

STOSOWALNOŚĆ WZORU EMPIRYCZNEGO STACHY NA WYZNACZANIE PRZEPŁYWU ŚREDNIEGO NISKIEGO

Kazimierz Banasik^{✉1,2}  0000-0002-7328-461X, Witold Jaworski¹  0009-0002-5408-234X, Leszek Kuchar³  0000-0002-4157-0910

¹ Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

² Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy

³ Katedra Matematyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

ABSTRAKT

Cel pracy

1. Sprawdzenie stosowalności wzoru Stachy na średni niski przepływ – SNQ w małych rzekach nizinnych monitorowanych przez krajową służbę hydrologiczną. 2. Zmodyfikowanie formuły Stachy na wyznaczanie średniego niskiego przepływu z wykorzystaniem parametrów charakteryzujących zlewnie, jak we wzorze oryginalnym.

Materiał i metody

W badaniach wykorzystano przepływy z lat 1991–2020, z 91 stacji wodowskazowych IMGW-PIB, o zlewniach do 550 km². Analizę statystyczną, w której przepływ średni niski uzależniono od parametrów charakteryzujących zlewnię, przeprowadzono oddzielnie dla dwóch obszarów: 1) północnego – obejmującego rzeki Przymorza, dolnej Wisły i Pojezierza Mazurskiego, oraz 2) środkowego i południowo-wschodniego – obejmującego rzeki dolnej Odry z Wartą i Notecią, środkowej Wisły z Narwią od Ostrołęki i z Sanem. Liczba stacji wodowskazowych w poszczególnych obszarach wyniosła odpowiednio: 43 i 48.

Wyniki i wnioski

1. Zastosowanie oryginalnego wzoru Stachy do wyznaczenia SNQ na podstawie parametrów fizjograficznych zlewni wskazuje na dopasowanie obliczonych wartości z wynikami pomiarów oceniane współczynnikiem R^2 , wynoszącym 68,5% w obszarze północnym i 43,0% w obszarze środkowym i południowo-wschodnim. 2. Zastosowanie zmodyfikowanych formuł do wyznaczenia SNQ wskazuje na lepsze dopasowanie obliczonych wartości z wynikami pomiarów w każdym z rozpatrywanych obszarów, oceniane współczynnikiem R^2 , wynoszącym w wymienionych obszarach odpowiednio: 81,6% i 58,3%. 3. W zmodyfikowanych formułach dla obydwu obszarów uzyskano jeden z wykładników parametrów zmiennych opisujących, przeciwny do tego z oryginalnego wzoru Stachy; mianowicie wartość SNQ maleje w obszarze północnym wraz ze wzrostem parametru jeziorności, a w obszarze środkowym i południowo-wschodnim – wraz ze wzrostem spadku cieku.

Słowa kluczowe: niżówki, przepływy środowiskowe, SNQ, małe zlewnie

✉ e-mail: kazimierz_banasik@sggw.edu.pl

WSTĘP

Przepływ średni niski – SNQ, definiowany jako średnia arytmetyczna wartość przepływów minimalnych rocznych z wielolecia w określonym miejscu rzeki, jest jedną z podstawowych charakterystyk hydrologicznych, a jednocześnie kluczowym parametrem dla planowania, zarządzania i eksploatacji zasobów wodnych oraz projektowania obiektów inżynierii wodnej (Operacz, 2015; Prawo Wodne, 2017; Baran-Gurgul i in. 2023; Grela, 2023). Przepływ ten wykorzystywany jest m.in. do naliczania opłat za pobór wody, wyznaczania przepływu nienaruszalnego i środowiskowego, a także w analizach niżówek rzecznych. Znaczna liczba krajowych badań przepływów niskich dotyczyła pojedynczych rzek (Bartczak, 2007; Kaznowska i Banasik, 2009; Kolasińska i in. 2023) lub wybranych regionów Polski (Ziemońska, 1973; Tomaszewski, 2012). Większość starszych opracowań bazowała przy tym na krótkich okresach wieloletnich i obejmowała ograniczoną liczbę posterunków wodowskazowych. Przepływ SNQ w profilach dużych rzek wyznacza się na podstawie danych z monitoringu hydrologicznego prowadzonego przez IMGW-PIB (2025), za pomocą metod opisanych w literaturze przedmiotu (Byczkowski, 1999; WMO 2009, Banasik i Letkiewicz, 2021; Ozga-Zieliński i Walczykiewicz, 2022). W przypadku mniejszych rzek, nieposiadających zwykle obserwacji hydrologicznych, jednym ze sposobów wyznaczania przepływu SNQ jest zastosowanie wzorów empirycznych (Banasik i in., 2022; Kolasińska i in., 2023).

Celem pracy było: a) sprawdzenie na ile, będący ciągle w użyciu, opracowany na przełomie ostatnich dekad ubiegłego wieku, wzór Stachý (1991a, 1991b) dla obszaru Polski z pominięciem Karpat, poprawnie szacuje przepływ SNQ w mniejszych zlewniach (do ok. 550 km², nazywanych w dalszej części pracy także małymi), oraz b) opracowanie zmodyfikowanej postaci tego wzoru, do stosowania w tych zlewniach, poprzez ustalenie nowych parametrów do charakterystyk występujących we wzorze oryginalnym. Istotną rolę odgrywają tu zlewnie rzeczne o niedużej powierzchni, które zwykle nie posiadają wieloletnich obserwacji hydrologicznych, a w których zmiany zasobów wodnych, w tym przepływów niskich, są bardziej widocz-

