

# APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

## Pomiary toru i prędkości zjazdu w basenowych zjeżdżalniach wodnych

ZBIGNIEW JURA, PIOTR SZCZEPANIAK, RYSZARD WALENTYŃSKI  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, WYDZIAŁ BUDOWNICTWA

### Streszczenie

Artykuł skrótowo przedstawia sposób pomiaru toru i prędkości zjazdu basenową zjeżdżalnią wodną. Badania te zostały wykonane w celu kalibracji i walidacji numerycznego modelu ruchu, wykorzystywanego do oceny bezpieczeństwa zjeżdżalni. W niniejszej pracy została opisana unikalna aparatura badawcza oraz procedura i wyniki przeprowadzonych pomiarów.

### Measurements of trajectory and velocity of a ride inside a water slide

### ABSTRACT

The article is a brief description of measurements of rides inside a water slide, performed for the purpose of calibration and validation of a numerical model of motion. It presents the unique instruments together with the procedure and results of measurements.

## 1. WSTĘP

W ciągu ostatniej dekady nastąpił w Polsce gwałtowny rozwój infrastruktury związanej ze sportem, turystyką i rekreacją. Jednymi z najbardziej pożądanych przez inwestorów obiektów są różnej wielkości pływalnie kryte i otwarte oraz tzw. parki wodne, oferujące oprócz basenów pływackich różne atrakcje wodne. Do najpopularniejszych atrakcji basenowych należą zjeżdżalnie wodne, stanowiące niekiedy całe kompleksy urządzeń o różnej konstrukcji i geometrii, od najprostszyc zjeżdżalni dla dzieci po wyrafinowane obiekty dla amatorów mocnych wrażeń. Niestety są to też urządzenia, które w przypadku nieprzestrzegania zasad bezpiecznego użytkowania lub niewłaściwie zaprojektowanej geometrii ślizgu przestają być źródłem rozrywki, a stają się poważnym zagrożeniem zdrowia i życia osób zjeżdżających.

Problem bezpieczeństwa zjeżdżalni wodnych był jednak dotychczas z naukowego punktu widzenia bagatelizowany, czego dowodem jest bardzo skromna literatura dotycząca projektowania zjeżdżalni wodnych. Oprócz odpowiedniej normy [1] można wymienić praktycznie tylko dysertacje doktorskie Sung-Hwan Joo [2] oraz Piotra Szczepaniaka [3]. Przytoczona norma jest jednak bardzo ogólnikowa w zakresie tego, jak należy kształtować geometrię zjeżdżalni pomiędzy jej strefami startu i lądowania, ograniczając się praktycznie do podania wymaganych średnic przekroju poprzecznego oraz dopuszczalnych przeciążeń, mogących działać na osobę zjeżdżającą. Brak w niej natomiast wytycznych, jak należy projektować np. połączenie zakrętów o przeciwnej krzywiznie. Problem ten został częściowo rozwiązany w pracy Sung-Hwan'a, jednak przedstawiony w niej model ruchu w zjeżdżalni jest bardzo prymitywny, a uzyskane wyniki niezwyfikowane doświadczalnie.

W zakresie pomiarów ruchu podczas kontrolnych badań odbiorowych zjeżdżalni norma [1] jest prawie równie lakoniczna jak w temacie wytycznych projektowych, proponując wykonanie 10 ześlizgów we wszystkich dozwolonych pozycjach, a jedynym wymaganiem wobec tzw. eksperta jest to, aby był sprawny fizycznie i ubrany w kostium kąpielowy. Podczas tych badań powinno się mierzyć średnią prędkość zjazdu oraz ocenić, czy występują poważne zagrożenia bezpieczeństwa, takie jak utrata kontroli nad zjazdem, problemy z zatrzymaniem czy ryzyko kolizji pomiędzy kolejnymi użytkownikami wskutek znacznej różnicy prędkości i zbyt małych odstępów czasowych. Wyniki takich pomiarów, przeprowadzonych na grupie 250 przypadkowych osób zostały

opublikowane przez Ball'a w [4]. Wszystkie te badania miały jednak zbyt małą dokładność i szczegółowość aby nadawały się do kalibracji komputerowego modelu ruchu, opisanego w wyżej wymienionej pracy doktorskiej [3]. Wobec tego zdecydowano się na opracowanie własnej metody przeprowadzenia pomiarów ruchu *in situ*, w tym zaprojektowania i wykonania unikalnej aparatury pomiarowej oraz sposobu obróbki wyników.

