

**dr hab. Stéphane Bonelli**

Cemagref, Aix-en-Provence, Francja

**dr inż. Krzysztof Radzicki**

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej

## **Zastosowanie funkcji odpowiedzi impulsowej do analizy ciśnień porowych w zaporach ziemnych**

### **The impulse response function analysis of pore pressures monitoring data**

**Streszczenie** Efektywny nadzór zapór wymaga niejednokrotnie jak najszybszej interpretacji zarejestrowanych ciągów pomiarowych ciśnień porowych. W tym oraz innych przypadkach modelowanie numeryczne rozpatrywanego problemu bazujące na dyskretyzacji równań różniczkowych może nie być optymalnym lub jedynym narzędziem, które należy wykorzystać do analizy pomiarów. W artykule zaprezentowano model służący analizie ciągów pomiarów ciśnień porowych z zastosowaniem funkcji odpowiedzi impulsowej (IRFA – Impulse Response Function Analysis) w funkcji zmienności poziomu zwierciadła wody w zbiorniku. Model IRFA jest modelem statystycznym, którego parametry posiadają ścisłe definicje fizyczne i pozwalają scharakteryzować zmienność wartości ciśnienia porowego. Przedstawiono również rozwiązanie ścisłe pozwalające na określenie wartości współczynnika dyfuzji hydraulicznej gruntu w funkcji wartości parametrów modelu. Opisano przykład zastosowania modelu do analizy zmienności ciśnień porowych zapory strefowanej. Otrzymane wyniki jednoznacznie pokazują poprawność przyjętych założeń, które umożliwiają odwzorowanie wszystkich kluczowych aspektów rozpatrywanego problemu przy zastosowaniu jego liniowego opisu.

**Abstract.** Effective control of dam safety requires that the measured pore-pressure data be interpreted in the shortest possible time following the readings. Direct resolution based on partial differential equations are not appropriate. We present a relevant formalism for analysing pore-pressure monitoring data: the Impulse Response Function Analysis (IRFA) method. The model based on approximations for the impulse response of the dam gives the variations in the pore-pressure measurement resulting from changes in the reservoir and rainfall levels. An expression for the explicit estimation of in situ hydraulic diffusivity is derived. The model were applied to the analysis of monitoring data obtained at a zoned earthdam. Obtained results proved that essential aspects of the observed phenomenon in most cells data can be described in this linear framework, and that they are taking into account.

### **1. Wprowadzenie**

Analiza ciągów pomiarowych z urządzeń kontrolno-pomiarowych zapór jest jednym z kluczowych elementów ich nadzoru. Typowym narzędziem wykorzystywanym do ich analizy statystycznej jest model HST (Hydrostatic-Season-Time - *Hydrostatyczny-Sezonowy-Czasowy*). Model ten, opracowany został w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku do analizy przemieszczeń reperów geodezyjnych zapór łukowych [1]. W późniejszym czasie model ten zaczął być również stosowany do modelowania zmienności zwierciadeł

piezometrycznych, ciśnień porowych oraz wydatków drenaży . Wieloletnia aplikacja modelu HST na kilkuset zaporach pokazuje że jest to bardzo dobre narzędzie analizy danych.

Niemniej, biorąc pod uwagę analizę ciśnień piezometrycznych, rozpatrywanie filtracji jako procesu dysypacyjnego powinno uwzględniać wpływ całej historii obciążeń na wartość ciśnienia w danym momencie, a nie tylko definiować korelację kolejnych pomiarów z kolejnymi wartościami obciążeń na co jedynie pozwala model HST.

Niedawno, opracowano relatywnie prosty model opóźnienia do symulacji wartości ciśnienia porowego w zaporze ziemnej i jej podłożu, w funkcji zmienności zwierciadła wody w zbiorniku oraz opadu [2, 3]. Model ten opiera się na przybliżeniu funkcji odpowiedzi impulsowej IRFA (Impulse Response Function Analysis) zaporę funkcją wykładniczą opóźnienia sygnału.

