

MODELOWANIE RUCHU W ZJEŹDŹALNIACH WODNYCH. SYMULACJA KOMPUTEROWA I JEJ WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA

PIOTR SZCZEPANIAK

*Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska
e-mail: piotr.szczepaniak@polsl.pl*

Streszczenie. Praca przedstawia główne fragmenty dysertacji doktorskiej, napisanej i obronionej na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej w 2008r. Do zagadnień opisanych w artykule należą: komputerowy model ruchu w zjeżdżalniach wodnych, najważniejsze wyniki przeprowadzonych pomiarów ruchu oraz rezultaty kalibracji i weryfikacji modelu numerycznego.

1. WSTĘP

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

Problem bezpieczeństwa zjeżdżalni wodnych był jednak dotychczas z naukowego punktu widzenia bagatelizowany, czego dowodem jest bardzo skromna literatura dotycząca projektowania zjeżdżalni wodnych. Oprócz pracy magisterskiej [1] i doktorskiej [2] autora można wymienić odpowiednią normę [3] oraz pracę doktorską Sung-Hwan Joo [4]. Przytoczona norma jest jednak bardzo lakoniczna 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 Joo, jednak przedstawiony w niej model ruchu w zjeżdżalni jest bardzo prymitywny, a uzyskane wyniki niezweryfikowane doświadczalnie. Te wyraźne braki spowodowały, iż autor podjął się opracowania własnego modelu ruchu oraz jego doświadczalnej weryfikacji na drodze pomiarów *in situ*, co zostanie w skrócie przedstawione w kolejnych częściach niniejszego artykułu.

2. KOMPUTEROWY MODEL RUCHU

2.1. Geometria zjeżdżalni

W pierwszej kolejności należy przedstawić główne ograniczenie zakresu stosowania opracowanego modelu, którym jest rodzaj geometrii zjeżdżalni, a ściślej mówiąc kształt jej przekroju poprzecznego. Wiedząc bowiem, iż przytłaczającą większość zjeżdżalni wodnych wykonuje się z prefabrykowanych elementów w postaci prostej rury lub fragmentu torusa, założono kołowy kształt przekroju poprzecznego wewnętrznej powierzchni zjeżdżalni, o promieniu r_w . Pozwala to w prosty sposób opisać matematycznie powierzchnię zjeżdżalni poprzez funkcję wektorową $\mathbf{Z}(L, \alpha)$, bazującą na parametrycznym równaniu jej osi $\mathbf{z}(L)$, gdzie L jest parametrem równym jej długości od początku zjeżdżalni. Wykorzystywany jest przy tym globalny, prawoskrętny układ współrzędnych kartezjańskich \mathbf{e}_i , związany np. z budynkiem hali basenowej, o wersorze \mathbf{e}_3 skierowanym pionowo z górą (przeciwnie do wektora przyspieszenia ziemskiego \mathbf{g}).

$$\mathbf{z}'(L) = \frac{d\mathbf{z}}{dL} = \{z'_1 \quad z'_2 \quad z'_3\}^T \quad (1)$$