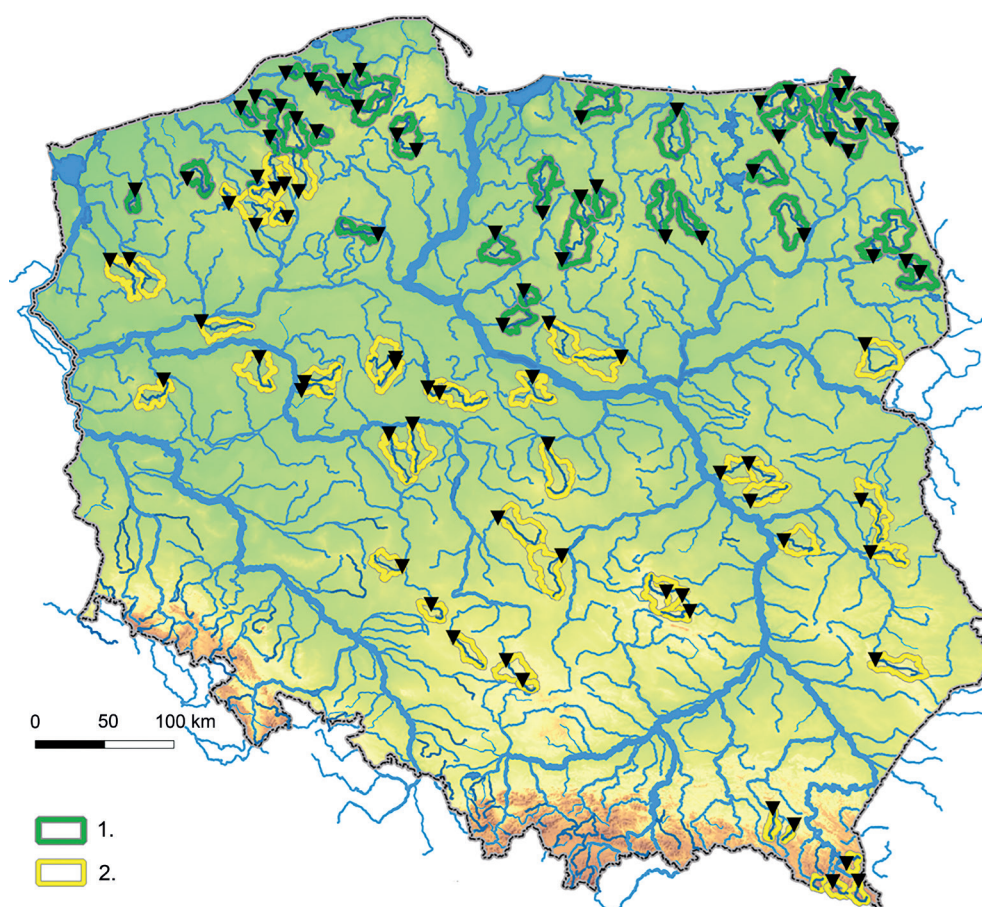
ne z uwagi na zmiany klimatu, zmiany użytkowania terenu, jak i wdrażanie programów rolnośrodowiskowych (Stuckey, 2006; Baran-Gurgul, 2023; Rutkowska i in., 2023; Kaca, 2025).

Do opracowania wzoru Stachý (1991a, 1991b) dla obszaru Polski z pominięciem Karpat wykorzystano dane o SNQ z ponad 500 zlewni, a więc także dużych rzek, z lat 1951–1985. Zmiany klimatu, zmiany użytkowania terenu zlewni, a także ograniczenie analizy – z uwagi na cel badań – do małych rzek, sugerują potrzebę sprawdzenia stosowalności tego wzoru do aktualnych warunków środowiskowych.

MATERIAŁY I METODY

Zlewnie wykorzystane w analizie

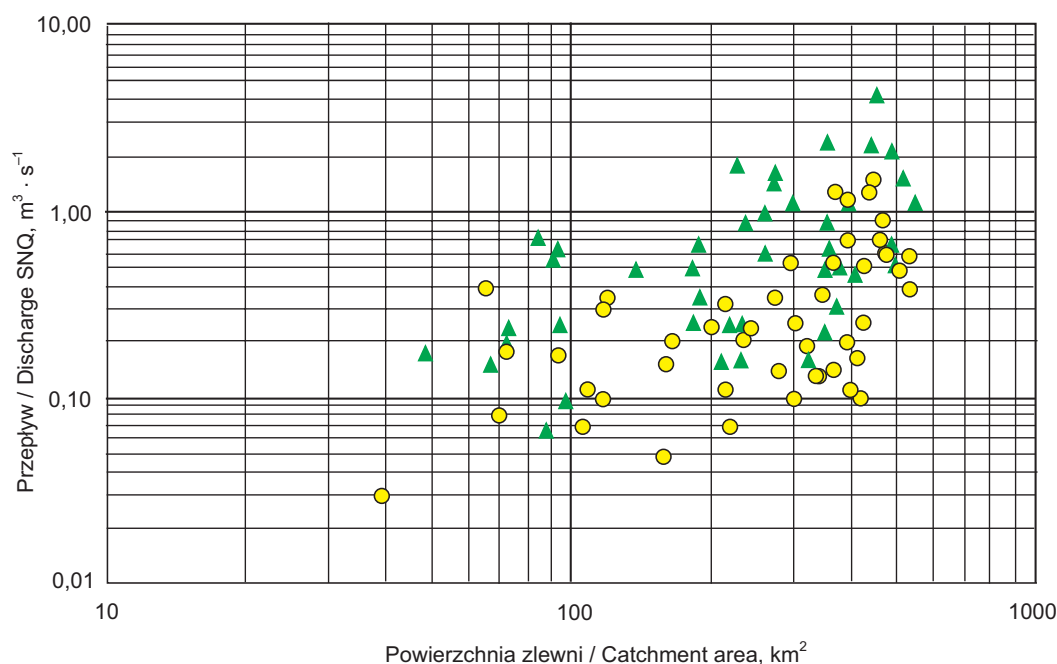
Do analizy wybrano 91 zlewni o powierzchni do 550 km², z obszaru Polski, z wyjątkiem Górnej Wisły i górnej Odry, posiadających opracowane w IMGW-PIB przepływy SNQ z wielolecia referencyjnego 1991–2020. Wybrane zlewnie, z uwagi na zróżnicowaną regionalnie zasobność wodną (przepływ średni), przypisano arbitralnie do dwóch obszarów: a) północnego, obejmującego rzeki Przemyśla, dolnej Wisły i Pojezierza Mazurskiego, b) środkowego i południowo-wschodniego, obejmującego dorzecza Warty z Notecią, środkowej Wisły z Narwią od Ostrołęki i Sanu. Do obszaru północnego przypisano 43, a do środkowego i południowo-wschodniego 48 zlewni. Lokalizację wybranych zlewni przedstawiono na rycinie 1, a zależności średnich niskich przepływów od powierzchni zlewni dla obydwu obszarów zaprezentowano na rycinie 2. W tabeli 1 zestawiono zakresy, średnie wartości oraz odpowiednie mediany powierzchni zlewni, przepływów średnich niskich – SNQ i średnich niskich odpływów jednostkowych – SN_q w wymienionych obszarach. Przy podobnym zakresie i średniej powierzchni zlewni w obydwu obszarach w obszarze północnym występują znacznie większe przepływy SNQ, ze średnią wartością 0,79 m³·s⁻¹ przy 0,37 m³·s⁻¹ w obszarze środkowym i południowo-wschodnim. Średnia wartość ze średnich niskich odpływów jednostkowych jest ponad dwukrotnie wyższa w obszarze północnym aniżeli w środkowym i południowo-wschodnim (odpowiednio: 3,08 i 1,32 l·s⁻¹·km⁻²).