W artykule skupiono się na analizie przypadku wpływu zmienności poziomu wody w zbiorniku na zmienność ciśnień porowych, porównując dwa modele IRFA, jeden relatywnie prosty oraz drugi bardziej skomplikowany.

## 2. Konieczność zastosowania funkcji odpowiedzi impulsowej

Analiza ciągów danych pomiarowych powinna być realizowana okresowo, w niektórych przypadkach w stosunkowo krótkich odstępach czasu. Niejednokrotnie, zastosowanie w tym celu metod opierających się na równaniach różnicowych jak metody elementów lub objętości skończonych nie jest właściwe.

Aby zaobserwować i określić wartości nieodwracalnych zmian (procesy starzenia, erozji) w ciągach danych pomiarowych oraz ich trendy, w pierwszej kolejności należy oddzielić od nich zmienność spowodowaną obciążeniami zewnętrznymi, takimi jak poziom zwierciadła wody w zbiorniku lub opad atmosferyczny.

W przedstawionym w dalszej części artykułu modelu, do opisu zmienności ciśnień porowych w funkcji poziomu zwierciadła wody stosujemy funkcje odpowiedzi impulsowej. Jej zastosowanie w modelowaniu systemów liniowych, sieci elektrycznych, oraz w teorii analizy sygnału jest dobrze udokumentowane oraz efektywne. Proponowane podejście, pozwala na modelowanie danych bez konieczności znajomości wartości parametrów gruntu, czy też geometrii i rozkładu warstw lub lokalizacji nieciągłości w badanym ośrodku. Ponadto metoda ta umożliwia opracowanie efektywnych, szybkich algorytmów obliczeniowych. W modelu odpowiedzi impulsowej sygnał wejściowy (obciążenie)  $a(t)$  oraz sygnał wyjściowy (odpowiedź systemu)  $y(t)$  są połączone funkcją odpowiedzi impulsowej systemu  $h(t)$  :

$$y(t) = \int_0^t h(t-\tau)a(\tau)d\tau$$

Wynikające z przyjętej metodologii założenie, że zmienność ciśnień porowych w zaporze można opisać liniowo, wymaga spełnienia szeregu warunków pozwalających na zastosowanie funkcji odpowiedzi impulsowej.

Wartości danych pomiarowych są proporcjonalne do obciążeń. Całe opisywane zagadnienie może być opisane jako rezultat superpozycji. Dane pomiarowe stanowią sumę z odpowiedzi systemu na wszystkie obciążenia (o ile te istnieją). Odpowiedź na sygnał sinusoidalny jest również opisana sinusoidą (poprzez akomodację) która posiada ten sam okres, ale różną fazę (efekt opóźnienia) i różną amplitudę (efekt tłumienia).

## 3. Analizy pomiarów ciśnień piezometrycznych modelem IRFA

Zmienność ciśnienia porowego w procesie filtracji można opisać równaniem parabolicznym. Rozwiązanie tego typu równania może być przedstawione jako funkcja warunków

brzegowych oraz początkowych, zdefiniowane w wyrażeniach funkcji Greena powiązanej z danym zagadnieniem brzegowym. Taka reprezentacja jest równoważna tzw. opisowi zewnętrznemu (external description) w którym to odpowiedź impulsowa systemu może być wyrażona w wyrażeniach funkcji Greena. Metodologia ta jest dobrze udokumentowana i potwierdzona licznymi aplikacjami [5]. Jednak, w przypadku gdy funkcja Greena jest nieznana lub jej aplikacja jest numerycznie skomplikowana, można zastosować klasyczną metodę używaną w praktyce analizy sygnału w której funkcja impulsowa jest opisana w sposób przybliżony. Powyższa metodologia została zastosowana do stworzenia przedstawionego w artykule modelu.

W omawianym modelu, analiza ciśnień porowych jest możliwa dla okresu pomiarów w którym wpływ zmienności ciśnień porowych związanych z pierwszym napełnieniem zapory jest zanedbywalnie mały. Zakładamy, że na ciśnienie porowe  $P(t)$  wpływa zmiana położenia zwierciadła wody w zbiorniku oraz czas. Tak zdefiniowany model IRFA ma postać:

$$P(t) = C + H(t) + T(t)$$

gdzie:  $C$  jest stałą,  $H(t)$  opisuje wpływ zmiany zwierciadła wody w zbiorniku.