$$\zeta = \sqrt{(z'_1)^2 + (z'_2)^2} \quad (2)$$

$$\sqrt{(z'_1)^2 + (z'_2)^2 + (z'_3)^2} \equiv 1 \quad (3)$$

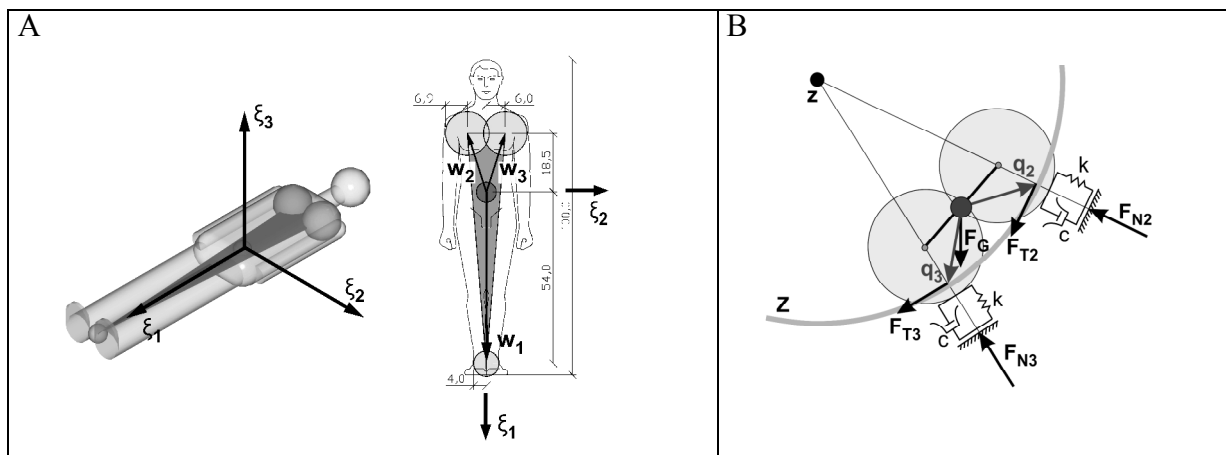
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{z'_1}{\zeta} & -\frac{z'_2}{\zeta} & 0 \\ \frac{z'_2}{\zeta} & \frac{z'_1}{\zeta} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \zeta & 0 & -z'_3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ z'_3 & 0 & \zeta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z'_1 & -\frac{z'_2}{\zeta} & -\frac{z'_1 z'_3}{\zeta} \\ z'_2 & \frac{z'_1}{\zeta} & -\frac{z'_2 z'_3}{\zeta} \\ z'_3 & 0 & \zeta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{Z}(L, \alpha) = \mathbf{z}(L) + \mathbf{B} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ r_w \sin \alpha \\ -r_w \cos \alpha \end{Bmatrix} \quad (5)$$

2.2. Uproszczony biomechaniczny model człowieka

Znając geometrię zjeżdżalni, można przystąpić do opisu poruszającego się w jej wnętrzu człowieka. Tutaj także posłużono się kilkoma uproszczeniami, bazującymi na obserwacjach i własnym doświadczeniu autora. Stwierdza się zatem, iż najszybciej jeżdżące osoby (a tym samym najbardziej zagrożone wypadkiem) przyjmują w czasie zjazdu pozycję wyprostowaną, silnie usztywnioną, starając się przy tym ograniczyć do minimum powierzchnię kontaktu poprzez lekkie uniesienie bioder i opieranie się wyłącznie na niewielkich fragmentach ciała w rejonie pięt i łopatek. Pozwala to na zastąpienie tradycyjnego, wieloelementowego łańcucha kinematycznego bryłą sztywną oraz poszukiwanie punktów przyłożenia sił kontaktowych na powierzchni trzech sfer, pokazanych na rys. 1A (wymiary na rysunku podano w procentach względem wzrostu).

Do pełnego opisu tak zdefiniowanego ciała wystarcza zatem znajomość masy osoby zjeżdżającej m oraz jej wzrostu h , a współrzędne tensora głównych centralnych momentów bezwładności \mathbf{I}_0 oblicza się ze wzorów interpolacyjnych wyprowadzonych przy użyciu zależności zaczerpniętych z [5,6].



Rys. 1. Zastępczy kształt poruszającego się ciała (A) oraz siły działające na ciało (B)

$$I_{0\xi_1} = 0,08485 - 0,3059 h + (0,012422 + 0,002050 h^2) m \quad (6)$$

$$I_{0\xi_2} = -0,8652 + 0,4845 h + (0,013739 + 0,04867 h^2) m \quad (7)$$

$$I_{0\xi_3} = -0,8769 + 0,4496 h + (0,016777 + 0,05072 h^2) m \quad (8)$$

2.3. Siły działające na poruszające się ciało

Kolejnym krokiem na drodze do stworzenia modelu ruchu jest wyznaczenie sił działających na poruszające się ciało (rys. 1B, strefę kontaktu w okolicach pięt pominięto w celu zwiększenia czytelności schematu). Przyjęto, iż na osobę zjeżdżającą działa siła grawitacji F_G , zaczepiona w jej środku ciężkości, oraz po trzy ($j = 1..3$) siły kontaktowe normalne F_{Nj} oraz styczne F_{Tj} , obliczane z poniższych zależności:

$$\mathbf{F}_G = m \mathbf{g} \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_{Nj} = \begin{cases} \mathbf{0} & \text{jeżeli } (u_j < 0) \vee [(k_j u_j + c_j u_j \dot{u}_j) < 0] \\ (k_j u_j + c_j u_j \dot{u}_j) \mathbf{n}_j & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_{Tj} = -(\mu_s F_{Nj} + \mu_v v_{Tj}) \frac{\mathbf{v}_{Tj}}{v_{Tj}} \quad (11)$$

$$\mu_{v1} = 0,2\mu_v \quad ; \quad \mu_{v2} = \mu_{v3} = 0,4\mu_v \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_{\text{Sum}} = \sum_{j=1}^3 (\mathbf{F}_{Nj} + \mathbf{F}_{Tj}) + \mathbf{F}_G \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_{\text{Sum}} = \sum_{j=1}^3 \mathbf{q}_j \times (\mathbf{F}_{Nj} + \mathbf{F}_{Tj}) \quad (14)$$

gdzie:

- u_j – "ugięcie" strefy kontaktu (lokalna deformacja ciała człowieka),
- k_j, c_j – współczynniki sztywności i tłumienia wewnętrznego,
- \mathbf{n}_j – jednostkowy wektor normalny,
- μ_s, μ_v – współczynniki tarcia suchego i lepkiego,
- \mathbf{v}_{Tj}, v_{Tj} – styczna składowa prędkości punktu kontaktu oraz jej wartość,
- \mathbf{q}_j – wektor łączący środek ciężkości ciała z punktem kontaktu.

Należy tutaj zaznaczyć, że wprowadzony w równaniu (10) iloczyn $u_j \dot{u}_j$ ma na celu usunięcie nieciągłości wartości siły nacisku przy $u_j \rightarrow 0$, co jest zgodne z wrażeniami z jazdy.

2.4. Równania ruchu

Znając siły działające na poruszające się ciało, można zapisać równania ruchu w postaci:

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}(t)}{dt^2} = \mathbf{F}_{\text{Sum}} \quad (15)$$

$$\frac{d \left(\mathbf{A}(t) \cdot \mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{A}(t)^T \cdot \boldsymbol{\omega}(t) \right)}{dt} = \mathbf{M}_{\text{Sum}} \quad (16)$$

gdzie:

- \mathbf{x} – położenie środka ciężkości ciała w globalnym ukł. wsp.,
- \mathbf{A} – macierz przejścia pomiędzy lokalnym (ξ_i) a globalnym (e_i) układem współrzędnych,
- $\boldsymbol{\omega}$ – wektor prędkości kątowej w globalnym ukł. wsp.,

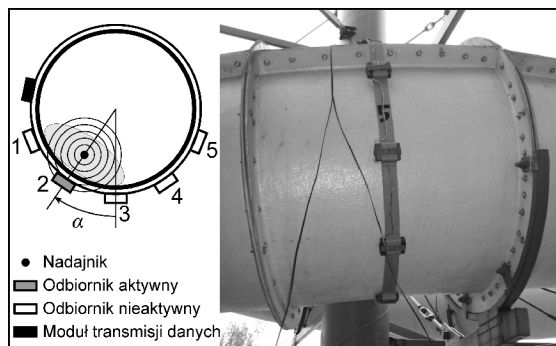
i następnie opracować procedury ich numerycznego rozwiązania, bazujące na metodzie różnic centralnych.

3. POMIARY RUCHU

3.1. Aparatura pomiarowa

Kolejną integralną część opisywanej pracy doktorskiej stanowiły pomiary ruchu. Ich celem było wyznaczenie niezbędnych wartości współczynników tarcia, warunków brzegowych (głównie prędkości początkowej) oraz sprawdzenie poprawności uzyskiwanego rozwiązania numerycznego.