## 2. APARATURA POMIAROWA

W celu realizacji pomiaru i rejestracji przejazdu osoby zjeżdżalnią wodną została opracowana i wykonana specjalistyczna aparatura pomiarowa. Założenia wykonawcze przewidywały spełnienie następujących postulatów:

- Pomiar w środowisku wodnym (wodoszczelność i odporność na trudne warunki klimatyczne aparatury).
- Pomiar wykonany w trakcie normalnej eksploatacji zjeżdżalni i bez jej modyfikacji technicznej (wykluczało to trwałe umieszczanie czujników, lub naruszanie konstrukcji).
- Mobilność aparatury, możliwość wykonywania pomiarów w warunkach terenowych przy możliwie małym nakładzie sił i środków.
- Dokładność rejestracji przebiegu wzdłuż toru jazdy, oraz położenie względem osi toru.

Po przeanalizowaniu możliwych rozwiązań wybrano następującą konfigurację:

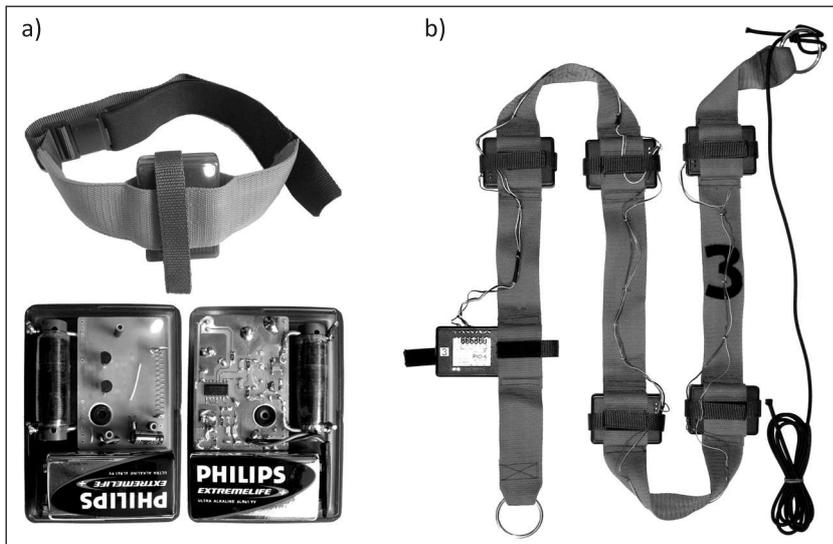
- Obiekt pomiaru (człowiek) został wyposażony w niewielki nadajnik radiowy (Rys. 1). Ruch nadajnika śledzony jest poprzez odbiorniki umieszczone na trasie przejazdu w ściśle określonych miejscach. Sygnały z odbiorników są zbierane poprzez odpowiednią sieć transmisji danych do komputera, gdzie są rejestrowane i obrazowane. Do połączenia czujników wykorzystano magistralę danych RS-485 jako najprostszą w realizacji (wymagane tylko dwa przewody i zasięg praktycznie do kilkuset metrów zależnie od szybkości transmisji).
- Dla nadajnika wybrano częstotliwość pracy około 65 kHz w niewykorzystywanym do celów radiowych paśmie fal o niskiej częstotliwości. Częstotliwość ta jest mało wrażliwa na tłumienie od wody, oraz przeszkód takich jak elementy z tworzyw sztucznych czy ceramiki oraz betonu. Nadajnik wytwarza niemodulowany sygnał o częstotliwości nośnej wzbudzany w układzie rezonansowym złożonym z cewki powietrznej i kondensatora. Częstotliwość jest stabilizowana

kwarcem. Dodatkowo nadajnik wyposażono w wyłącznik wstrząsowy, aby zapewnić automatyczne uruchomienie, oraz w hermetyczną obudowę o wymiarach około 9 x 6 x 2 cm.

- Odbiornik – detektor, składa się z układu rezonansowego z cewki i kondensatora, wzmacniacza, detektora oraz dyskryminatora, który wykrywa przekroczenie zadanego poziomu sygnału. Cewka wykonana została w technologii druku bezpośrednio na płytce drukowanej z układem elektronicznym. Dyskryminację i wzmocnienie sygnału wyjściowego zapewnia wzmacniacz operacyjny. Całość została umieszczona w niewielkiej obudowie o wymiarach około 9 x 6 x 2 cm.