Ryc. 1. Lokalizacja stacji hydrologicznych na mapie Polski: 1. Obszar północny. 2. Obszar środkowy i południowo-wschodni
Fig. 1. Location of river gauging stations on the map of Poland: 1. Northern region. 2. Central and south-eastern region

Tabela 1. Powierzchnie zlewni, średnie niskie przepływy i średnie niskie odpływy jednostkowe w analizowanych obszarach
Table 1. Catchment areas, mean low flows and the specific mean low flows in the analysed regions

Obszary analizowane Regions analysed	Liczba zlewni Number of catchments	Charakterystyka zlewni / Catchment characteristics											
		Powierzchnia / Area (km ²)				SNQ (m ³ · s ⁻¹)				SNq (l · s ⁻¹ · km ⁻²)			
		od from	do to	mediana median	średnia mean	od from	do to	mediana median	średnia mean	od from	do to	mediana median	średnia mean
1. Północny Northern	43	48,7	547,7	259,1	266,4	0,066	4,24	0,51	0,79	0,49	9,31	2,63	3,08
2. Środkowy i południowo- wschodni / Central and south-eastern	48	38,9	535,0	311,6	295,3	0,030	1,48	0,24	0,37	0,24	5,95	1,02	1,32
Obszar 1 i 2 łącznie / Region 1 and 2 combined	91	38,9	547,7	277,7	281,6	0,030	4,24	0,35	0,57	0,24	9,31	1,38	2,16



Ryc. 2. Zależności przepływów średnich niskich SNQ od powierzchni zlewni na obszarze północnym (zielone trójkąty) oraz środkowym i południowo-wschodnim (żółte kółka)

Fig. 2. Relation between the mean low flows SNQ and catchment areas in the northern region (green triangles) and the central and south-eastern region (yellow circles)

Stosowalność wzoru Stachý na wyznaczanie SNQ w badanych zlewniach

Opracowane w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej w 1991 roku przez zespół Zakładu Hydrologii Stosowanej pod kierunkiem profesora J. Stachý formuły na przepływ średni niski, z wykorzystaniem danych pomiarowych z lat 1951–1985, przedstawiono dla dwóch regionów: a) dla obszaru Polski z wyłączeniem Karpat i b) dla Karpat (Stachý, 1991a, 1991b). Przedmiotem analizy w tej pracy jest wzór dla pierwszego z tych regionów, uzależniający średni niski przepływ od czterech parametrów: powierzchni zlewni, odpływu jednostkowego pochodzącego z zasilania podziemnego, spadku cieku i jeziorności zlewni.

Przepływ średni niski SNQ wyznaczany jest z zależności:

$$SNQ = 4,068 \cdot 10^{-4} \cdot A^{1,045} SSq_p^{0,957} i_r^{0,111} (1 + Jez)^{0,234} \quad (1)$$

gdzie:

- SNQ – średni niski przepływ ($m^3 \cdot s^{-1}$),
- A – powierzchnia zlewni (km^2),
- SSq_p – średni z wieloletnia odpływ jednostkowy pochodzący z zasilania podziemnego, określany z mapy w *Atlasie hydrologicznym Polski*, arkusz 65 (Stachý 1987) ($l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$),
- i_r – spadek cieku ($m \cdot km^{-1}$) obliczany ze wzoru (2),
- Jez – bezwymiarowy wskaźnik jeziorności (–) obliczany ze wzoru (3).

$$i_r = \frac{\Delta W}{L + l} \quad (2)$$

gdzie:

- $\Delta W = W_g - W_d$ – różnica wysokości działu wodnego w punkcie przecięcia się z osią suchej doliny W_g (m n.p.m.) a wysokością przekroju obliczeniowego zamykającego ciek W_d (m n.p.m.),
- $L + l$ – długość cieku L wraz z suchą doliną l (km).

$$Jez = \frac{\sum_{i=1}^k A_{ji}}{A} \quad (3)$$

gdzie:

- A_{ji} – powierzchnia zlewni i -tego jeziora (km^2), którego powierzchnia s_i jest równa lub większa od 1% powierzchni jego zlewni ($s_i \geq 0,01 A_{ji}$),
- k – liczba jezior w zlewni cieką (-).

