



ZESZYTY ENERGETYCZNE, TOM VII

Wyzwania naukowe w dobie światowej transformacji energetycznej

2020, s. 163–173

Analiza dynamiki zmian poziomu wody w piezometrach zapory Dobczyce w latach 2017–2019

Stanisław Lach

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska
e-mail: slach@agh.edu.pl

Streszczenie

W celu prawidłowej pracy i bezpieczeństwa eksploatacji budowli piętrzących dokonuje się stałego monitoringu, którego celem jest rejestracja oraz prognozowanie zmian, jakie zachodzą w podłożu i konstrukcji budowli, a także ocena ich stanu technicznego. Monitoring jest to najczęściej ciągły i długoterminowy zorganizowany sposób obserwacji obiektu lub procesu. Monitorowanie obiektu określa więc systematyczne obserwacje, pomiary i badania, służące do oceny jego stanu technicznego oraz bezpieczeństwa. Celem pracy było przedstawienie oraz przeanalizowanie dynamiki zmian stanu wód w pomiarach piezometrycznych, uzyskanych dla zapory Dobczyce w latach 2017–2019. Przed przystąpieniem do analizy danych piezometrycznych wykorzystano test statystyczny Grubbsa, dzięki któremu możliwe było zidentyfikowanie oraz odrzucenie obserwacji odstających. Pomiary wykonywane były prawie zawsze 2 razy w miesiącu, co w okresie objętym analizą dało 71 wyników pomiarowych dla pojedynczego piezometru.

Słowa kluczowe: zapory, monitoring, bezpieczeństwo budowli hydrotechnicznych

1. Wprowadzenie

Od początku XX w. prowadzono wiele badań statystycznych dotyczących katastrof i awarii zapór, których celem było poszerzenie wiedzy oraz stworzenie lepszych gwarancji bezpieczeństwa tych niewątpliwie potrzebnych dla społeczeństw budowli. Zgodnie z definicją ustaloną w 1986 r. przez Międzynarodową Komisję Wielkich Zapór (ICOLD), katastrofa zapory to „zawalenie się lub przemieszczenie części zapory lub jej podłoża, w wyniku którego budowla nie może piętzyć wody. Na ogół wiąże się to ze znacznie zwiększonym odpływem stwarzającym zagrożenie dla życia ludzi i mienia w dolinie rzeki poniżej zapory”. Ze wszystkich zapór wybudowanych przed 1950 r. zniszczeniu uległo 2,2%, natomiast spośród zapór wzniesionych po 1950 r. – mniej niż 0,5%. Aktualne statystyki pokazują, że około 70% katastrof zapór wodnych następuje w okresie pierwszych 10 lat ich eksploatacji [1]. W Światowym Rejestrze Zapór, prowadzonym przez ICOLD, Polska z 69 wielkimi zaporami plasuje się na 16 miejscu wśród 35 krajów europejskich, pod względem liczby posiadanych wielkich zapór. Spośród 3462 budowli stale piętzących wodę (w tym 306 zapór, 343 zbiorników wodnych, 2262 jazów, 130 śluz żeglugowych oraz 421 elektrowni wodnych) poddanych kontroli przez Główny Urząd Nadzoru Budowlanego w 2012 r., w przypadku 41,08% okres eksploatacji przekracza 50 lat [2]. Większość zbudowanych w Polsce zapór to konstrukcje ziemne, których wiek jest również większy niż 50 lat. Obiekty te zbudowano w okresie, gdy geotechnika nie była jeszcze tak dobrze rozwinięta jak w chwili obecnej. W projektowanych zabezpieczeniach przeciwfiltracyjnych nie uwzględniano doświadczenia eksploatacyjnego, gdyż w czasie ich budowy jeszcze go nie posiadano. Wraz z czasem eksploatacji wzrasta podatność wodnych budowli piętzących na uszkodzenia, stwarzające zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzi, bezpieczeństwa mienia i środowiska. Dotyczy to około 30% polskich budowli piętzących wodę, pracujących ponad 50 lat. Tak długi okres eksploatacji skutkuje zwiększoną liczbą uszkodzeń i wzrostem prawdopodobieństwa wystąpienia awarii.

Zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji budowli piętzących wymaga stałych pomiarów kontrolnych [3]. Monitoring budowli hydrotechnicznej polega na zorganizowanym sposobie obserwacji obiektu i zachodzących na nim procesów, zwykle ciągłym lub długoterminowym. Są to zazwyczaj systematyczne obserwacje, pomiary i badania tych obiektów, które służą do oceny ich stanu technicznego i bezpieczeństwa.

Obecnie w Polsce zadania oraz obowiązki dotyczące zapewniania bezpieczeństwa funkcjonowania budowli piętzących w ramach prowadzenia nadzoru techniczno-budowlanego, jak również zasady właściwego użytkowania tych budowli regulują dwa aktyprawne:

- Ustawa *Prawo budowlane* z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz.U. 1994, nr 89, poz. 414 z późn. zm.),
- Ustawa *Prawo wodne* z dnia 20 lipca 2017 r. (Dz.U. 2017, poz. 1576 z późn. zm.).

Katastrofalna fala wezbraniowa, która jest z reguły następstwem nagłej awarii wysokiej zapory, dokonuje ogromnych zniszczeń, spowodowanych głównie znaczną prędkością wody oraz głębokością zalewu. Konsekwencjami katastrof zapór jest narażenie zdrowia i życia ludzi oraz starty materialne [4–6]. Międzynarodowa Komisja Wielkich Zapór szacuje, że na każde 100 zapór w ciągu 100 lat dwie ulegają katastrofie [7]. Dlatego tak ważna jest kontrola oraz monitoring piętrzących budowli hydrotechnicznych, z wykorzystaniem systemów ostrzegawczo-alarmowych. O powodzeniu monitoringu możemy mówić wtedy, gdy dostarczy on odpowiedniego typu danych, w odpowiedniej ilości i we właściwym czasie. Dane te muszą mieć akceptowalną dokładność oraz formę, która pozwoli na ich dalszą interpretację i przetwarzanie. Do podstawowych form monitoringu zapór zaliczane są m.in. pomiary piezometryczne, które umożliwiają pomiar stanu wody w piezometrze otwartym lub pomiar ciśnienia wody w piezometrze zamkniętym. Dzięki tym pomiarom możliwa jest kontrola filtracji przez budowlę piętrzącą, a tym samym ocena zachowania się konstrukcji [8].

W aktualnie obowiązujących normach [9–11] występuje pojęcie wyniku wątpliwego, który definiowany jest jako odróżniający się od pozostałych obserwacji w stopniu przewyższającym różnice, których można się spodziewać w danej metodzie pomiarowej. Wynik wątpliwy, lub inaczej błąd grubo (pomyłka), jest pewną odmianą błędu przypadkowego, w kontekście jego losowego pojawiania się. Ma on miejsce wówczas, gdy jeden lub kilka wyników pomiaru odbiega w sposób znaczący od pozostałych. Można wtedy przypuszczać, że pewne zdarzenie o charakterze losowym wpłynęło na nieprawidłowość wyniku eksperymentu. Przed przystąpieniem do analizy danych piezometrycznych należy zidentyfikować i odrzucić obserwacje odstające [12]. Postępowanie z wynikami pomiarów uznanymi za wątpliwe jest jednym z najbardziej kłopotliwych problemów, na które można natrafić podczas wykonywania jakiegokolwiek analizy danych. Wyniki takie są skutkiem jednorazowego wpływu ważnej, zakłócającej przyczyny, która działa w sposób przejściowy i tylko przy niektórych pomiarach. Pojedynczy wynik pomiarowy obciążony takim rodzajem błędu jest najczęściej wielkością skrajną (minimalną lub maksymalną) rosnąco uporządkowanego zbioru wyników [13]. W przypadku serii pomiarowej, która obejmuje wyniki pomiarów dokonywanych w warunkach powtarzalności, błąd taki jest łatwy do wykrycia oraz identyfikacji. W przypadku okresowych pomiarów poziomu zwierciadła wody w piezometrze otwartym lub ciśnienia wody w piezometrze zamkniętym, obserwacje są rejestrowane jednorazowo dla każdego