Taka konfiguracja w połączeniu z układem odbiornika i detektora z dyskryminatorem zapewnia sygnał w postaci podwójnego impulsu z krótką przerwą w momencie przejścia nadajnika nad odbiornikiem. Pozwala to na bardzo precyzyjne wyznaczenie tego momentu.

Szerokość impulsów dodatkowo niesie z sobą informacje o sile sygnału, przy założeniu stałej prędkości przemieszczania się nadajnika. W przypadku pomiaru grupy odbiorników w jednym przekroju umożliwia to wyznaczenie położenia poprzecznego względem powierzchni wewnętrznej toru zjeżdżalni. Przebieg sygnałów w odbiorniku dla przykładowego zdarzenia pokazano na Rysunku 3.

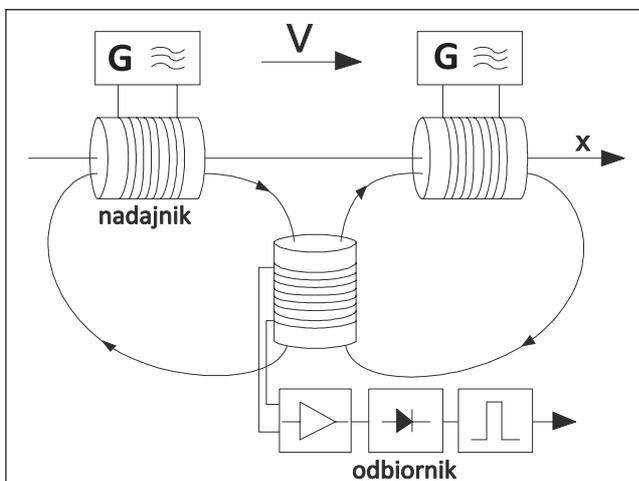


Rysunek 1. Nadajnik (a) i opaska z zestawem detektorów (b)

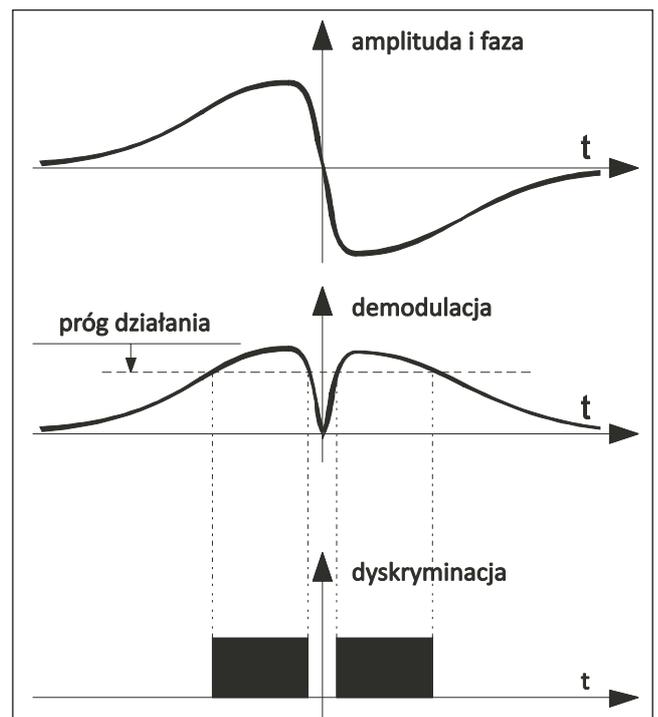
Detektory zostały umieszczone w grupach po 5 na kolejnych przekrojach rury zjeżdżalni. Progi zadziałania zostały skalibrowane w każdej grupie tak, aby podczas przejścia nadajnika zadziałały tylko jeden lub dwa detektory, w zależności od położenia nadajnika (Rys. 4). Sygnały z detektorów zostały podłączone do układu mikrokontrolera współpracującego z magistralą do przesyłu danych cyfrowych (Rys. 5).