Zmienna  $T(t)$  określa efekt wpływu zmienności w czasie (trend, dryf). Jej szczegółowy opis jest poza przedmiotem niniejszego artykułu.

Najprostszym przybliżeniem funkcji odpowiedzi impulsowej jest dwuparametryczna  $(\alpha, \eta)$  funkcja wykładnicza w postaci:

$$H(t) = \frac{\alpha}{\eta} \int_0^t \exp\left(-\frac{t-\tau}{\eta}\right) \Delta Z(\tau) d\tau$$

gdzie  $\Delta Z(t) = Z(t) - Z_{min}$ ,  $Z(t)$  opisuje zmienność położenia zwierciadła wody w zbiorniku, a  $Z_{min}$  jest minimalnym poziomem piętrzenia,  $\alpha$  współczynnikiem tłumienia (bezwymiarowym) a  $\eta$  definiuje charakterystyczny czas dyfuzji dla danego punktu pomiarowego.

W przypadku zastosowania funkcji skoku do opisu zmienności poziomu zwierciadła wody, powstałe równanie definiujące powyższy model będzie identyczne z następującym modelem autoregresji i średniej ruchomej (ARMA – Autoregressive Moving Average):

$$H^{n+1} = (1 - \theta_1)H^n + \theta_1 \left[ \theta_2 \Delta Z^{n+1} + (1 - \theta_2) \Delta Z \right], \theta_1 = 1 - \exp^{-\Delta t^n / \eta}, \theta_2 = \frac{1}{\theta_1} - \frac{\eta}{\Delta t^n}$$

Modele ARMA są bardzo użyteczne w zakresie badania serii czasowych. Są one stosowane w wielu dziedzinach, jednakże do tej pory były używane sporadycznie w analizie pomiarów z systemów technicznej kontroli zapór.

Aby sprawdzić poprawność odwzorowania pomiarów opisanym powyżej modelem (nazwijmy go modelem IRFA#1), porównamy otrzymane rezultaty z bardziej zaawansowanym modelem trzyparametrycznej funkcji odpowiedzi impulsowej  $(\alpha, \eta, \sigma)$  (nazwijmy go modelem IRFA#2), który daje wyniki prawie identyczne ze ścisłym rozwiązaniem liniowego zagadnienia dyfuzji,

$$H(t) = \frac{\alpha}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^t \left(\frac{t}{\eta}\right)^{-3/2} \exp\left[-\frac{\eta}{2t} \left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right)^2\right] \Delta Z(\tau) d\tau$$

gdzie trzeci parametr  $\sigma$  jest również zdefiniowany jako charakterystyczny czas dyfuzji, ale którego szczegółowy opis nie jest prezentowany w niniejszym artykule.

#### 4. Interpretacja parametrów

Współczynnik  $\eta$  jest zdefiniowany jako charakterystyczny czas dyfuzji: wynikający z „pamięci” systemu dotyczącej przeszłych wartości, obciążeń w serii czasowej. Rolę tego parametru można wyjaśnić metodą analizy harmonicznej: jeśli  $\Delta Z(t) = \sin(\omega t)$ , wtedy  $H(t) \approx a \sin[\omega(t - \eta)]$  przy wolnej zmienności obciążeń ( $(\omega\eta)^2 \ll 1$ ). Charakterystyczny czas  $\eta$  określa czas który upłynął pomiędzy momentem przyłożenia obciążenia i odpowiedzi systemu w punkcie pomiarowym, a bezwymiarowy parametr  $\alpha$  charakteryzuje tłumienie sygnału.