Stosowalność wzoru Stachý sprawdzono przez porównanie wartości SNQ wyznaczonych ze wzoru (1) z wartościami wyznaczonymi metodą bezpośrednią (na podstawie pomiarów), określając błędy przybliżeń (SSE, MAE, MAPE, ME) oraz miary określające odpowiednie dopasowanie (R^2 , R^2_{adj}). Parametry fizjograficzne zlewni, wykorzystane do ustalenia wartości zmiennych niezależnych do wzoru (1), ustalono z wykorzystaniem technik GIS i danych hydrograficznych z Mapy Podziału Hydrograficznego Polski w skali 1:10 000 oraz o rozdzielczości modelu 1 metr na 1 metr (NMT) z zasobu Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii. Analizowane przekroje pomiarowe mają przypisane im regiony wodowskazowe, które przestrzennie określają ich zlewnie. Na podstawie map cyfrowych i zastosowanego oprogramowania ArcGIS 10.2 2013 możliwe jest odczytywanie powierzchni, zlewni i jezior, długości cieką oraz wysokości działu wodnego i przekroju obliczeniowego. Mapę „średniego z wieloletnia odpływu jednostkowego pochodzącego z zasilania wód podziemnych” z *Atlasu hydrologicznego Polski* (arkusz 65) zeskanowano, a obraz rastrowy mapy wprowadzono do oprogramowania GIS za pomocą procesu georeferencji, czyli nadania odpowiednich współrzędnych i odwzorowania punktów na mapie. Z tak przygotowanej mapy przerysowano klasy poszczególnych wydzieleni średniego przepływu, a powstałym poligonom przypisano średnie wartości z danego zakresu, co umożliwiło dalsze analizy określania wartości dla analizowanych zlewni.

Nowe formuły na wyznaczenie SNQ

Drugim celem analizy było opracowanie nowych zależności regresyjnych uzależniających przepływ średni niski SNQ od czterech charakterystyk zlewni występujących we wzorze Stachý. Opracowywana postać zależności przedstawia się następująco:

$$SNQ = a_0 \cdot A^{a_1} SSq_p^{a_2} i_r^{a_3} (1 + Jez)^{a_4} \quad (4)$$

gdzie:

- a_0 , a_1 , a_2 , a_3 i a_4 – współczynniki regresji nieliniowej (4) dla zlewni z obydwu obszarów oddzielnie i łącznie, wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów z wykorzystaniem procedury Marquardta i pakietu obliczeniowego STATGRAPHICS Centurion 18 (STATGRAPHICS® Centurion 18, 2017).

Dopasowanie funkcji (4) wykonano z użyciem szeregu powszechnie stosowanych miar, błędów dopasowania i testów do oceny poprawności aproksymacji (współczynnika determinacji – R^2 , skorygowanego współczynnika determinacji – R^2_{adj} , sumy kwadratów reszt – SSE, średniego błędu absolutnego – MAE, średniego bezwzględnego błędu procentowego – MAPE, średniego błędu – ME statystyki Durbin-Watsona, autokorelacji błędów) (Walpole i in., 2002). Dla oszacowanych współczynników a_0 , ..., a_4 wyznaczono również 95% przedziały ufności. Ze względu na charakter niniejszej pracy w wynikach ograniczono się do ważniejszych z wyliczonych wielkości.

WYNIKI I DYSKUSJA

Zgodność ocen SNQ wyznaczonych ze wzoru Stachý z wynikami pomiarów

Wartości przepływów SNQ obliczone według wzoru Stachý dla zlewni z obydwu obszarów przedstawiono względem SNQ z pomiarów na rycinie 3. Położenie znacznie większej liczby punktów, zarówno z obszaru północnego, jak i z obszaru środkowego i południowo-wschodniego, powyżej prostej jednakowych wartości wskazuje na przeszacowanie wyników obliczeń SNQ ze wzoru Stachý, w większości przypadków, względem pomiarów. Dla sprawdzenia istotności różnic między SNQ wyznaczonego ze wzoru Stachý i z pomiarów, przeprowadzono test t-studenta, przyjmując:

$$x = \Delta SNQ = SNQ_{ws} - SNQ_p \quad (5)$$

gdzie:

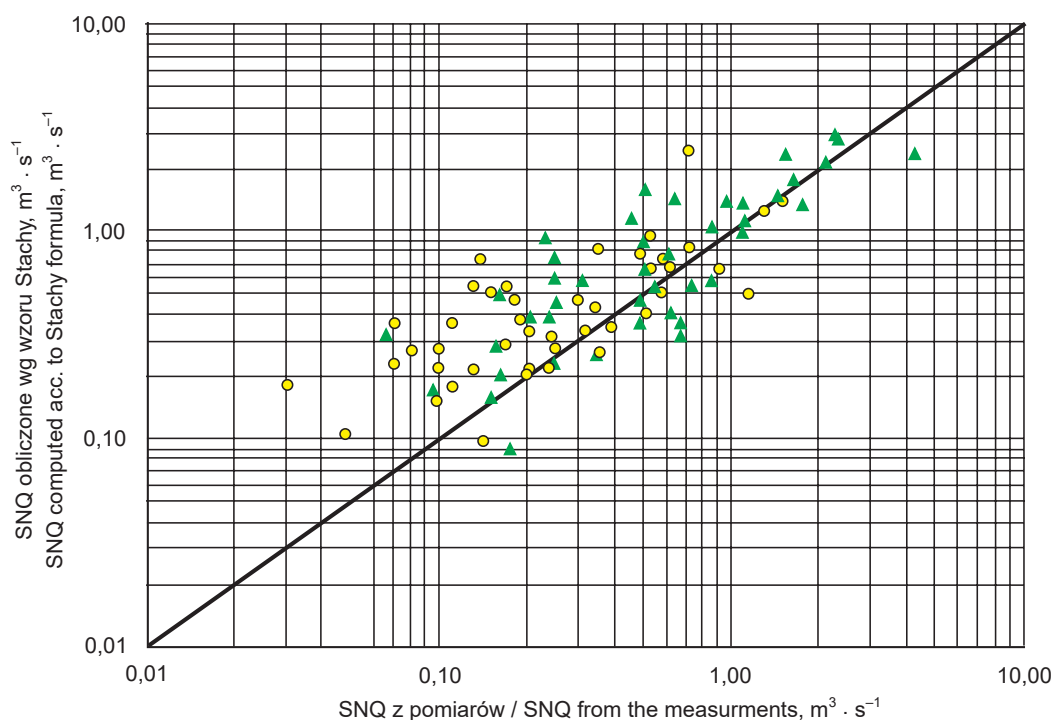
- ΔSNQ – różnica wartości SNQ ze wzoru i pomiarów ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- SNQ_{ws} – wartości SNQ wyznaczone ze wzoru Stachý ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- SNQ_p – wartości SNQ z pomiaru ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Dane do testu, średnie błędy względne zastosowania wzoru Stachý oraz miary zgodności zastawiono w tabeli 2. Wyniki testu wykazały brak podstaw do przyjęcia hipotezy zerowej, tj. o zgodności wyników uzyskanych z zastosowania wzoru Stachý z wynikami pomiarów, na poziomie istotności $\alpha = 0,1$ dla obszaru północnego i $\alpha = 0,01$ dla obszaru środkowego i południowo-wschodniego oraz dla obydwu obszarów łącznie. Stąd zasadne jest podjęcie próby ustalenia nowych współczynników do parametrów omawianego wzoru. Zastosowanie oryginalnych wzorów Stachý do wyznaczenia SNQ na podstawie parametrów fizjograficznych zlewni wskazuje na dopasowanie obliczonych wartości z wynikami pomiarów ocenione współczynnikiem R^2 , wynoszącym 65,4% w obszarze północnym i 43,0% w obszarze środkowym i południowo-wschodnim. Stosując wzór Stachý, uzyskano średnie przeszacowanie przepływu SNQ względem pomiarów o 13,7% w zlewniach obszaru północnego, o 15,5% w zlew-

niach obszaru środkowego i południowo-wschodniego oraz o 14,6% przy rozpatrywaniu łącznym zlewni z obydwu obszarów (tabela 2). Układ punktów na rycinie 3 wskazuje także, iż przeszacowanie to jest większe w zakresie mniejszych wartości pomierzonych SNQ, więc zapewne w zakresie mniejszych zlewni.

Ustalenie nowych parametrów formuły na wyznaczenie SNQ

Ustalane na podstawie pomiarów i opracowań IMGW-PIB przepływy średnie niskie z lat 1991–2020 wytypowanych zlewni o powierzchni do 550 km² oraz wartości ich charakterystyk występujących we wzorze Stachý dla obszaru Polski z pominięciem Karpat, tj. powierzchnie zlewni, odpływy jednostkowe pochodzenia podziemnego, spadki cieków i jeziorności zlewni, wykorzystano w analizie regresji wielokrotnej do wyznaczenia nowych parametrów. Wyniki obliczeń obejmujące pięć parametrów równań oraz dwa parametry



Ryc. 3. Zależności przepływów średnich niskich SNQ z pomiarów i obliczonych wzorem Stachý w zlewniach obszaru północnego (zielone trójkąty) oraz obszaru środkowego i południowo-wschodniego (żółte kółka), z linią idealnej zgodności
Fig. 3. Relation between mean low flow SNQ from the measurements and the estimated according the formula of Stachý for the catchments of the northern region (green triangles) and the central and south-east region (yellow circles) with the line of perfect agreement

Tabela 2. Dane do testu t-studenta i główne miary statystyczne wartości SNQ ze wzoru Stachý i z pomiarów.

Table 2. Main data for t-Student test and statistical parameters characterizing agreement of formula estimates with the observation

Obszar / Region	Średnia SNQ Mean SNQ	Odchylenie standardowe Standard deviation	Średni błąd względny Average relative error	–
	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	(–)	(–)	(%)
Północny / Northern	0,137	0,461	0,700	65,4
Środkowy i południowo-wschodni Central and south-eastern	0,155	0,329	1,159	43,0
Obszar 1 i 2 łącznie / Region 1 and 2 combined	0146	0,395	0,942	57,2

statystyczne zgodności SNQ obliczonej z pomierzoną – średni błąd względny i współczynnik determinacji – dla dwóch obszarów: a) północnego, b) środkowego i południowo-wschodniego oraz c) obydwu obszarów łącznie, zestawiono w tabeli 3. Dla porównania w tabeli 3 podano także parametry wzoru Stachý i średni błąd względny podawany przez Autora (Stachý 1991b). Najważniejsze zmiany w wartościach parametrów nowo ustalonych zależności w obszarach 1 i 2 oddzielnie rozpatrywanych w stosunku do wzoru Stachý to: a) znacznie mniejsze wartości parametru a_0 (wrażu wolnego), tj. ok. $3,4\text{E-}05$ vs. $4,1\text{E-}04$, b) znacznie większe wykładniki potęgowe przy powierzchniach