Zadaniem poszczególnych modułów mikroprocesorowych było rejestrowanie zdarzeń wykrytych przez detektory, zapamiętanie ich i wysłanie do komputera nadrzędnego. Każdy z

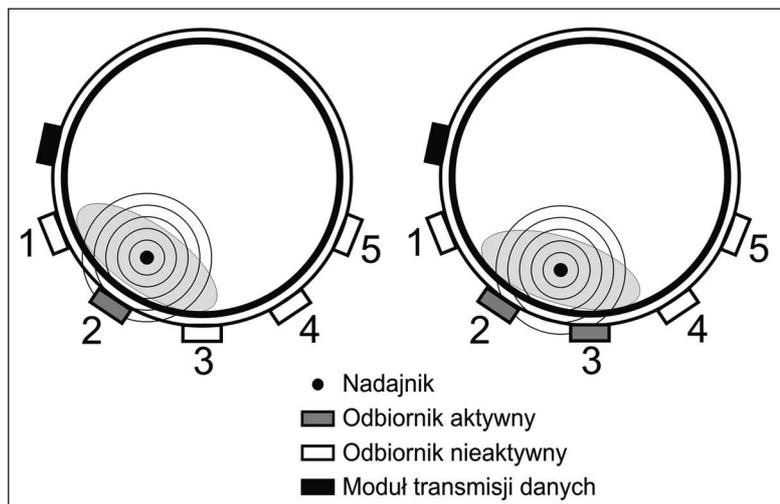
Osie cewek nadajnika i odbiornika zostały ustawione w układzie pomiarowym pod kątem prostym. Dzięki temu w momencie przejścia cewki nadajnika nad cewką odbiornika następuje zmiana fazy odbieranego sygnału. Pokazane to zostało schematycznie na Rysunku 2.



Rysunek 2. Położenie nadajnika i odbiornika w trakcie pomiaru ruchu nadajnika



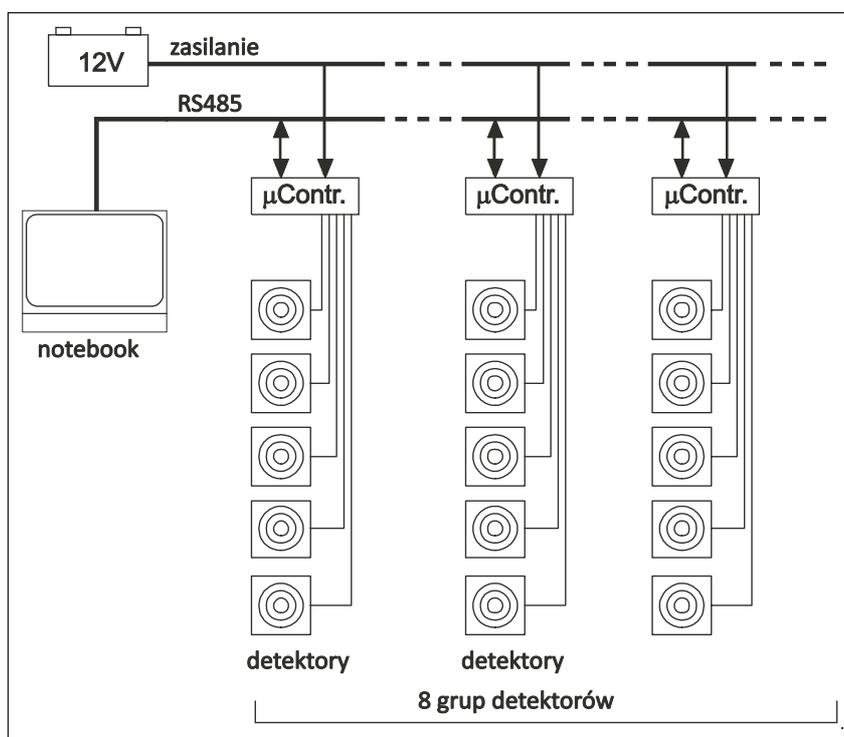
Rysunek 3. Przebiegi sygnału w detektorze i dyskryminatorze



Rysunek 4. Schemat detekcji położenia nadajnika w obrębie przekroju poprzecznego zjeżdźalni

przesyłają dane do komputera tylko o zaistniałych zdarzeniach. Zmniejsza to radykalnie konieczną przepustowość systemu, przy zachowaniu wymagań dotyczących dokładności czasowej pomiaru. Komputer, jako jednostka nadrzędna „odpytuje” poszczególne moduły mniej więcej, co sekundę i rejestruje otrzymane dane. Prawidłowość odczytanych danych jest weryfikowana każdorazowo za pomocą odpowiednich sum kontrolnych.