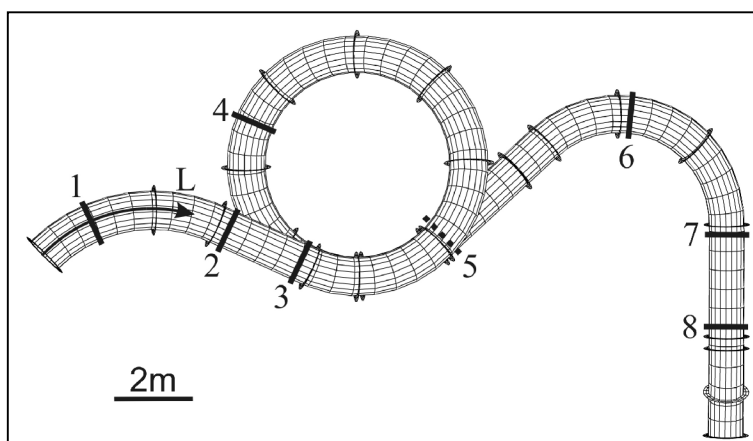
Do przeprowadzenia tych pomiarów wykonano na zamówienie unikatową aparaturę badawczą, której głównymi elementami są wodoszczelne nadajniki radiowe, w które wyposaża się osoby zjeżdżające oraz 8 opasek z 5 odbiornikami na każdej z nich, umieszczone na powierzchni zjeżdżalni. Czujniki te są skonstruowane w taki sposób, aby wykrywały moment, w którym moc odbieranego sygnału radiowego przekracza pewną wartość progową, oznaczającą wejście lub wyjście nadajnika z bliskiego otoczenia odbiornika (rys. 2). Pozwala to określić czas minięcia danego przekroju poprzecznego t_i , w którym zainstalowana jest opaska, z dokładnością do 0,005 s oraz współrzędną kątową położenia α_i z dokładnością $\pm 10^\circ$



Rys. 2. Schemat działania aparatury pomiarowej i sposób montażu

3.2. Miejsce i wyniki pomiarów

Pomiary ruchu przeprowadzono w dniu 9 października 2007 roku na zjeżdżalni wodnej usytuowanej przy basenie krytym w Rudzie Śląskiej, ul. Chryzantem 10 (rys. 3). Ma ona długość 46,35 m, różnica wysokości wynosi 7,30 m, średnie nachylenie 15,75 % a średnica wewnętrzna 1,00 m. Łączna długość odcinków prostych wynosi 10,11 m, pozostała część zjeżdżalni składa się z łuków o promieniach krzywizny osi równych 3,00, 3,50 oraz 4,00 m. Na rys. 3 oraz w tab. 1 podano położenie kolejnych przekrojów poprzecznych, wokół których były założone opaski z czujnikami.



Rys. 3. Miejsca zamontowania czujników ruchu

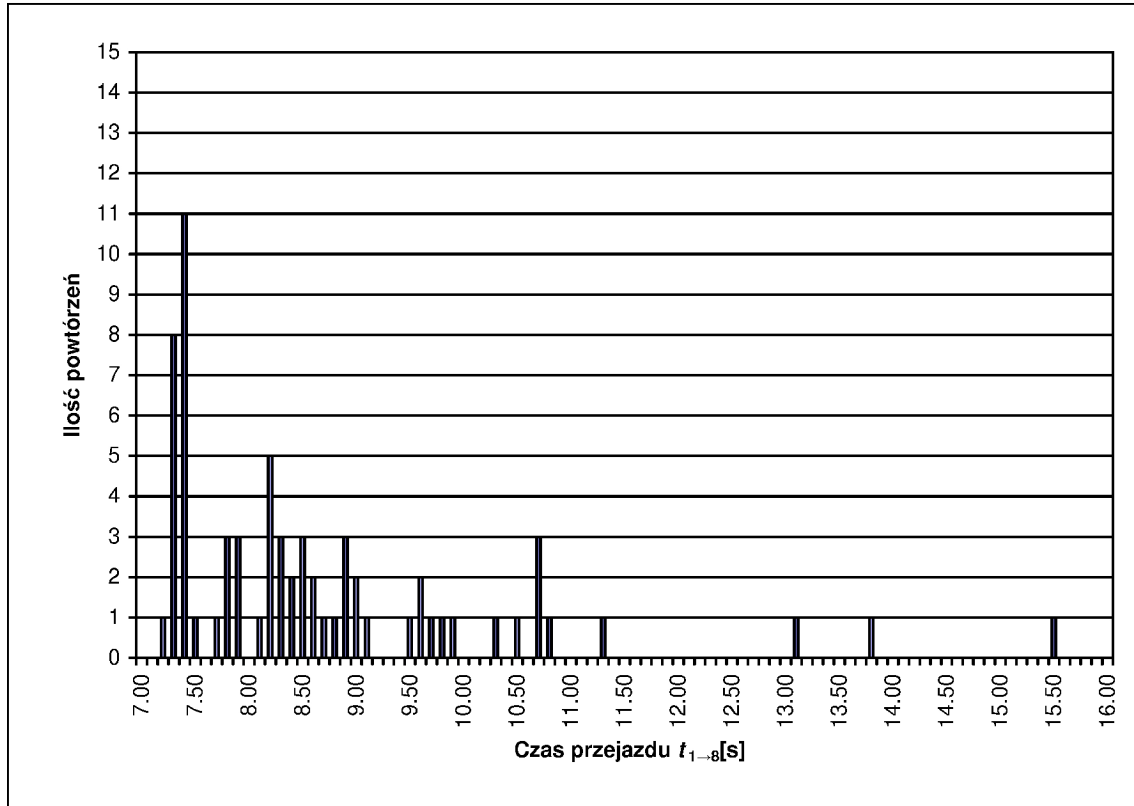
W pomiarach ruchu wzięło udział sześcioro ochotników, głównie współpracowników autora z Katedry Teorii Konstrukcji Budowlanych, w tym 2 kobiety oraz 4 mężczyzn w wieku od 20 do 50 lat, masie od 52 do 115 kg i wzroście od 1,62 do 1,90 m.

