(2 \times 0,017 \times \ln(0,017) + 0,07 \times \ln(0,07) + 4 \times 0,086 \times \ln(0,086) + 4 \times 0,138 \times \ln(0,138)) = 2,263$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,83 + 2,263 = 3,093$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Częstochowa stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie bardzo zadawalającym.

- Gorzów Wlkp.

- Q - trzy ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,230$$

$$u_2 = 0,177$$

$$u_3 = 0,593$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,230 \times \ln(0,230) + 0,177 \times \ln(0,177) + 0,593 \times \ln(0,593)) = 0,954$$

- V- trzy zbiorniki sieciowe, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = 0,667$$

$$u_2 = 0,222$$

$$u_3 = 0,111$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(0,667 \times \ln(0,667) + 0,222 \times \ln(0,222) + 0,111 \times \ln(0,111)) = 0,849$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,954 + 0,849 = 1,803$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Gorzów Wlkp. stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie wystarczającym.

- Jasło

- Q - dwa ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,98$$

$$u_2 = 0,02$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,98 \times \ln(0,98) + 0,02 \times \ln(0,02)) = 0,098$$

- V - dwa zbiorniki sieciowe, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = 0,26$$

$$u_2 = 0,74$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = (0,26 \times \ln(0,26) + 0,74 \times \ln(0,74)) = 0,573$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,098 + 0,573 = 0,671$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Jasło stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie niskim.

- Kraków

- Q - cztery ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,63$$

$$u_2 = 0,11$$

$$u_3 = 0,18$$

$$u_4 = 0,08$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,63 \times \ln(0,63) + 0,11 \times \ln(0,11) + 0,18 \times \ln(0,18) + 0,08 \times \ln(0,08)) = 1,045$$

- V - dziesięć zbiorników sieciowych, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = 0,656$$

$$u_2 = 0,074$$

$$u_3 = 0,091$$

$$u_4 = 0,004$$

$$u_5 = 0,035$$

$$u_6 = 0,021$$

$$u_7 = 0,053$$

$$u_8 = 0,015$$

$$u_9 = 0,022$$

$$u_{10} = 0,029$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(0,656 \times \ln(0,656) + 0,074 \times \ln(0,074) + 0,091 \times \ln(0,091) + 0,004 \times \ln(0,004) + 0,035 \times \ln(0,035) + 0,021 \times \ln(0,021) + 0,053 \times \ln(0,053) + 0,015 \times \ln(0,015) + 0,022 \times \ln(0,022) + 0,029 \times \ln(0,029)) = 1,313$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 1,045 + 1,313 = 2,358$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Kraków stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie bardzo zadawalającym.

- Krosno

- Q - trzy ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,6$$

$$u_2 = 0,28$$

$$u_3 = 0,12$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,6 \times \ln(0,6) + 0,28 \times \ln(0,28) + 0,12 \times \ln(0,12)) = 0,917$$

- V- dwa zbiorniki sieciowe, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = u_2 = 0,5$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(2 \times 0,5 \times \ln(0,5)) = 0,693$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,917 + 0,693 = 1,61$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Krosno stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie średnim.

- Poznań

- Q - trzy ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,53$$

$$u_2 = 0,29$$

$$u_3 = 0,18$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,53 \times \ln(0,53) + 0,29 \times \ln(0,29) + 0,18 \times \ln(0,18)) = 1,004$$

- V- dwa zbiorniki sieciowe, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = 0,666$$

$$u_2 = 0,333$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(0,666 \times \ln(0,666) + 0,333 \times \ln(0,333)) = 0,637$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 1,004 + 0,637 = 1,641$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Poznań stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie średnim.

- Przemysł

- Q - jedno ujęcie wody

$$u_1 = 1,0$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = 0$$

- V- dziewięć zbiorników sieciowych, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = u_2 = u_3 = 0,056$$

$$u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = 0,093$$

$$u_8 = u_9 = 0,23$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(3 \times 0,056 \times \ln(0,056) + 4 \times 0,093 \times \ln(0,093) + 2 \times 0,23 \times \ln(0,23)) = 2,044$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 2,044$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Przemysł stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie wystarczającym.

- Rabka-Zdrój

- Q - dwa ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,28$$

$$u_2 = 0,72$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,28 \times \ln(0,28) + 0,72 \times \ln(0,72)) = 0,593$$

- V- trzy zbiorniki, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = 0,2$$

$$u_2 = u_3 = 0,4$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(0,2 \times \ln(0,2) + 0,4 \times \ln(0,4)) = 1,055$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,593 + 1,055 = 1,648$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Rabka-Zdrój stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie średnim.