Zarejestrowane w trakcie pomiaru dane zapisywane są na dysku komputera w postaci pliku tekstowego. Tak zarejestrowane dane mogą być dowolnie przenoszone do innych programów.

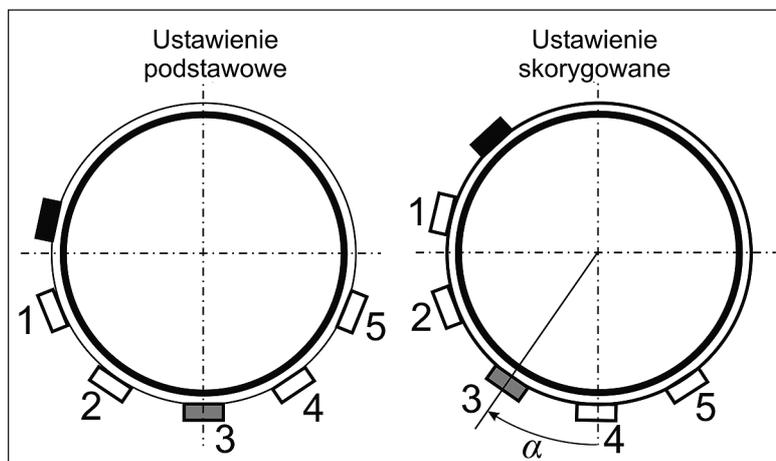


Rysunek 5. Konfiguracja systemu pomiarowego

### 3. PRZEBIEG I WYNIKI POMIARÓW

Pomiary ruchu w ramach pracy doktorskiej [3] przeprowadzono dwukrotnie. Za pierwszym razem pomiary wykonano na basenie w Gliwicach przy ul. Warszawskiej 35. Brało w nich udział troje ochotników i miały na celu sprawdzenie aparatury badawczej oraz dopracowanie procedury pomiarów. Podczas analizy zapisanych wyników wyciągnięto wnioski, iż konieczna jest bardzo skrupulatna kontrola nad tym, w jakiej kolejności poszczególni ochotnicy wykonują swoje zjazdy oraz że w niektórych przekrojach kontrolnych, zwłaszcza tych umiejscowionych na zakrętach o niewielkim promieniu krzywizny, niezbędna jest korekta położenia opasek pomiarowych poprzez obrót o

modułów został wyposażony w zegar kwarcowy zapewniający niezbędną dokładność pomiaru czasu. W momencie uruchomienia pomiaru zegary we wszystkich modułach zostają wyzerowane. Moduły zostały połączone dwukierunkową magistralą danych typu RS-485. Zapewnia ona przesył danych z szybkością do 19200 bitów na sekundę w powyższej konfiguracji. Ponieważ wymagana dokładność pomiaru czasu zdarzenia wynosi 0,01 s nie byłoby możliwości przesyłania danych z poszczególnych czujników w trybie ciągłym. Funkcję buforów pełnią moduły mikroprocesorowe, które



Rysunek 6. Podstawowe i skorygowane ustawienie czujników – przykład dla zakrętu w prawo

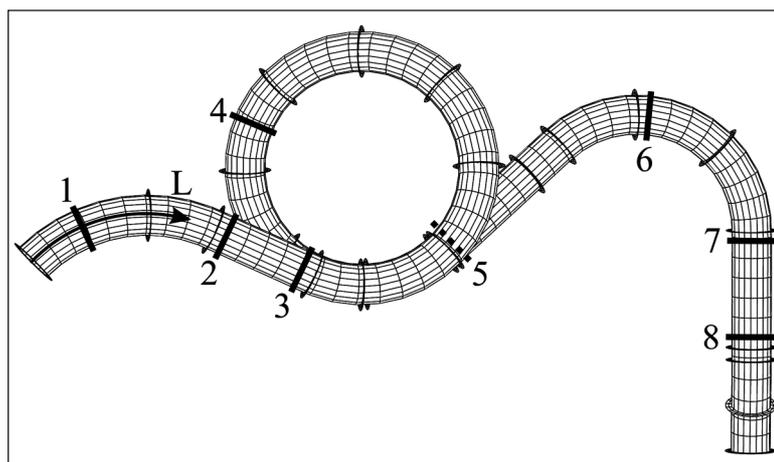
kąt odpowiadający rozstawowi czujników w kierunku zewnętrznej części łuku (Rys. 6).