Analiza rozwiązania ścisłego analizowanego problemu dla odpowiednio sformułowanych warunków brzegowych prowadzi do następujących rezultatów [3]:

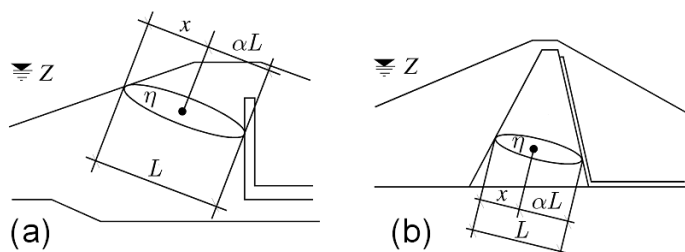
$$\alpha = 1 - \frac{x}{L}, \eta = \frac{x}{6L} \left( 2 - \frac{x}{L} \right) T, T = \frac{L^2}{D} \quad (1)$$

gdzie  $x$  jest średnią odległością pomiędzy czujnikiem pomiarowym a granicą przyłożenia obciążenia (skarpa odwodna),  $L$  jest średnią długością ścieżki filtracji pomiędzy punktem przyłożenia obciążenia a punktem wyjścia sygnału z systemu (drenaż lub skarpa odpowietrzna) (Rys.1),  $T$  jest charakterystycznym czasem dyfuzji przez zaporę, a  $D$  jest współczynnikiem dyfuzji. Współczynnik  $\alpha$  zbliżony do jedności oznacza albo lokalizację czujnika w pobliżu skarpy odwodnej ( $x$  ma małą wartość) albo znaczne oddalenie punktu wyjścia od skarpy odwodnej ( $L$  ma dużą wartość). Duże wartości czasu  $\eta$  oznaczają bardzo nieprzepuszczalny grunt albo długi dystans  $L$ .

Ostatecznie, wykorzystując parametr  $\eta$ , można sformułować równanie pozwalające obliczyć wartość współczynnika dyfuzji:

$$D = \frac{(1 - \alpha^2) L^2}{6\eta} \quad (2)$$

Współczynnik dyfuzji można zdefiniować jako  $D = k/c$  gdzie  $k$  jest przewodnością hydrauliczną a  $c$  jest pojemnością wodną. Strefy nienasycone posiadają pewną, niezerową pojemność wodną. W takiej strefie, wzrost wartości ciśnień porowych związany jest z siłami ssania i podciągania kapilarnego. Tłumaczy to istnienie opóźnienia w odpowiedzi ciśnień porowych ośrodka nienasyconego na zmianę poziomu zwierciadła wody w zbiorniku, rejestrowanych kolejnymi czujnikami zlokalizowanymi w strefie nienasyconej korpusu zapory.



**Rys1.** Interpretacja parametrów  $\alpha$  jako funkcji  $x$  i  $L$  dla zapory jednorodnej z drenażem (a) oraz dla zapory z rdzeniem (b)

Z drugiej strony w ośrodku porowatym położonym poniżej krzywej swobodnego zwierciadła wody, w tak zwanej strefie nasyconej, w porach gruntu znajduje się płyn porowy który może

być mieszaniną nieściśliwej wody oraz ściśliwych pęcherzyków gazu. Ostatecznie, ściśliwość płynu porowego może mieć decydujące znaczenie dla przebiegu zmiany ciśnienia w ośrodku. St-Arnaud [6] zwrócił w szczególności uwagę na to że woda porowa może zawierać powietrze uwięzione w czasie konstrukcji zapory, które jest częściowo sprężone oraz częściowo rozpuszczone. Inną przyczyną obecności powietrza w porach gruntu jest proces infiltracji wody ze zbiornika w korpus zapory nasyconej powietrzem przy ciśnieniu które może być inne niż ciśnienie atmosferyczne [7],[8]. Kiedy wzrasta ciśnienie wody, powietrze jest sprężane (prawo Boyla) i częściowo rozpuszczane (prawo Henryego). Natomiast kiedy woda znajdzie się w strefie o niższym ciśnieniu, przemieszczając się wraz z wodą w kierunku strefy odpowietrznej korpusu, powietrze jest uwalniane z roztworu.