z piezometrów. Nie posiadamy więc próbki zawierającej po kilka wyników tej samej obserwacji dla tego samego piezometru, a dysponujemy jedynie pomiarami niezależnymi. W związku z tym ewentualne zakłócenia w przebiegu zmian poziomu wody w piezometrach możemy zauważyć, porównując je z obrazem pochodzącym z poprzednich okresów pomiarowych. Jeżeli pomiar oraz obliczenia wykonywane są przez jednego obserwatora, który kontroluje i ma na uwadze warunki wykonania pomiaru, jak również ewentualnie występujące zakłócenia, możliwe jest odrzucenie odstającej obserwacji. W przypadku pomiarów piezometrycznych pożądane oraz celowe byłoby ich powtórzenie. Z reguły jednak osoba, która wykonuje obliczenia i analizy, otrzymuje jedynie same wyniki pomiarów, bez dodatkowych informacji dotyczących ich przebiegu. W takiej sytuacji konieczne jest zastosowanie pewnych testów statystycznych, dzięki którym możliwe będzie przyjęcie lub odrzucenie pomiaru wątpliwego na przyjętym poziomie istotności [14].

2. Materiały i metody

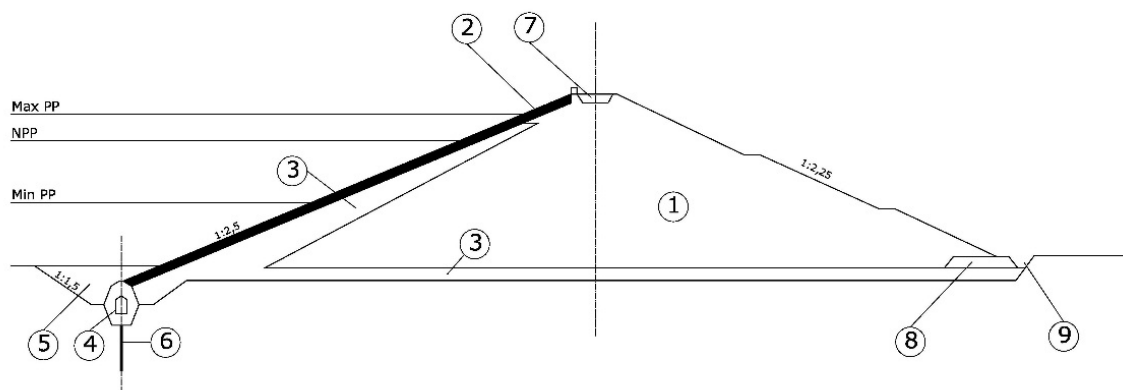
Zapora Dobczyce jest usytuowana w 60,1 km rzeki Raby, w gminie Dobczyce, w województwie małopolskim. Do eksploatacji została oddana w 1986 r. Na prawym brzegu poniżej zapory znajduje się elektrownia, oddana do eksploatacji w 1993 r. Podstawowe funkcje zbiornika to zaopatrzenie w wodę miasta Krakowa, redukcja fali powodziowej oraz retencja dla celów energetycznych. Główne parametry zbiornika przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry Zbiornika Dobczyckiego

Parametr	Wartość
Pojemność całkowita (przy Max PP)	141,74 mln m ³
Pojemność użytkowa (NPP – 269,90)	113,70 mln m ³
Pojemność użytkowa (NPP – 269,30)	107,87 mln m ³
Pojemność martwa (przy Min PP)	22,56 mln m ³
Rezerwa powodziowa (NPP – 269,90)	28,04 mln m ³
Rezerwa powodziowa (NPP – 269,30)	33,87 mln m ³
Stany wody:	
Max PP	272,60 m n.p.m.
NPP	269,90 (269,30) m n.p.m.
Min PP	256,70 m n.p.m.