Główne pomiary ruchu przeprowadzono na zjeździe wodnej usytuowanej przy basenie krytym w Rudzie Śląskiej, ul. Chryzantem 10 (Rys. 7). Została ona wybrana ze względu na niewielką odległość od macierzystej uczelni Autorów oraz wygodny dostęp

w celu montażu czujników. Zjeżdżalnia ta ma długość 46,35 m, średnie nachylenie 15,75 % oraz średnicę wewnętrzną równą 1,00 m – wymiary te kwalifikują ją do typu 4 wg normy [1]. Na Rysunku 8 oraz w Tabeli 1 podano położenie kolejnych przekrojów poprzecznych, wokół których były założone opaski z czujnikami, wraz z ewentualną korektą ustawienia.



Rysunek 7. Zjeżdżalnia wodna w Rudzie Śląskiej



Rysunek 8. Położenie zestawów czujników na długości zjeżdżalni

Tabela 1. Umieszczenie zestawów czujników ruchu na długości zjeżdżalni

Nr zestawu $i$	1	2	3	4	5	6	7	8
Położenie na osi $L_i$ [m]	1,46	5,08	7,11	21,74	29,78	36,12	40,85	43,33
Korekta ustawienia $\alpha$ [°]	0	0	0	- 35	- 35	+ 35	+ 35	0

Tabela 2. Dane uczestników badań głównych

Ochotnik	Masa $m$ [kg]	Wzrost $h$ [m]	BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	Płeć
A	60,0	1,78	18,9	kobieta
B	81,5	1,90	22,6	mężczyzna
C	63,5	1,76	20,5	mężczyzna
D	99,0	1,72	33,5	mężczyzna
E	115,0	1,85	33,6	mężczyzna
F	52,0	1,62	19,8	kobieta

W pomiarach głównych wzięło udział sześćcioro ochotników, głównie pracowników Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Ich masę, wzrost, obliczony wskaźnik masy ciała oraz płeć zamieszczono w Tabeli 2.

W czasie badań głównych łącznie wykonano 68 pomiarów. Dla każdego zjazdu zarejestrowano, które czujniki zostały aktywowane w kolejnych przekrojach oraz obliczono czas minięcia danego przekroju ( $t_i$ ) jako średnią z czasów aktywacji i deaktywacji detektorów

(do 8 odczytów czasu na przekrój). Na tej podstawie obliczono czasy przejazdu przez kolejne odcinki pomiarowe  $t_{i \rightarrow j}$  (1)

$$t_{i \rightarrow j} = t_j - t_i \quad i = 1 \div 7, j = 2 \div 8 \quad (1)$$

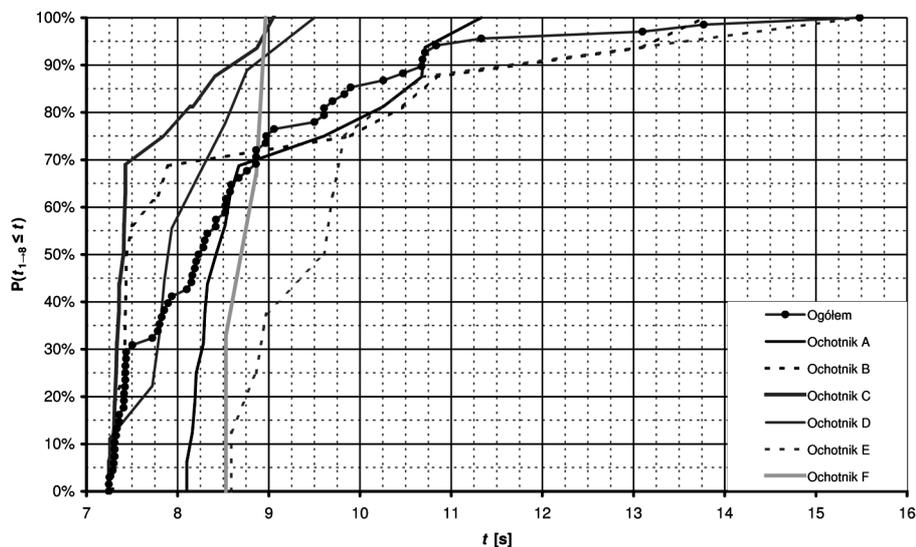
oraz prędkości zastępcze  $v_{i \rightarrow j}$  (2).