- Racibórz

- Q - dwa ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,75$$

$$u_2 = 0,25$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,75 \times \ln(0,75) + 0,25 \times \ln(0,25)) = 0,562$$

- V - trzy zbiorniki sieciowe, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = u_2 = u_3 = 0,333$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(3 \times 0,333 \times \ln(0,333)) = 1,099$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,562 + 1,099 = 1,661$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Racibórz stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie średnim.

- Rzeszów

- Q - dwa ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,43$$

$$u_2 = 0,57$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,43 \times \ln(0,43) + 0,57 \times \ln(0,57)) = 0,683$$

- V - osiem zbiorników sieciowych, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = 0,018$$

$$u_2 = u_3 = 0,054$$

$$u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = 0,088$$

$$u_8 = 0,522$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(0,018 \times \ln(0,018) + 2 \times 0,054 \times \ln(0,054) + 4 \times 0,088 \times \ln(0,088) + 0,522 \times \ln(0,522)) = 1,579$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,683 + 1,579 = 2,262$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Rzeszowa stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie wystarczającym.

- Szczecin

- Q - trzy ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,873$$

$$u_2 = 0,120$$

$$u_3 = 0,007$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,873 \times \ln(0,873) + 0,120 \times \ln(0,120) + 0,007 \times \ln(0,007)) = 0,407$$

- V - osiem zbiorników sieciowych, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = 0,2$$

$$u_5 = u_6 = 0,06$$

$$u_7 = u_8 = 0,04$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(4 \times 0,2 \times \ln(0,2) + 2 \times 0,06 \times \ln(0,06) + 2 \times 0,04 \times \ln(0,04)) = 1,883$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,407 + 1,883 = 2,29$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Szczecin stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie wystarczającym.

- Tarnów

- Q - trzy ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = 0,74$$

$$u_2 = 0,16$$

$$u_3 = 0,1$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(0,74 \times \ln(0,74) + 0,16 \times \ln(0,16) + 0,1 \times \ln(0,1)) = 0,746$$

- V - czternaście zbiorników sieciowych, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = 0,088$$

$$u_2 = u_3 = u_4 = 0,0704$$

$$u_5 = 0,1056$$

$$u_6 = 0,0072$$

$$u_7 = u_8 = 0,2817$$

$$u_9 = u_{10} = 0,0053$$

$$u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = 0,0035$$

Na podstawie wzoru (7):

$$d_{sw}(V) = -(0,088 \times \ln(0,088) + 3 \times 0,0704 \times \ln(0,0704) + 0,1056 \times \ln(0,1056) + 0,0072 \times \ln(0,0072) + 2 \times 0,2817 \times \ln(0,2817) + 2 \times 0,0053 \times \ln(0,0053) + 4 \times 0,0035 \times \ln(0,0035)) = 1,896$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,746 + 1,896 = 2,642$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Tarnów stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie bardzo zadawalającym.

- Wrocław

- Q - dwa ujęcia wody, dla których udziały w łącznej wydajności wynoszą:

$$u_1 = u_2 = 0,5$$

Na podstawie wzoru (6):

$$d_{sw}(Q) = -(2 \times 0,5 \times \ln(0,5)) = 0,693$$

- V- dwa zbiorniki sieciowych, dla których udziały w łącznej objętości wynoszą:

$$u_1 = u_2 = 0,5$$

Na podstawie wzoru (7):

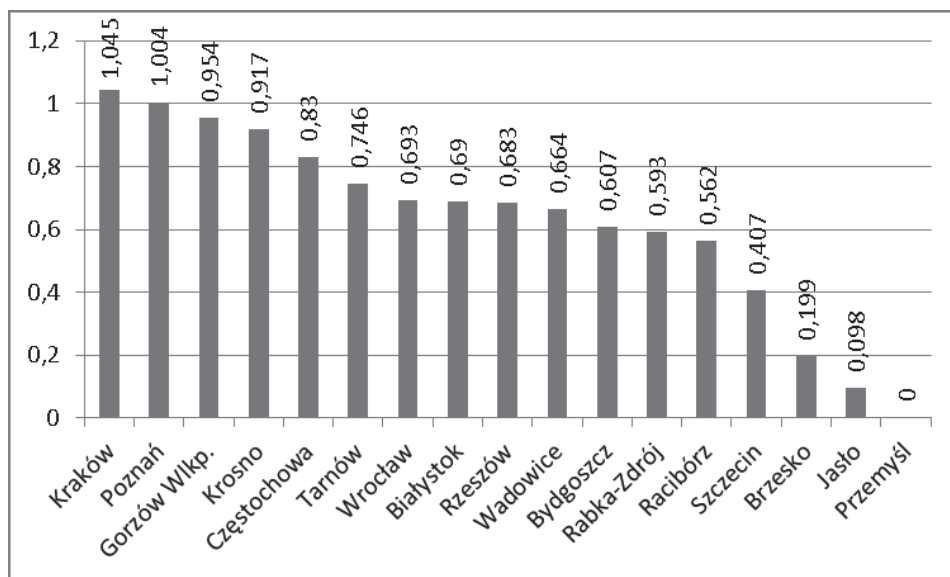
$$d_{sw}(V) = -(2 \times 0,5 \times \ln(0,5)) = 0,693$$