Zapora ziemna została wykonana z materiałów miejscowych (piaski, żwiry, otoczaki), z ekranem asfaltobetonowym na skarpie odwodnej, opartym u podnóża na żelbetowej galerii kontrolno-zastrzykowej (rys. 1).

Podstawowe dane techniczne zapory Dobczyce ukazano w tab. 2.



Rys. 1. Zapora ziemna z ekranem asfaltobetonowym oraz przesłoną cementacyjną – Dobczyce na rzece Rabie: 1 – korpus statyczny, 2 – ekran asfaltobetonowy, 3 – warstwa filtracyjna, 4 – galeria kontrolno-zastrzykowa, 5 – uszczelnienie gliniaste, 6 – przesłona cementacyjna, 7 – korona zapory z drogą roboczą, 8 – drenaż, 9 – rów odwodnieniowy

Tabela 2. Podstawowe parametry zapory Dobczyce

Parametr	Wartość
Długość całkowita w koronie	617,0 m
Wysokość maksymalna	30,6 m
Szerokość korony	8,5 m
Nachylenie skarpy odwodnej	1:2,5
Nachylenie skarpy odpowietrznej	1:2,25
Kubatura nasypu	355 000 m ³

Blok przelewowo-spustowy składa się z siedmiu sekcji betonowych, łączących zaporę ziemną z prawym przyczółkiem (Górą Zamkową). Podstawowe dane techniczne bloku przelewowo-spustowego przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3. Podstawowe parametry bloku przelewowo-spustowego zapory Dobczyce

Parametr	Wartość
Wysokość bloku (sekcje przelewowe)	41,0 m
Długość łączna 7 sekcji	107,9 m
Światło przelewów w sekcjach B1, B2, B3	3 × 16,0 m
Światło spustów dennych	4 × (3,2 × 4,5) m
Wydatek urządzeń upustowych przy Max PP	2250 m ³ /s

Elektrownia przepływowa jest wyposażona w dwie turbiny Kaplana o pionowych osiach. Woda jest doprowadzana sztolnią wydrążoną w masywie Góry Zamkowej z ujęcia wieżowego, zlokalizowanego w zbiorniku. Podstawowe parametry elektrowni ukazano w tab. 4.

Tabela 4. Podstawowe parametry elektrowni przepływowej, zlokalizowanej przy zaporze w Dobczycach

Parametr	Wartość
Moc instalowana	2,5 MW
Przełyk min/max	1,25/15,6 m ³ /s
Spad min/max	14,8/30,7 m
Średnia roczna produkcja energii	9,6 GWh

Zapora wyposażona jest w 30 piezometrów otwartych. Z uwagi na niepełne ciągi pomiarowe do analizy nie wzięto pod uwagę 9 piezometrów (oznaczonych symbolami P01, P02, P02a, P06, P08, P018, P022, P023 oraz P024). Dla zapory Dobczyce analizie poddano pomiary zmian zwierciadła wody w piezometrach otwartych, obejmujące okres 3 lat (od 2017 do 2019 r.). Dla dwudziestu jeden piezometrów otwartych przebadano po 71 pomiarów piezometrycznych, co sumarycznie dało liczbę 1491 obserwacji. Dane piezometryczne zostały udostępnione przez Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie – Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie.

W niniejszej pracy wykorzystano statystyczny test Grubbsa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, który służy do identyfikacji oraz odrzucania obserwacji odstających [15]. Przed wykonaniem tego testu zbiór wyników eksperymentalnych należy uszeregować w ciąg niemalejący. Błędem grubym może być obarczona największa (x_{\max}) lub najmniejsza (x_{\min}) wartość wyniku w analizowanej próbce. Test ten jednorazowo daje możliwość wykrycia tylko jednej wartości odstającej, dlatego należy go powtarzać do momentu, gdy w zbiorze danych nie zaobserwuje się kolejnych wartości odstających od pozostałych wyników [16]. Dla testu Grubbsa wartość statystyki testowej wyraża się wzorem:

$$G_p = \frac{\max_{i=1,\dots,n} |x_i - \bar{x}|}{s} \quad (1)$$

gdzie \bar{x} , s – oznaczają odpowiednio wartość średnią oraz odchylenie standardowe z badanej serii pomiarów.