$$v_{i \rightarrow j} = \frac{L_j - L_i}{t_j - t_i} \quad i = 1 \div 7, j = 2 \div 8 \quad (2)$$

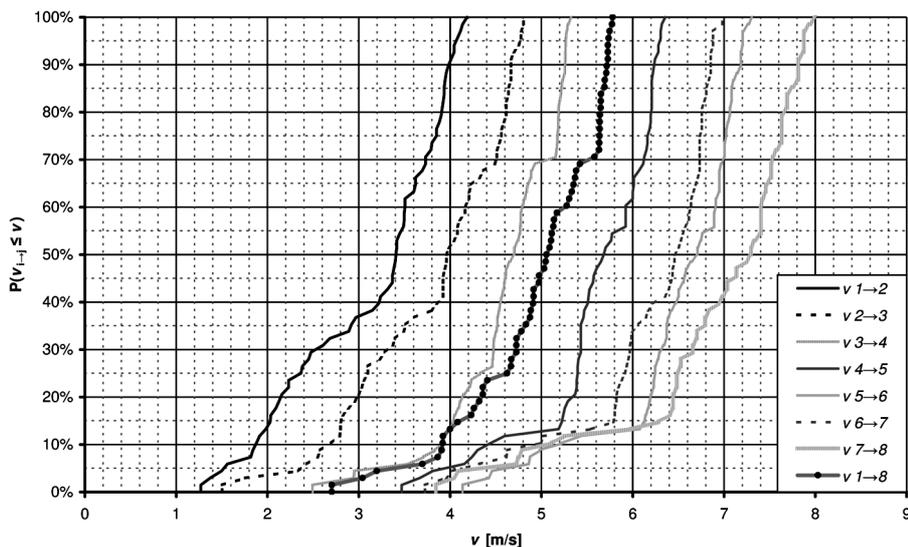
Na Rysunkach 9 i 10 zilustrowano dystrybuanty czasów przejazdów przez cały odcinek pomiarowy oraz

**Tabela 3.** Odsetek aktywacji czujników w kolejnych przekrojach kontrolnych

Położenie czujnika $\alpha$ [°]	Numer przekroju kontrolnego $i$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
+105	-	-	-	-	-	1,5 %	0 %	-
+70	0 %	0 %	0 %	-	-	100 %	94,1 %	0 %
+35	80,9 %	85,3 %	8,8 %	0 %	0 %	70,6 %	100 %	19,1 %
0	98,5 %	100 %	100 %	19,1 %	11,8 %	1,5 %	2,9 %	98,5 %
-35	2,9 %	2,9 %	38,2 %	100 %	95,6 %	0 %	0 %	66,2 %
-70	0 %	0 %	0 %	60,3 %	88,2 %	-	-	0 %
-105	-	-	-	0 %	0 %	-	-	-



**Rysunek 9.** Dystrybuanty czasów przejazdu przez cały odcinek pomiarowy dla poszczególnych osób



**Rysunek 10.** Dystrybuanty prędkości zastępczych na kolejnych odcinkach pomiarowych

prędkości zastępczych na kolejnych odcinkach, natomiast w Tabeli 3 zamieszczono rozkład aktywacji czujników w poszczególnych przekrojach kontrolnych.

Na zamieszczonych rysunkach można łatwo zauważyć, iż istniała wyraźna dolna granica możliwych do osiągnięcia czasów przejazdu (równa około 7,25 [s]) oraz górne granice prędkości zastępczych. Z analizy Tabeli 3 nasuwa się natomiast wniosek o wysokiej powtarzalności toru ruchu, umożliwiającą jego modelowanie numeryczne.

#### 4. KALIBRACJA NUMERYCZNEGO MODELU ZJAZDU

Ponieważ zagrożenie bezpieczeństwa osób zjeżdżających pojawia się głównie podczas szybkiej jazdy, postanowiono tak skalibrować model numeryczny, aby jak najdokładniej odzwierciedlał po 3 najszybsze zjazdy każdego z ochotników z osobna. Jako zmienne niezależne (poszukiwane) przyjęto prędkość początkową  $v_0$  oraz współczynniki tarcia  $\mu_s$  i oporu

lepszego  $\mu_v$ . Minimalizowaną funkcją celu była natomiast suma kwadratów różnic prędkości zastępczych  $S$ . We wzorze (3) indeks górny „ $P$ ” oznacza wartości uzyskane z pomiarów ruchu, natomiast „ $M$ ” wskazuje wyniki modelowania numerycznego.