Na podstawie wzoru (8):

$$d = 0,693 + 0,693 = 1,386$$

Na podstawie przyjętej skali dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Wrocław stwierdzono dywersyfikację zasobów wody na poziomie średnim.

Na rys. 1. przedstawiono wykres słupkowy wskaźnika dywersyfikacji wydajności ujęć wody  $d_{sw}(Q)$  ujęć wody dla analizowanych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę.



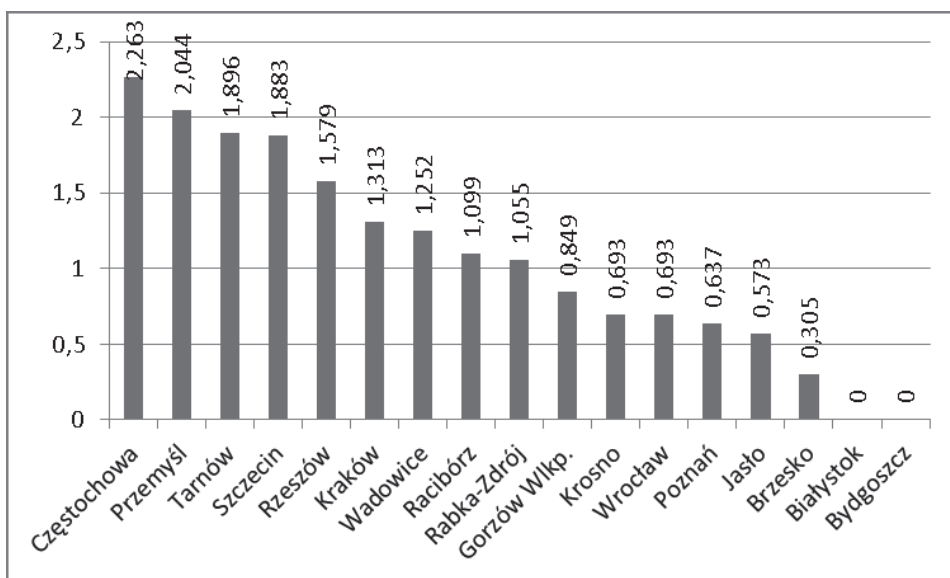
Rys 1. Wykres słupkowy wskaźnika dywersyfikacji wydajności ujęć wody dla analizowanych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Fig 1. The bar graph of water intakes productivity diversification indicator for analyzed collective water supply systems

Na podstawie rys. 1 stwierdzono, że wskaźnik dywersyfikacji wydajności ujęć wody dla analizowanych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę:

- osiąga najwyższe wartości dla systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę Krakowa i wynika z najwyższej liczby ujęć ( $m=4$ ) spośród badanych systemów wodociągowych,
- wartości wskaźnika dla Poznania, Gorzowa Wielkopolskiego, Krosna, Częstochowy, Tarnowa są wyższe niż pozostałe ze względu na wyższą liczbę ujęć wody ( $m=3$ ),
- wartości wskaźnika dla Brzeska i Jasła osiągają niskie wartości ze względu na duże zróżnicowanie wydajności ujęć wody,
- wartość  $DSW-(Q)$  dla Przemysła wynosi zero ze względu na brak dywersyfikacji ujęć wody ( $m=1$ ).

Na rys. 2. przedstawiono wykres słupkowy wskaźnika dywersyfikacji objętości  $d_{sw}(V)$  sieciowych zbiorników wodociągowych dla analizowanych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę.