Wartość krytyczną dwustronnego testu Grubbsa dla zadanego poziomu istotności α można odczytać z tablic lub wyliczyć zgodnie ze wzorem:

$$G_{kr} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{t_{(\alpha/(2n), n-2)}^2}{n-2 + t_{(\alpha/(2n), n-2)}^2}} \quad (2)$$

Jak wynika ze wzoru 2, wartość krytyczna dwustronnego testu Grubbsa dla poziomu istotności α obliczana jest na podstawie wartości krytycznej rozkładu t -Studenta dla poziomu istotności $\alpha/(2n)$ i liczby stopni swobody równej $n-2$, gdzie oznacza liczbę pomiarów w serii.

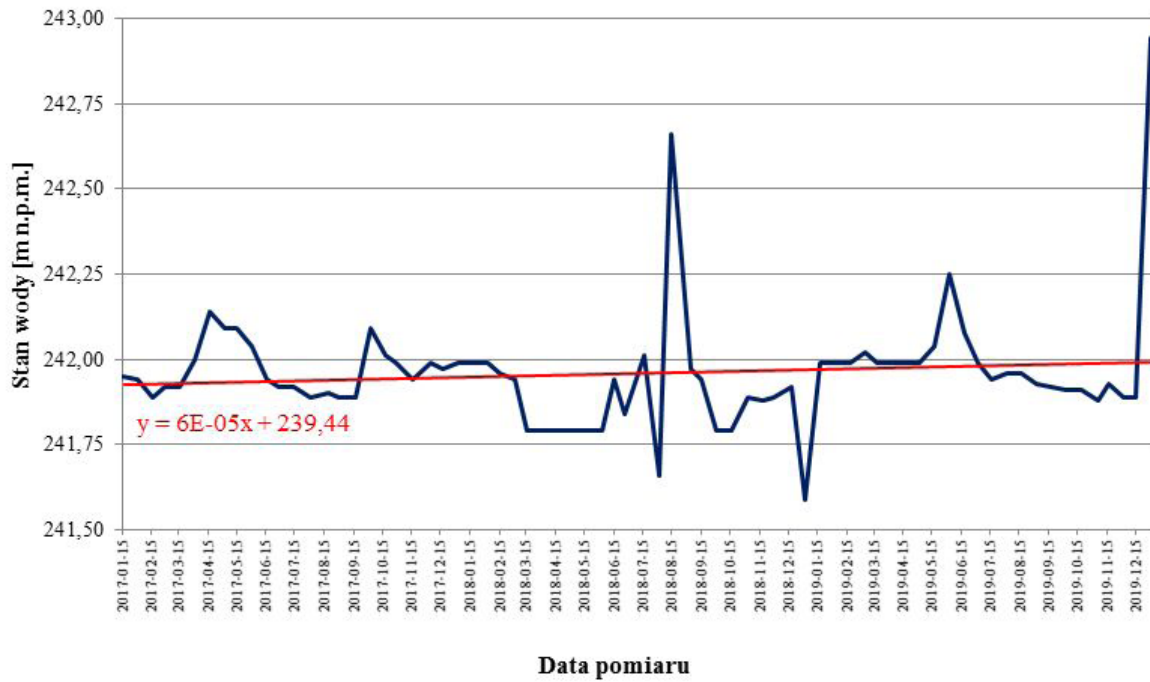
3. Uzyskane wyniki

Za pomocą statystycznego testu Grubbsa z danych pomiarowych usunięto łącznie 16 obserwacji odstających. W dalszym etapie wykonano wykresy czasowego przebiegu stanu wody w analizowanym okresie w badanych piezometrach otwartych. Umożliwiło to wykreślenie linii trendu dla każdego z piezometrów oraz wyznaczenie równań dla tych linii. Równania linii trendu dały z kolei pogląd na zachowanie się ciśnienia piezometrycznego w każdym z analizowanych piezometrów.