## 5. Zastosowanie modelu do analizy ciśnień porowych

W poniższym rozdziale prezentujemy analizę modelem IRFA pomiarów ciśnień porowych zrealizowanych w zaporze ziemnej o wysokości 42m, posiadającej rdzeń łożowy oraz poziomy drenaż materacowy. Zapora posadowiona jest na podłożu skalnym, w którym wykonano przesłone iniekcyjną na głębokość około 25m. Rysunek 2 przedstawia sytuację zapory oraz jej trzy pionowe przekroje w których zainstalowanych zostało 14 czujników ciśnienia porowego. Dane pomiarowe poziomów zwierciadła wody w zbiorniku obejmują okres prawie dziesięciu lat (3175 dni) pracy zapory od momentu pierwszego napełnienia. Poziom wody w zbiorniku podlegał cyklicznym zmianom (Rys.3), z okresem w przybliżeniu jednego roku ( $\omega \approx 2\pi/365$  w dniach<sup>-1</sup>). Analizowany okres czasu obejmuje trzy lata pracy obiektu (1175 dni). Analiza zaczyna się od czasu  $t_0=2000$  dni, po pierwszym napełnieniu zapory. Przyjęto że jest to wystarczająco długi czas aby wpływ warunków początkowych wynikających z pierwszego napełnienia był zanedbywalnie mały. Pomiarów ciśnień porowych były realizowane średnio raz na pięć dni i obejmują po 167 wartości dla każdej z analizowanych serii danych.

Otrzymane rezultaty zostały zestawione w Tabeli 1 dla wykładniczego modelu IRFA#1, oraz dla bardziej złożonego modelu IRFA #2. Z wyjątkiem czujnika CV11, otrzymane wartości parametrów  $\alpha$  i  $\eta$  były bardzo zbliżone dla obu modeli. Rezultaty te wskazują na następujące cechy: 1) amplituda odpowiedzi systemu  $\alpha$  maleje wraz z oddalaniem się od skarpy odwodnej, 2) czas odpowiedzi systemu  $\eta$  wzrasta w kierunku skarpy odpowietrznej. Charakterystyczny czas dyfuzji  $T$  został wyprowadzony z równania (1) i wynosi  $T = 6\eta/(1 - \alpha)^2$ . Czas ten zmienia się od 48 do 506 dni. Wartość współczynnika dyfuzji obliczona równaniem (2) wynosi od  $0,3 \cdot 10^{-5}$  do  $20 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

Uzyskane odwzorowania analizowanych danych przedstawiają Rysunki 4,5 oraz 6. Oba modele IRFA dobrze odwzorowują pomiary z czujników CV24 oraz CV10 (Rysunki 4 oraz 5), ale dały słabe dopasowanie dla CV11 (Rysunek 6). Ten czujnik, podobnie jak czujnik CV05 oraz CV31 są zlokalizowane najdalej od skarpy odwodnej. W konsekwencji, można stwierdzić że im dalej punkt znajduje się od miejsca wystąpienia wymuszenia, tym analiza będzie trudniejsza.

Uzyskane rezultaty prezentują typową histerezę powstałą w wyniku kolejnych cykli podnoszenia i opadania poziomu zwierciadła wody jak również wynikającą z opóźnienia odpowiedzi ośrodka porowego. Z tego powodu, można zaobserwować że dla części pomiarów wzrost wartości ciśnień porowych występuje w czasie obniżania się poziomu zwierciadła wody i na odwrót. To bardzo dobrze znane zjawisko było obserwowane in-situ [9], [10], jak również zostało odtworzone w warunkach laboratoryjnych [11].