$$S(\mu_s, \mu_v, v_0) = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^3 \left[ (v_{i \rightarrow i+1})_j^P - (v_{i \rightarrow i+1}(\mu_s, \mu_v, v_0))^M \right]^2 \quad (3)$$

Z uwagi na przyjęty sposób wyznaczania wartości siły tarcia (4) postanowiono osobno przeprowadzić optymalizację przy  $\mu_s=0$  albo  $\mu_v=0$ , a następnie sprawdzić kombinacje pośrednie. Wyniki obliczeń, wraz z odpowiadającymi im współczynnikami korelacji zamieszczono w Tabeli 4.

$$F_T = \mu_s \cdot F_N + \mu_v \cdot v \quad (4)$$

$F_T$  – siła tarcia

$F_N$  – siła nacisku na powierzchnię zjeżdżalni

$v$  – prędkość ruchu

Analizując Tabelę 4 można dostrzec, iż wartości współczynnika tarcia dla kobiet (kolumny A i F) znacznie odbiegają w górę od wartości uzyskanych dla mężczyzn. Ponieważ skutkują one jednak

**Tabela 4.** Wyniki kalibracji numerycznego modelu ruchu

Ochotnik	A	B	C	D	E	F
$\mu_s$ [-]	0,072	0,055	0,054	0,051	0,051	0,073
$v_0$ [m/s]	3,40	3,80	3,70	3,15	0,90	2,50
$r^2$ [-]	0,990	0,995	0,989	0,984	0,992	0,987
$\mu_v$ [N*s/m]	10,35	10,90	8,05	12,25	14,65	9,10
$v_0$ [m/s]	3,10	3,70	3,55	3,00	0,20	2,00
$r^2$ [-]	0,988	0,996	0,990	0,983	0,986	0,982

wolniejszymi, a zatem bezpieczniejszymi zjazdami, postanowiono nie brać ich pod uwagę w dalszych rozważaniach. Dla pozostałych wartości poszukiwano ich zależności od parametrów zamieszczonych w Tabeli 2. W rezultacie uzyskano poniższe empiryczne równanie

$$\frac{\mu_s}{0,0605 - 0,0003 \text{ m/h}^2} + \frac{\mu_v}{0,7645 + 0,0659 \text{ m h}} = 1 \quad (5)$$

które będąc po stronie bezpiecznej można uprościć nawet do postaci

$$\frac{\mu_s}{0,050} + \frac{\mu_v}{0,066 \text{ m h}} = 1 \quad (6)$$

Prędkość początkową zaleca się przy tym przyjmować równą 3,90 [m/s].

## 5. PODSUMOWANIE

W ramach pracy doktorskiej Piotra Szczepaniaka opracowano numeryczny model ruchu człowieka w zjeżdżalni wodnej. W celu jego kalibracji i walidacji zaprojektowano i wykonano unikalną aparaturę badawczą. Przeprowadzone przy jej użyciu pomiary ruchu pozwoliły potwierdzić możliwość numerycznego modelowania zjazdu oraz wyznaczyć niezbędne parametry.

Problemem na chwilę obecną pozostaje niewielka ilość przebadanych zjeżdżalni, co ogranicza wiarygodność zależności opisanych wzorami (5) lub (6). Aby się upewnić, czy są one uniwersalne, należałoby przeprowadzić większą liczbę pomiarów na zjeżdżalniach o zróżnicowanej geometrii oraz przy pomocy większej liczby ochotników.

#### LITERATURA

- [1] PN-EN 1069-1:2003 *Zjeżdżalnie wodne o wysokości 2 m i większej – Część 1: Wymagania bezpieczeństwa i metody badań*. PKN, Warszawa, 2003.
- [2] Sung-Hwan Joo: *Shape design optimization of parametric flume sections*. (Praca doktorska) University of Oklahoma, Norman OK, 2006.
- [3] Szczepaniak P.: *Modelowanie ruchu w zjeżdżalniach wodnych. Symulacja komputerowa i jej weryfikacja doświadczalna*. (Praca doktorska) Wydział Budownictwa Pol. Śl., Gliwice, 2003.
- [4] Ball D.J.: *Some observations on waterslide injuries*. Injury Prevention, vol. 4, 1998, pp. 225-227.