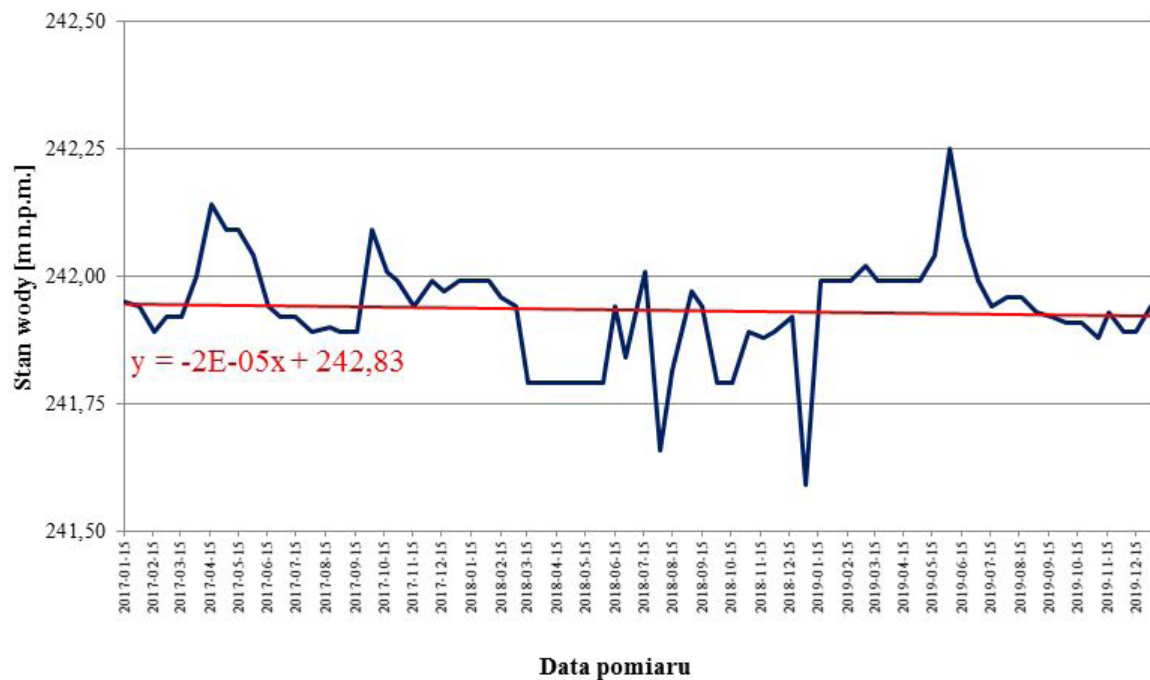
Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy wykres zmian poziomów wody w piezometrze PO16 wraz z linią trendu, przed dokonaniem identyfikacji oraz usunięciem obserwacji odstających. Wstępny wizualny ogląd pomiarów piezometrycznych, sugeruje możliwość występowania błędów grubych w latach 2017–2019 w piezometrze PO16. Przeprowadzony test Grubbsa wykazał istnienie dwóch takich wyników. Na rysunku 3 ukazano wykres zmian poziomów wody w tym samym piezometrze wraz z linią trendu po usunięciu błędów grubych. W tabeli 5 zestawiono uzyskane linie trendu dla badanych piezometrów otwartych zapory w Dobczycach.