Do najważniejszych wyników przeprowadzonych badań należą: odsetek aktywacji poszczególnych czujników (tab. 1), określający tor jazdy oraz histogram czasów przejazdu przez cały odcinek pomiarowy (rys. 4) lub każdy z odcinków w osobna.

Analizując tab. 1 można przy tym dostrzec dostateczne podobieństwo torów mierzonych przejazdów, ujawniające się poprzez wysoki odsetek aktywacji maksymalnie 2 czujników na każdej z opasek (oznaczający przejazd pomiędzy nimi), wyróżnionych szarym kolorem tła. Na rys. 4 zauważa się natomiast, że istnieje wyraźna dolna granica możliwych do osiągnięcia czasów przejazdu (w tym przypadku jest to około 7,2 s), czyli tym samym maksymalnych średnich prędkości zjazdu (ok. 5,8 m/s, co jest zgodne z określeniem zjeżdżalni typu 4 wg [3]).

Tabela 1. Odsetek aktywacji czujników

Położenie czujnika α [°]	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 %	-	-	-
Położenie przekroju L_i [m]	1,46	5,08	7,11	21,74	29,78	36,12	40,85	43,33



Rys. 4. Histogram czasów przejazdu przez cały odcinek pomiarowy

4. KALIBRACJA MODELU NUMERYCZNEGO

4.1. Współczynniki tarcia i prędkość początkowa

Na podstawie wyników pomiarów ruchu przeprowadzono kalibrację modelu numerycznego. W tym celu dla każdego przejazdu policzono prędkości zastępcze $v_{i \rightarrow j}$ na kolejnych odcinkach pomiarowych, a następnie przeprowadzono minimalizację sumy kwadratów różnic $S(\mu_s, \mu_v, v_0)$ między wynikami pomiarów (oznaczonych indeksem P) i obliczeń numerycznych (indeks M), przy czym szukanymi zmiennymi były wartości współczynników tarcia oraz prędkości początkowej. Ponieważ najbardziej niebezpieczne są przejazdy z dużą prędkością, to na obecnym etapie pod uwagę brano jedynie po 3 najszybsze zjazdy każdego z ochotników z osobna.

$$v_{i \rightarrow j} = \frac{L_j - L_i}{t_j - t_i} \quad (17)$$

$$S(\mu_s, \mu_v, v_0) = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^3 \left[(v_{i \rightarrow i+1})_j^P - (v_{i \rightarrow i+1}(\mu_s, \mu_v, v_0))^M \right]^2 \quad (18)$$

Po wyznaczeniu wartości poszukiwanych współczynników zestawiono je z różnymi kombinacjami masy i wzrostu ochotników, których one dotyczyły i ostatecznie uzyskano poniższe empiryczne równanie

$$\frac{\mu_s}{0,0605 - 0,0003 \text{ m/h}^2} + \frac{\mu_v}{0,7645 + 0,0659 \text{ m/h}} = 1, \quad (19)$$

które, po stronie bezpiecznej, można uprościć nawet do postaci

$$\frac{\mu_s}{0,050} + \frac{\mu_v}{0,066 \text{ m h}} = 1. \quad (20)$$

Poprawność uzyskanej zależności (20) można zweryfikować, porównując ją do modelu tarcia lepkiego wg równania Newtona [7]

$$F_T \cong \eta S \frac{v}{h_w} \rightarrow \mu_v = \frac{\eta S}{h_w} \quad (21)$$

gdzie:

- η – lepkość dynamiczna cieczy newtonowskiej,
- S – powierzchnia kontaktu,
- h_w – grubość ścinanej warstwy cieczy.