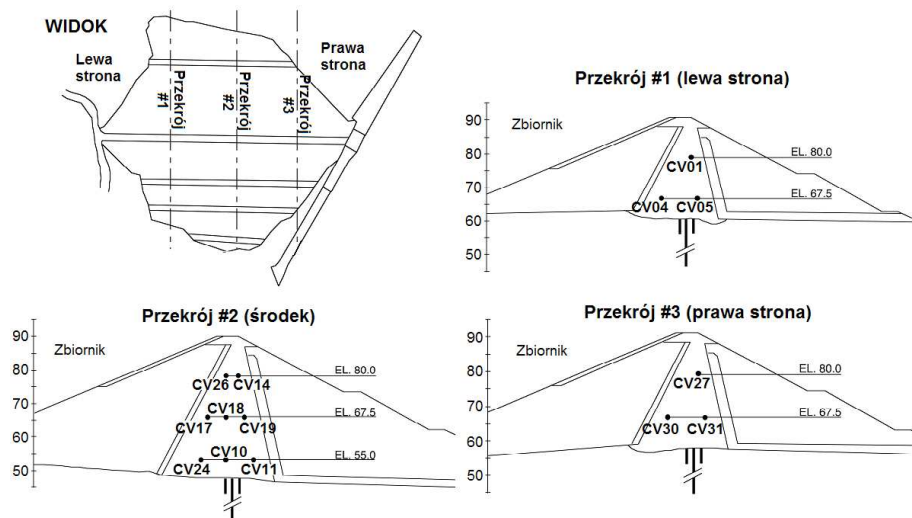
Pomimo zastosowania trzeciego parametru  $\sigma$ , bardziej rozwinięty model IRFA #2 nie odwzorowuje danych znacząco lepiej niż model IRFA #1. Fakt ten spowodowany jest przede wszystkim stosunkową wolną zmianą położenia poziomu zwierciadła wody w porównaniu z wartościami charakterystycznego czasu dyfuzji. Pomimo że model IRFA #1 nie odwzorowuje wpływu wysokich harmonicznym obciążeń, to jednak poprawnie odwzorowuje

zachowanie się ciśnień porowych w niskich częstotliwościach ( $\omega T < 1$  do 10 w zależności od lokalizacji punktu x) [3].

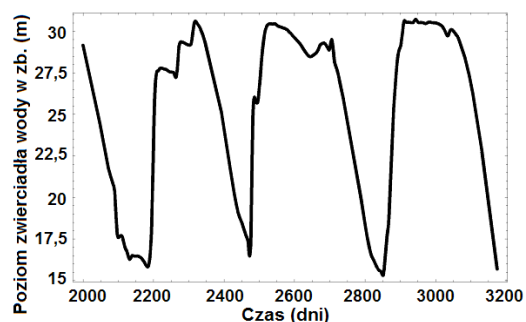
W praktyce, główny zakres częstotliwości określających zmienność poziomu zwierciadła wody w zaporze ziemnej jest relatywnie wolny w stosunku do charakterystycznego czasu dyfuzji. W podsumowaniu można stwierdzić, że zaprezentowany wykładniczy model opóźnienia IRFA jest w pełni wystarczający dla aplikacji inżynierskiej aby modelować zmienność ciśnienia porowego w czasie w funkcji zmienności poziomu zwierciadła wody w zbiorniku.

IRFA #1						IRFA #2						
Data	$R^2$ (%)	$\alpha$	$\eta$ (dni)	$T$ (dni)	$D$ ( $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Data	$R^2$ (%)	$\alpha$	$\eta$ (dni)	$\sigma$ (dni)	$T$ (dni)	$D$ ( $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ )
<b>Lewa strona</b>						<b>Lewa strona</b>						
CV01	82	0.15	26	163	0.4	CV01	91	0.15	29	20	179	0.3
CV04	99	0.78	8	128	3.1	CV04	99	0.77	8	5	121	3.3
CV05	95	0.30	32	210	2.0	CV05	99	0.28	30	16	200	2.1
<b>Środek</b>						<b>Środek</b>						
CV26	90	0.51	6	48	1.0	CV26	90	0.51	6	2	50	0.9
CV14	92	0.37	22	156	0.7	CV14	93	0.37	23	20	163	0.7
CV17	99	0.89	3	83	19.4	CV17	99	0.89	2	2	81	19.9
CV18	99	0.72	9	116	10.8	CV18	99	0.73	9	12	127	9.9
CV19	98	0.43	21	156	3.9	CV19	99	0.42	20	19	151	4.0
CV24	99	0.85	7	150	18.9	CV24	99	0.85	7	7	153	18.5
CV10	98	0.64	27	273	6.3	CV10	99	0.60	26	17	249	6.9
CV11	87	0.37	73	506	2.7	CV11	97	0.28	55	28	362	3.7
<b>Prawa strona</b>						<b>Prawa strona</b>						
CV27	84	0.26	8	56	1.4	CV27	84	0.26	9	4	59	1.4
CV30	99	0.84	8	175	4.3	CV30	99	0.84	8	5	164	4.6
CV31	97	0.50	32	258	3.2	CV31	99	0.47	30	18	234	3.5