Tabela 5. Zestawienie linii trendu dla piezometrów otwartych zapory Dobczyce

Oznaczenie piezometru	Równanie linii trendu	Charakter trendu
PO3	$y = -0,0026x + 371,9$	malejący
PO4	$y = -0,0012x + 302,07$	malejący
PO5	$y = -0,0011x + 296,51$	malejący
PO7	$y = -0,0017x + 328,43$	malejący
PO9	$y = -4E - 05x + 244,09$	malejący
PO10	$y = -3E - 05x + 243,22$	malejący
PO11	$y = -6E - 05x + 244,84$	malejący
PO12	$y = -1E - 05x + 243,09$	malejący
PO13	$y = -2E - 05x + 243,49$	malejący
PO14	$y = -5E - 05x + 244,82$	malejący
PO15	$y = -6E - 05x + 244,53$	malejący
PO16	$y = -2E - 05x + 242,83$	malejący
PO17	$y = -3E - 05x + 243,19$	malejący
PO19	$y = -2E - 06x + 241,34$	malejący
PO20	$y = -2E - 05x + 242,18$	malejący
PO21	$y = -5E - 05x + 243,43$	malejący
PO25	$y = 2E - 05x + 240,46$	rosnący
PO26	$y = 8E - 05x + 238,33$	rosnący
PO27	$y = 0,0002x + 232,5$	rosnący
PO28	$y = 3E - 05x + 242,54$	rosnący
PO29	$y = 0,0003x + 230,3$	rosnący



Rys. 2. Zmiana poziomu wody w piezometrze otwartym PO16 wraz z linią trendu dla zapory w Dobczycach przed dokonaniem identyfikacji oraz usunięciem obserwacji odstających



Rys. 3. Zmiana poziomu wody w piezometrze otwartym PO16 wraz z linią trendu dla zapory w Dobczycach po usunięciu obserwacji odstających

Jak wynika z rys. 3, charakter linii trendu po usunięciu dwóch punktów odstających zmienił się z rosnącego na malejący. Stąd nasuwa się wniosek, że wymagane jest usunięcie ze zbioru danych takich obserwacji, które mogą mieć znaczny wpływ na jej wynik i być powodem fałszywej oceny lub interpretacji analizowanego zjawiska.

4. Podsumowanie i wnioski

Z perspektywy bezpieczeństwa obiektu hydrotechnicznego najkorzystniejsza sytuacja zachodzi wówczas, gdy poziomy wody w piezometrach oscylują wokół stałej wartości. Zjawisko takie świadczy o ustabilizowanych procesach filtracji w korpusie oraz podłożu zapory. Trend wzrastający (względnie malejący) może wskazywać na przemieszczanie się drobnych cząstek w korpusie lub podłożu budowli, co z upływem czasu może skutkować lokalnymi przekroczeniami dopuszczalnych gradientów filtracyjnych, a więc prowadzić do sytuacji stanowiącej zagrożenie dla bezpieczeństwa funkcjonowania zapory. Dzięki systematycznym pomiarom można skutecznie zapobiegać ewentualnej katastrofie, poprzez uruchamianie systemów ostrzegawczych lub alarmowych, jak również zaplanować modernizację obiektu z odpowiednim wyprzedzeniem. Podczas wykonywania pomiarów ciśnienia wody w piezometrze zamkniętym lub poziomym zwierciadła wody w piezometrze otwartym, mogą pojawić się różnego rodzaju czynniki, które są przyczyną zaburzenia tych pomiarów. Mogą one przyjmować charakter systematyczny, przypadkowy, jak również oczywistej pomyłki. Źródłem obserwacji odstających, które mogą pojawić się podczas wykonywania pomiarów piezometrycznych, może być wiele czynników. Do najważniejszych przyczyn powstawania błędów tego rodzaju zaliczyć można:

- pomyłki podczas wykonywania odczytu lub zapisu wskazań sprzętu pomiarowego – błędy popełniane najczęściej przez obserwatora (np. przypadkowa zamiana kolejności dwu sąsiednich liczb (tzw. czeski błąd) lub niepoprawna numeracja punktów),
- wykorzystanie sprzętu pomiarowego w niewłaściwy sposób,
- uszkodzenia instrumentu pomiarowego,
- specyfika pomiaru, która związana jest z doбором odpowiedniej metody,
- zmiana warunków pomiarowych (np. niesprzyjające warunki pogodowe lub oblodzenie),
- niewłaściwy sposób pobrania danych pomiarowych, ich przechowywania w bazach danych,
- mechaniczne uszkodzenia punktów pomiarowych,
- wprowadzenie danych pomiarowych do bazy danych w nieodpowiedni sposób.