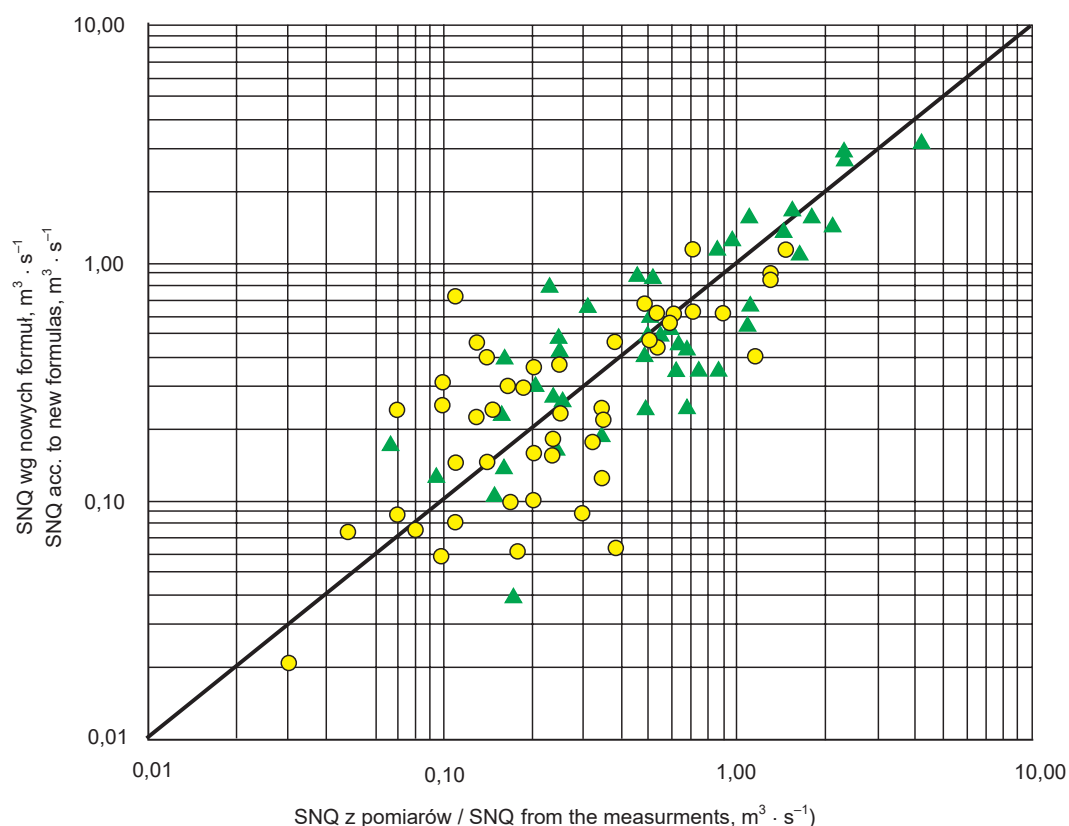
zlewni, tj. ok. 1,45 i 1,49 vs. 1,05, c) przeciwne znaki przy parametrze spadku w obszarze 2 (środkowym i południowo-wschodnim) oraz przy parametrze jeziorności w obszarze 1 (północnym). Efektem zastosowania nowych zależności będzie uzyskiwanie mniejszych wartości SNQ dla zlewni o małych powierzchniach, a następnie większy wzrost SNQ wraz ze wzrostem powierzchni, niż to ma miejsce w sytuacji wzoru Stachý.

Wartości SNQ obliczone nowymi formułami względem pomierzonych przedstawiono: dla obszaru 1 – północnego oraz dla obszaru 2 – środkowego i południowo-wschodniego na rycinie 4, a dla obydwu obszarów łącznie na rycinie 5.

Tabela 3. Parametry z miarami zgodności nowych formuł i wzoru Stachý

Table 3. Coefficients and statistical measures of new formulas with the original formula of Stachý