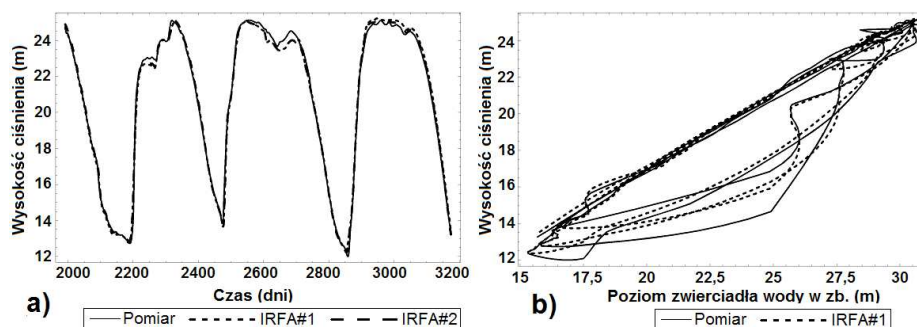
Tabela 1. Rezultaty analizy modelami IRFA pomiarów z czujników ciśnienia



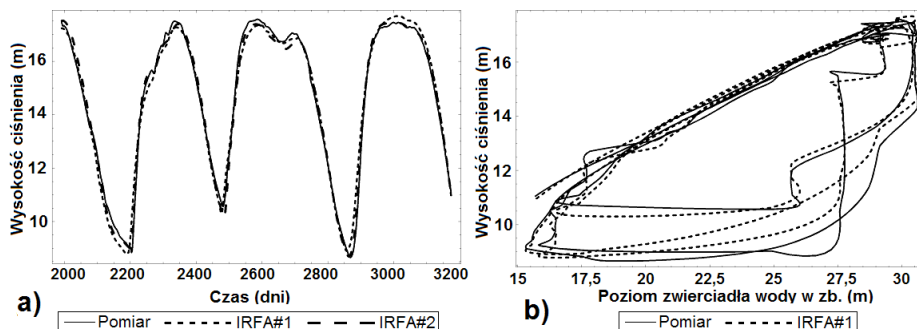
Rys 2. Widok oraz przekroje zapory z zaznaczoną lokalizacją czujników ciśnienia.



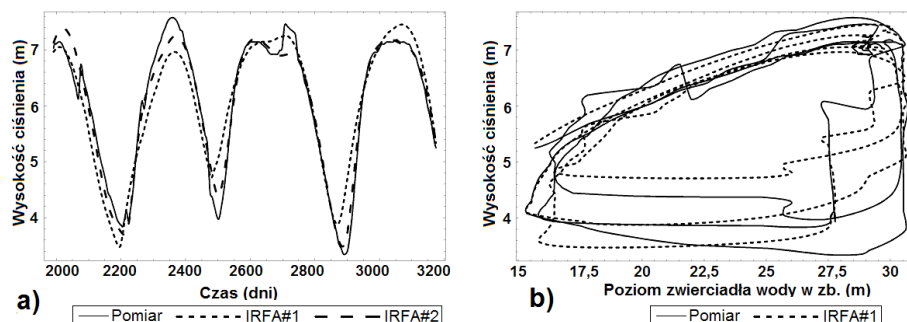
Rys 3. Poziom zwierciadła wody w zbiorniku.