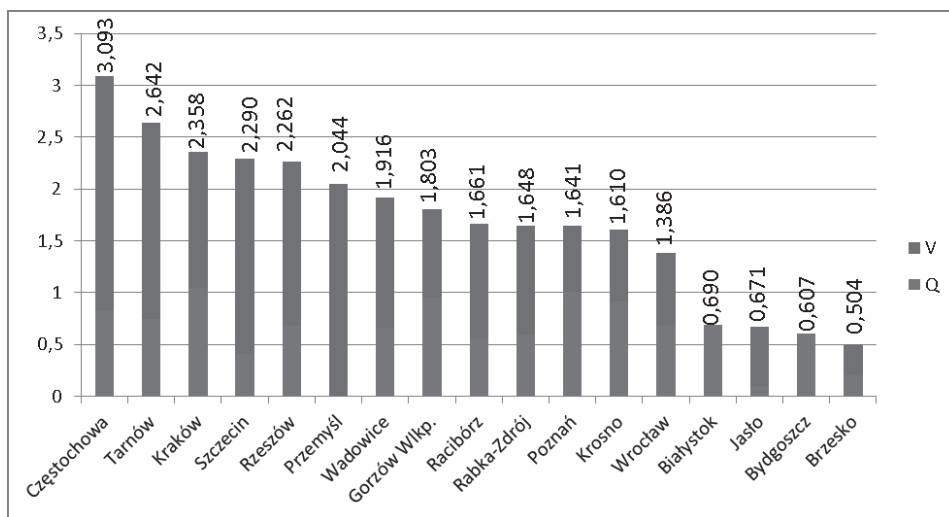
Rys 2. Wykres słupkowy wskaźnika dywersyfikacji objętości sieciowych zbiorników wodociągowych dla analizowanych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Fig 2. The bar graph of network water tanks volume diversification indicator for analyzed collective water supply systems

Na podstawie rys. 2 stwierdzono, że wskaźnik dywersyfikacji objętości sieciowych zbiorników wodociągowych dla analizowanych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę:

- osiąga najwyższe wartości dla Częstochowa i wynika z najwyższej liczby zbiorników ( $\sigma=11$ )
- wartości wskaźnika dla Tarnowa jest niższa niż dla Częstochowy mimo większej ( $\sigma=14$ ) liczby zbiorników, co świadczy o bardziej równomiernym rozkładzie objętości zbiorników w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę Częstochowy,
- wartości wskaźnika dla Brzeska i Jasła osiągają niskie wartości ze względu na duże zróżnicowanie objętości sieciowych zbiorników wodociągowych przy równocześnie niskiej ich liczbie ( $\sigma=2$ ),
- wartość  $D_{sw}(V)$  dla Białegostoku i Bydgoszczy wynosi zero ze względu na brak dywersyfikacji objętości wody w sieciowych zbiornikach wodociągowych ( $\sigma < 2$ ).

Na rys. 3. przedstawiono wykres słupkowy wskaźnika dywersyfikacji d zasobów wody w analizowanych systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę,



Rys 3. Wykres słupkowy dwuparametrycznego wskaźnika dywersyfikacji zasobów wody dla analizowanych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Fig 3. The bar graph of two parametric diversification indicator of water resources for analyzed collective water supply systems

Na podstawie rys. 3 stwierdzono, że wskaźnik dywersyfikacji  $d$  zasobów wody dla analizowanych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę:

- osiąga najwyższe wartości dla Częstochowy i Tanowa, co wynika z wysokich wartości wskaźników  $d_{sw}(V)$ ,
- wysoka wartości wskaźnika dla Krakowa wynika z najwyższej spośród analizowanych miast wartości wskaźnika  $d_{sw}(Q)$ ,
- niskie wartości wskaźnika  $d$  dla Białegostoku i Bydgoszczy wynikają z braku dywersyfikacji objętości wody w sieciowych zbiornikach wodociągowych,
- niskie wartości wskaźnika  $d$  dla Jasła i Brzeska wynikają z niewielkiej dywersyfikacji objętości wody w sieciowych zbiornikach wodociągowych, a także małej dywersyfikacji wydajności ujęć wody.