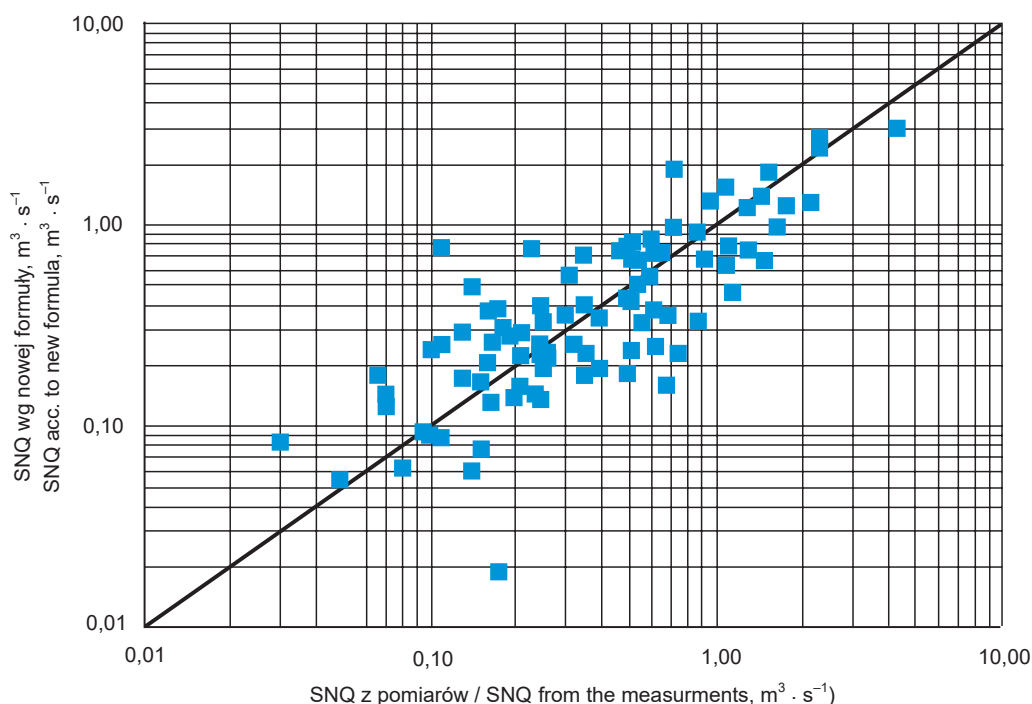
Lp. No.	Zależności / Relations		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	Średni błąd względny Mean relative error δ	Współczynnik determinacji R^2 Determination coefficient R^2
				A (km^2)	SSqp ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	Ir ($\text{m} \cdot \text{km}^{-1}$)	1 + Jez (–)	(–)	(%)
1	Nowe formuły dla	północnego northern	3,375E-05	1,454	0,952	0,483	–0,374	0,492	81,6
2	obszarów: New formulas for the regions:	środkowego i południowo- wschodniego central and south-eastern	3,428E-05	1,493	0,614	–0,114	0,283	0,670	58,6
3		łącznie 1 i 2 total 1 and 2	1,817E-05	1,535	1,118	0,183	–0,518	0,567	73,2
4	Wzór Stachý (1991b) / Formula of Stachý (1991b)		4,068E-04	1,045	0,957	0,111	0,234	0,472	–



Ryc. 4. Zależności przepływów średnich niskich SNQ z pomiarów i obliczonych nowymi formułami w zlewniach obszaru północnego (zielone trójkąty) oraz obszaru środkowego i południowo-wschodniego (żółte kółka), z linią idealnej zgodności
Fig. 4. Relation between mean low flow SNQ from the measurements and the estimated according new formulas for the catchments of the northern region (green triangles) and the central and south-east region (yellow circles) with the line of perfect agreement

Zastosowanie formuł z nowymi parametrami, podanymi w tabeli 3, do wyznaczenia SNQ wskazuje na lepsze dopasowanie obliczonych wartości z wynikami pomiarów, niż ma to miejsce przy stosowaniu wzoru Stachý, ocenione współczynnikiem R^2 , wynoszącym odpowiednio 81,6% w obszarze północnym, 58,6% w obszarze środkowym i południowo zachodnim oraz 73,2% dla obydwu obszarów łącznie. War-

tość średniego błędu względnego, oceny SNQ według nowych zależności, wynosząca 0,492 dla obszaru północnego i 0,670 dla obszaru środkowego i południowo-wschodniego, przy wartości 0,472 ustalonej w badaniach Stachý (1991), jest wskazówką do dalszej analizy danych pomiarowych prowadzących do znalezienia przyczyny występowania i ewentualnego wyeliminowania danych odstających.



Ryc. 5. Zależności przepływów średnich niskich SNQ z pomiarów i obliczonych z formuły dla zlewni obszaru północnego oraz obszaru środkowego i południowo-wschodniego, z linią idealnej zgodności

Fig. 5. Relation between mean low flow SNQ from the measurement and the estimated according new formula for all catchments of the both regions with the line of perfect agreement

WNIOSKI

- Zastosowanie oryginalnego wzoru Stachy do wyznaczenia SNQ na podstawie parametrów fizjograficznych zlewni, w tym ustalanych technikami GIS, wskazuje na dopasowanie obliczonych wartości z wynikami pomiarów ocenione współczynnikiem R^2 , wynoszącym 68,5% w obszarze północnym i 43,0% w obszarze środkowym i południowo-wschodnim.
- Zastosowanie zmodyfikowanych formuł do wyznaczenia SNQ wskazuje na lepsze dopasowanie obliczonych wartości z wynikami pomiarów w każdym z rozpatrywanych obszarów, ocenione współczynnikiem R^2 , wynoszącym w wymienionych obszarach odpowiednio: 81,6% i 58,3%.
- W zmodyfikowanych formułach uzyskano dla obydwu obszarów jeden z wykładników parametrów zmiennych opisujących, przeciwny do tego z oryginalnego wzoru Stachy; mianowicie wartość SNQ

maleje w obszarze północnym wraz ze wzrostem parametru jeziorności, a w obszarze środkowym i południowo wschodnim – wraz ze wzrostem spadku cieku.

LITERATURA

- Banasik, K., Kaznowska, E., Letkiewicz, B., Wasilewicz, M. (2022). Analiza wybranych charakterystyk hydrologicznych dwóch małych zlewni nizinnych. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumietus, 21(1), 33–47. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2022.21.1.33>.
- Banasik, K., Letkiewicz, B. (red.) (2021). Instrukcja wyznaczania przepływu średniego niskiego – SNQ. Warszawa, IMGW-PIB, dokument wewnętrzny.
- Baran-Gurgul, K. (2023). Prawdopodobieństwo przewyższenia przepływów charakterystycznych na obszarze Polski. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumietus, 22(4), 23–36. <http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/2023.22.4.16> (dostęp: 22.11.2025).