Dla zapory Dobczyce w latach 2017–2019 w piezometrach otwartych PO9, PO11, PO14, PO16, PO17 oraz PO19 i PO20 wykazano 16 obserwacji ostających, co stanowi 1,07% wszystkich wyników poddanych analizie. Wśród 21 badanych piezometrów otwartych zapory Dobczyce w 16 piezometrach (76%) widoczny jest trend malejący, co w konsekwencji prowadzi do spadku gradientów filtracyjnych. Dla pięciu badanych piezometrów (PO25, PO25, PO27, PO28 oraz PO29) trend wykazywał tendencję

wzrostową. Przyczyny notowanego wzrostu ciśnienia filtracyjnego w tych piezometrach wymagają dalszego wyjaśnienia i konieczna jest dalsza obserwacja ich ciśnienia wody oraz ewentualnie wykonanie badań modelowych w celu wyjaśnienia tego zjawiska, gdyż piezometry te znajdują się w bliskim sąsiedztwie przelewu powierzchniowego.

Literatura

- [1] Rak J., *Katastrofy i awarie zapór wodnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2007, 46, 125–134.
- [2] Lebiecki P., *Stan bezpieczeństwa budowli piętrzących wodę w Polsce w świetle prowadzonych kontroli w 2012 r.*, Gospodarka Wodna 2013, 10, 386–392.
- [3] Kledyński Z., *Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych*. Cz. 1, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 2011, 2, 54–61.
- [4] Małecki Z.J., Pokładek R., *Istotne procesy zagrażające bezpieczeństwu zbiorników wodnych*, Zeszyty Naukowe. Inżynieria Lądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska. Instytut Badawczo-Rozwojowy Inżynierii Lądowej i Wodnej „Euroexbud”. Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej Zarząd Oddziału Ziemi Kaliskiej 2010, 2, 33–43.
- [5] Lecornu J., *Dam safety: from the engineer's duty to risk management*, The International Journal on Hydropower and Dams 1998, 6, 53–56.
- [6] Jansen R.B., *Dams and public safety (A water resources technical publication)*, Books Express Publishing, 2011.
- [7] Opyrchal L., *Metoda analizy i oceny ryzyka awarii opracowana dla polskich budowli hydrotechnicznych*, Materiały Badawcze Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Seria Inżynieria wodna 2005, 17.
- [8] Mirosław-Świątek D., Kembłowski M., Jankowski W., *Application of the Bayesian Belief Nets in dam safety monitoring*, Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation 2012, 44, 25–33.
- [9] PN-ISO 3534-1. *Statystyka – Słownik i symbole – Cz. 1 Ogólne terminy statystyczne i terminy wykorzystywane w rachunku prawdopodobieństwa*, Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
- [10] PN-ISO 5725-1. *Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów – Cz. 1: Ogólne zasady i definicje*, Polski Komitet Normalizacyjny, 2002.
- [11] PN-ISO 5725-2. *Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów – Cz. 1: Podstawowa metoda określania powtarzalności i odtworzalności standardowej metody pomiarowej*, Polski Komitet Normalizacyjny, 2002.
- [12] Lach S., *Interpretation of the results of monitoring of the piezometric measurements of the Chańcza dam in 2014–2017*, Journal of Water and Land Development 2019, 42, 117–123.

-
- [13] Prószyński W., Kwaśniak M., *Niezawodność sieci geodezyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- [14] Lach S., *Analysis of changes in the trends recorded in piezometers of the Solina Dam in the study period 2010–2015*, Journal of Ecological Engineering 2018, 19, 150–155.
- [15] Grubbs F.E., *Procedures for detecting outlying observations in samples*, Technometrics 11, 1–21, 1969.
- [16] Konieczka P., Namieśnik J., Zygmunt B., *Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014.