**Rys 4.** Czujnik CV24, ciśnienia piezometryczne w funkcji czasu (a – porównanie modeli IRFA) i położenia zw. wody w zbiorniku (b)



**Rys 5.** Czujnik CV10, ciśnienia piezometryczne w funkcji czasu (a – porównanie modeli IRFA) i położenia zw. wody w zbiorniku (b)



**Rys 6.** Czujnik CV11, ciśnienia piezometryczne w funkcji czasu (a – porównanie modeli IRFA) i położenia zw. wody w zbiorniku (b)

## 6. Wnioski

Przedstawiony w artykule model Analizy Opóźnionej Funkcji Impulsowej (IRFA) służy do analizy pomiarów ciśnień porowych zapory ziemnej. Model odwzorowuje kluczowe aspekty efektu opóźnienia: dysypacje oraz akomodacje (opóźnienie, tłumienie) pod wpływem cyklicznych obciążeń, a także uwzględnia oddziaływanie historii obciążeń na wartość mierzonych ciśnień porowych.

Zaproponowano w pracy przybliżone równanie określające współczynnik dyfuzji. Charakterystyczny czas dyfuzji może w zaporach ziemnych wynosić od kilku dni do kilku miesięcy. Wartości współczynnika dyfuzji dla analizowanego przypadku zapory ziemnej wynosiła pomiędzy  $10^{-5}$  a  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

Przedstawiony model IRFA wykorzystujący funkcje wykładniczą do przybliżenia odpowiedzi opóźnionej systemu działa bardzo dobrze. Pokazano że przy zastosowaniu opisu w czasie dyskretnym, model jest identyczny z modelem typu ARMA. Otrzymane wyniki pokazują

nowe perspektywy w zastosowaniu przedstawionych nowoczesnych metod obliczeniowych również do analizy danych pomiarowych z systemów technicznej kontroli zapór.

## **Bibliografia**

1. Ferry S., Willm G. *Méthodes d'analyse et de surveillance des déplacements observés par le moyen de pendules dans les barrages*. 6th International Congress on Large Dams, New-York, Vol. II, ICOLD, pp.1179-1201, 1958.
2. Bonelli S., Royet P. *Delayed response analysis of dam monitoring data*, ICOLD European Symposium, Dams in a European Context, Geiranger, 25-27 June, pp. 91-99, 2001.
3. Bonelli S., *Analyse retard des mesures d'auscultation de barrages*, Revue Française de Géotechnique, no 105, 31-45, 2003.
4. Bonelli S., Félix H. *Interpretation of measurement results, delayed response analysis of temperature effect*, 6th ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, Oct 17-19, Salzburg, 2001.
5. Beck J.V., Cole K.D., Haji-Sheikh A., Litkouhi B. *Heat Conduction Using Green's Functions, Hemisphere*, Washington, DC, 1992.
6. St-Arnaud G. *The high pore pressures within embankment dams: an unsaturated soil approach*. Canadian Geotechnical Journal, no 32, 892-898, 1995.
7. Le Bihan J-P., Leroueil S. *A model for gas and water through the core of earth dams*. Canadian Geotechnical Journal, no 39, pp. 90-102, 2002.
8. Billstein M., Svenson U. *Air bubbles – a potential explanation of the unusual pressure behaviour of the core at WAC Bennet dam*, XXth International Congress on Large Dams, Beijing, Vol. III, ICOLD, pp. 369-384. 2000.
9. Kjaernsli B., Kvale G., Lunde J., Baade-Mathiesen J. *Design, construction, control and performance of the Svartevann earth-rockfill dam*. XIVth International Congress on Large Dams, Rio de Janeiro, Vol. IV, ICOLD, pp. 319-349. 1982.
10. Myrvoll F., Larsen S., Sande A., Romsol N.B. *Field instrumentation and performance observations for the Vatnedalsvatn dams*, XVth International Congress on Large Dams, Lausanne, Vol. I, ICOLD, pp. 1039-1069, 1985.
11. Windisch E., Hřeg K. *Pore pressure in the till core of Oddatjorn dam*. 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal, 2000, pp. 231-238.

### **dr hab. Stéphane Bonelli**

Cemagref, Aix-en-Provence, Francja,  
Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques  
3275 Route de Cezanne, CS 40061  
13182 Aix-en-Provence Cedex 5, FRANCE  
Tel: +33 04 42 66 99 53, stephane.bonelli@cemagref.fr

### **dr inż. Krzysztof Radzicki**

Politechnika Krakowska,  
Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej,  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, POLSKA  
Tel: +48 12 628 28 53, radzicki@hotmail.fr