## 7. Wnioski

- Na wartość wskaźnika dywersyfikacji  $d_{sw}(Q)$  ma wpływ:
  - udział wydajności ujęć wody w sumarycznej wydajności wszystkich ujęć
  - liczba ujęć,
  - równomierność rozkładu wydajności w poszczególnych ujęciach.
- Na wartość wskaźnika dywersyfikacji  $d_{sw}(V)$  ma wpływ:
  - udział objętości zbiorników w odniesieniu do całkowitej objętości wody zgromadzonej w sieciowych zbiornikach wodociągowych,
  - liczba zbiorników,
  - równomierność rozkładu objętości poszczególnych zbiorników.
- Dywersyfikacja zasobów wody jest konieczna dla bezpieczeństwa działania systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Zapewnia ciągłość dostaw wody do odbiorców w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowych lub zdarzeń typu Czarny Łabędź.
- Samodzielne ujęcie wody dla miasta lub pojedynczy zbiornik (ewentualnie jego brak) oznaczają brak dywersyfikacji zasobów wody. Dowolna kombinacja przejścia z dwóch ujęć wody lub z dwóch zbiorników na trzy lub więcej daje zwiększenie stopnia dywersyfikacji, w przypadku w miarę zrównoważonych ich udziałów. W przypadkach bardzo znacznego zróżnicowania udziałów zwiększenie liczby ujęć wody lub zbiorników nie zawsze prowadzi do zwiększenia stopnia dywersyfikacji.
- Dwuparametryczna ocena dywersyfikacji uwzględnia cechy systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę, które w sposób bezpośredni wpływają na bezpieczeństwo dostawy wody do odbiorców. Niski stopień dywersyfikacji jest informacją dla eksploatorów systemów wodociągowych, że należy rozważyć modernizację lub rozbudowę systemu. Dotychczasowy brak zdarzeń typu Czarny Łabędź, a co za tym idzie pozorne bezpieczeństwo nie powinny uspić czujności zarządców systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę, którzy powinni dążyć do ekonomicznie uzasadnionej wysokiej dywersyfikacji zasobów wody.
- Bezwymiarowe wartości wskaźnika Shannon'a-Weaver'a predysponują go do analizy i oceny stopnia dywersyfikacji zasobów wody różnych systemów zbiorowego zaopatrzenia wodę. Dzięki temu możliwa jest porównanie miast i aglomeracji miejskich o nawet bardzo różnym zapotrzebowaniu na wodę.

## Bibliografia

- 1) Bajer J., Ocena niezawodności pompowni wodociągowych o różnych strukturach technicznych. Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. Kraków: 2001
- 2) Bajer J., Głód K., Lubowiecka T., *Nowa metoda obliczania wielkości pojemności rezerwowej zbiorników – aplikacja dla zaopatrzenia w wodę miasta Skawina*, XVII Krajowa Konferencja V Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS O/Wielkopolski, Poznań, 2002, 471-480
- 3) Boryczko K., Rak J., Rozważania na temat podwyższania niezawodności systemu o podstawowych strukturach niezawodnościowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2010, 57 (1), 17-29
- 4) Byłka H., Wybór układów pompowych w systemach wodociągowych, *Przegląd Komunalny*, 1998, 2, 58-62
- 5) Diegtiareva T. Elektorowicz M., Water quality change due to dredging of heavy metals contaminated sediments in the Old Harbor of Montreal, *Water Quality Research Journal of Canada*, 2001, 36 (1), 1-19
- 6) Głód K., Wieczysty A., *Badania niezawodności wodociągowych zbiorników zapasowo-wyrównawczych*, XVI Krajowa Konferencja IV Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS O/Wielkopolski, Poznań, 2000, 661-669
- 7) Hurlbert S. H., The Non-concept of Species Diversity: a critique and alternative parameters, *Ecology*, 1971, 4 (52), 577-586
- 8) Hurlbert S. H., Immigration control and biodiversity in North America, *The Social Contract*, 2011, 20 (3), 21-22
- 9) Knapik K., Płoskonka R., *Metoda oceny funkcjonowania systemów zaopatrzenia w wodę przy uwzględnieniu dywersyfikacji zbiornikowych rezerw wody*, XX Jubileuszowa Krajowa Konferencja, VIII Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS O/Wielkopolski, Poznań - Zakopane, 2008, t. II, 493-516
- 10) Knapik K., Płoskonka R., *Wpływ rozmieszczenia zbiornikowych rezerw awaryjnych na niezawodność systemu dystrybucji wody*, XVIII Krajowa Konferencja VI Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS O/Wielkopolski, Poznań, 2004, 569-580
- 11) Kulbik M., *Wpływ warunków hydraulicznych w sieci wodociągowej na wtórne zanieczyszczenie wody*, XXI Krajowa Konferencja IX Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS O/Wielkopolski, Poznań, 2010, t. II, 35-51
- 12) Kuś K., Witek E., *Badania granicznych wskaźników eksploatacji sieci wodociągowych. Zaopatrzenie w wodę miast i wsi*, pod red. Marka Sozańskiego, Editor. 1998, PZITS O/Wielkopolski, Poznań. p. 399-405.
- 13) Kwietniewski M. Rak J., *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. Warszawa: Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, 2010
- 14) Kwietniewski M., Roman M., Kłós-Trębaczkiwicz H., *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. Warszawa: Arkady, 1993