- Baran-Gurgul, K., Kołodziejczyk, K., Rutkowska, A. (2023). Spatial variability of average annual and monthly minimum river flow in Poland. *Geoinformatica Polonica. Prace Komisji Geoinformatyki Polskiej Akademii Umiejętności*, 22, 7–20.
- Bartczak, A. (2007). Wieloletnia zmienność odpływu rzecznego z dorzecza Zgłowiączki. *Polska Akademia Nauk. Prace Geograficzne*, Warszawa.
- Byczkowski, A. (1999). *Hydrologia*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Grela, J. (2023). Od przepływu nienaruszalnego do przepływu środowiskowego – rewolucyjnie czy ewolucyjnie? *Wodnesprawy.pl – Nauka*. <https://wodnesprawy.pl/od-przeplywu-nienaruszalnego-do-przeplywu-srodowisk> (dostęp: 22.11.2025).
- IMGW-PIB (2025). *Rocznik Hydrologiczny 2024*. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_observacyjne/Roczniki/Rocznik%20hydrologiczny/Rocznik%20Hydrologiczny%202024.pdf
- Kaca, E. (red.) (2025). *Melioracje, retencja i gospodarka wodna w rolnictwie*. ITP-PIB. CDR Brwinów. https://woda.cdr.gov.pl/images/publikacje/Publikacje/Melioracje_retencja_wodna_e-poradnik_2025.pdf (dostęp: 22.11.2025).
- Kaznowska, E., Banasik, K. (2009). Ocena intensywności niżówek rzecznych w małej zlewni rolniczej Niziny Mazowieckiej w ostatnich 45 latach. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumietus*, 8(3–4), 5–16.
- Kolasińska, K., Kierasiński, B., Karpńska, K., Szymczak, T., Banasik, K. (2023). Long-term variability of runoff from a small agricultural catchment of the North Masovian Lowland. *Journal of Water and Land Development*, 58, 212–219. DOI: 10.24425/jwld.2023.
- Operacz, A. (2015). Wyznaczanie wartości przepływu nienaruszalnego w inwestycjach związanych z wodami powierzchniowymi według metody Kostrzewy. *Ekonomia i Środowisko*, 1(52), 100–109.
- Ozga-Zieliński, B., Walczykiewicz, T. (red.) (2022). *Metody wyznaczania przepływu średniego niskiego SNQ*. IMGW-PIB, Warszawa.
- Prawo Wodne (2017). Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. (Dz.U. 2017, poz. 1566). <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/prawo-wodne-18625895> (dostęp: 22.11.2025).
- Rutkowska, A., Osuch, M., Żelazny, M., Banasik, K., Klimmek, M. (2023). Climatic and anthropogenic drivers of zero-flow events in intermittent rivers in Poland. *Journal of Water and Land Development*, 57 (IV–VI), 52–61. DOI: 10.24425/jwld.2023.145335
- Stachý, J. (1987). *Atlas hydrologiczny Polski*. IMGW. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
- Stachý, J. (1991a). Hydrologiczne aspekty ograniczenia zakresu stosowania pośrednich metod obliczania przepływu średniego niskiego. *Wiadomości IMGW*, 35(1–4).
- Stachý, J. (1991b). *Zasady obliczania przepływów średnich niskich rzek Polski*. Seria: Instrukcje i podręczniki. IMGW. Warszawa.
- STATGRAPHICS® Centurion 18 (2017). *User Manual*, Statgraphics Technologies, Inc.
- Stuckey, M.H. (2006). Low-flow, base-flow, and mean-flow regression equations for Pennsylvania streams: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5130.
- Tomaszewski, E. (2012). *Wieloletnia i sezonowa dynamika niżówek w rzekach Polski Środkowej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., Ye, K. (2002). *Probability and statistics for engineers and scientists*. Prentice Hall, New York.
- WMO. World Meteorological Organization (2009). *Manual on low-flow estimation and prediction*. Operational Hydrology Report No. 50, WMO No. 1029, Koblenz.
- Ziemońska, Z. (1973). *Warunki hydrograficzne w polskich Karpatach Zachodnich*. Prace Geograficzne nr 103. Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii, Warszawa.

APPLICABILITY OF EMPIRICAL FORMULA OF STACHÝ ON MEAN OF THE ANNUAL LOWEST FLOWS

ABSTRACT

Aim of the study

1. To verify the applicability of the Stachý formula for the mean low flow (SNQ) in small lowland rivers monitored by the National Hydrological Service; 2. To modify the Stachý formula for determining the mean low flow using the same catchment area parameters as in the original formula.

Material and methods

The present study used recorded discharge data from the period 1991–2020 in 91 river gauge stations monitored by the State Hydrological Service (IMGW-PIB), with catchment areas of up to 550 km². The analysis was conducted separately for two regions: 1) the northern part of Poland – encompassing the rivers of Pomorze (the Baltic Coast), the lower Wisła (Vistula), and the Mazury (Masurian Lake District); and 2) the central and southeastern part of the country – encompassing the lower Odra (Oder) River with the Warta and Noteć, the middle Wisła (Vistula) with the Narew River from Ostrołęka, and the San River. The number of river gauge stations in each area was 43 and 48, respectively.

Results and conclusions

1. The application of Stachý's original formula to determine the SNQ based on the catchment's physiographic parameters indicates a match between the calculated values and the measured results, assessed by an R^2 coefficient of 68.5% in the northern part of the country, and 43.0% in the central and southeastern parts; 2. The application of the modified formula to determine the SNQ indicates a better match between the calculated values and the measured results in each of the considered areas, assessed by an R^2 coefficient of 81.6% and 58.3% in the aforementioned parts of Poland, respectively. 3. In the modified formulas, for both areas, one of the obtained exponents of the variable parameters was opposite to its counterpart in the original Stachý formula; namely, the SNQ value decreased in the northern area with an increase of the lake parameter, and in the central and south-eastern areas, with an increase of the stream gradient.

Keywords: small catchment, environmental flows, low-flow estimation