- 15) Lomotowski J., Siwoń Z., Metodyka badań eksploatacyjnych przewodów sieci wodociągowych. Lublin: Wydawnictwo LIBER DUO COLOR, 2005
- 16) Ortloff Ch. R., The Water Supply and Distribution System of the Nabataean City of Petra (Jordan), 300 BC–AD 300, *Cambridge Archaeological Journal*, 2005, 15 (1), 93-109
- 17) Piegdoń I., Tchórzewska-Cieślak B., Zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwach wodociągowych z wykorzystaniem nowoczesnych systemów informatycznych, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2013, 10, 401-404
- 18) Pielou E. C., Biogeography. New York: Wiley, 1979
- 19) Pielou E. C., Ecological diversity. New York: Wiley, 1975
- 20) Pielou E. C., The interpretation of ecological data: a primer on classification and ordination. New York: Wiley, 1984
- 21) Pielou E. C., Introduction to Mathematical Ecology. New York: Wiley-Interscience, 1969
- 22) Pielou E. C., Mathematical ecology. New York: Wiley, 1977
- 23) Pielou E. C., Population and community ecology: principles and methods. New York: Gordon and Breach, 1974
- 24) Pietrucha-Urbanik K., Assessment model application of water supply system management in crisis situations, *Global Nest Journal*, 2014, 16 (5), 893-900
- 25) Płoskonka R., Metoda optymalnej lokalizacji rezerw zbiornikowych w systemie dystrybucji wody. Kraków: Politechnika Krakowska, promotor: Knapik K., 2008
- 26) Rak J., Boryczko K., Metoda oceny zagrożenia ujęć wód podziemnych, *INSTAL*, 2013, 5, 64-66
- 27) Rak J., Hałupka K., *Optymalizacja niezawodności strukturalnej podsystemu uzdatniania wody*, XIX Krajowa Konferencja VII Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS O/Wielkopolski, Poznań - Zakopane, 2006, 739-746
- 28) Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha K., Blackout czyli wielka ciemność - źródłem zawodności dostawy wody do spożycia, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2010, 4, 20-24
- 29) Rak J., Włoch A., *Models of level diversification assessment of Water Supply Subsystems, Underground Infrastructure of Urban Areas 3*, Kolonko A. Madryas C., Nienartowicz B., Szot A., Editor. 2015, Taylor & Francis Group, London. p. 237-244.
- 30) Shannon C., A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal*, 1948, 27, 379-423, 623-656
- 31) Shannon C., Weaver W., The Mathematical Theory of Communication. Urbana: University of Illinois Press, 1962
- 32) Simpson E. H., The Interpretation of Interaction in Contingency Tables, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 1951, 13, 238-241
- 33) Siwoń Z., *Wybrane zagadnienia bieżącej eksploatacji miejskich sieci wodociągowych*, Konferencja: Nowe materiały i urządzenia w wodociągach i kanalizacji., Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce-Cedzyna, 2003, 11-24
- 34) Sozański M. Urbaniak A., Technologia uzdatniania wody ujmowanej z jezior, *Przegląd Komunalny*, 1999, 7-8, 77-80
- 35) Studziński A., Ryzyko awarii przewodów rozdzielczych wodociągu Krosna, *Czasopismo Techniczne*, 2011, 1, 191-200
- 36) Taleb N. N., Czarny Łabędź. O skutkach nieprzewidywalnych zdarzeń. Warszawa: Wydawnictwo KURHAUS, 2015



- 37) Tchórzewska-Cieślak B., Szpak D., A Proposal of a Method for Water Supply Safety Analysis and Assessment, *Ochrona Środowiska*, 2015, 37 (3), 43-47
- 38) Tiffany M. A. González M. R., Small E.B., Gebler G.F., Cole J.C., Hurlbert S. H., Ciliate plankton dynamics and survey of ciliate diversity in the Salton Sea, California, 1997-1999, *Lake and Reservoir Management* 2007, 23, 606-619
- 39) Urbanik A., Planowanie rozwoju systemów zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1990
- 40) Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. 2007 nr 89 poz. 590)