Z zależności (21) łatwo wywnioskować, iż współczynnik tarcia lepkiego powinien rosnąć proporcjonalnie do rzeczywistej powierzchni kontaktu (zależnej wprost od wzrostu oraz pośrednio od masy ciała) oraz odwrotnie proporcjonalnie do grubości smarującego filmu wodnego, zależnej m.in. od ciężaru ciała. Korelacje te w najprostszej wersji są zgodne z równaniem (20).

Ponieważ, jak się można było spodziewać, analizując równanie (11), minimalne wartości współczynników tarcia suchego i lepkiego są od siebie zależne, to prawie niemożliwe jest określenie ich dokładnych wartości, można więc stosować ich dowolne dodatnie wartości spełniające równanie (20). Maksymalną prędkość początkową można natomiast oszacować z równania (22), osiągającą maksimum równe 3,91 m/s przy BMI (wskaźnik masy ciała) równym 25,3 kg/m² (odpowiada to okolicom górnej granicy prawidłowej masy ciała, czyli osobie prawdopodobnie dysponującej znaczną siłą fizyczną w stosunku do swojego ciężaru, a zatem mogącej uzyskać duże przyspieszenie w fazie startu).

$$v_0 = -0,0199 \text{ BMI}^2 + 0,603 \text{ BMI} - 3,73 \quad (22)$$

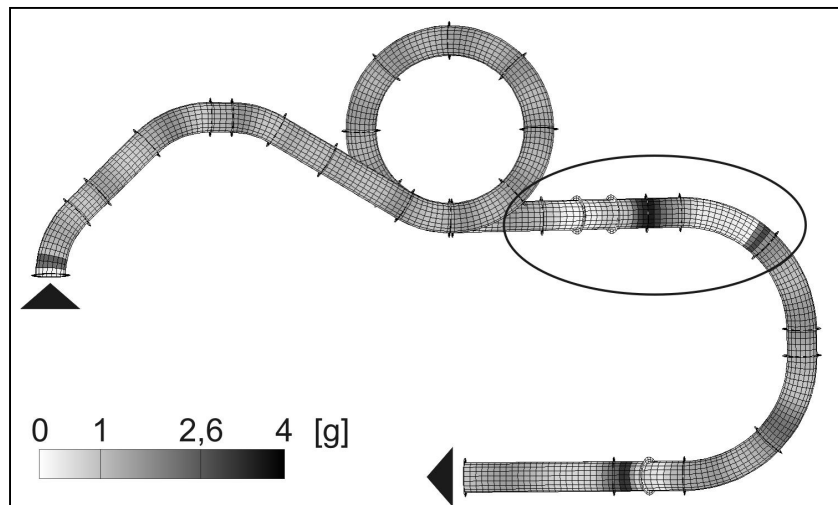
4.2. Przykładowe wyniki modelowania

W celu ostatecznej weryfikacji przydatności opracowanego modelu ruchu do oceny bezpieczeństwa zjeżdżalni postanowiono zamodelować ruch w zjeżdżalni, na której w rzeczywistości występowały wypadki spowodowane niewłaściwą geometrią ślizgu. Do obliczeń wykorzystano przy tym wartości masy, wzrostu i pozostałych współczynników odpowiadające jednemu z ochotników biorących udział w pomiarach ruchu. Wyniki obliczeń w postaci map działającego na osobę zjeżdżającą przeciążenia oraz szczegółowe wykresy przeciążenia G (23), prędkości wypadkowej v (24), położenia w przekroju poprzecznym zjeżdżalni α_{rz} (wartość 0 oznacza dno zjeżdżalni, patrz rys. 2) oraz całkowitej energii mechanicznej E_m (25) przedstawiono na rys. 5 i 6. Na wykresach przeciążenia na rys. 6 i 8 zaznaczono przy tym dopuszczalną normowo [2] wartość 2,6 g (lub warunkowo 4,0 g na czas krótszy niż 0,1 s).

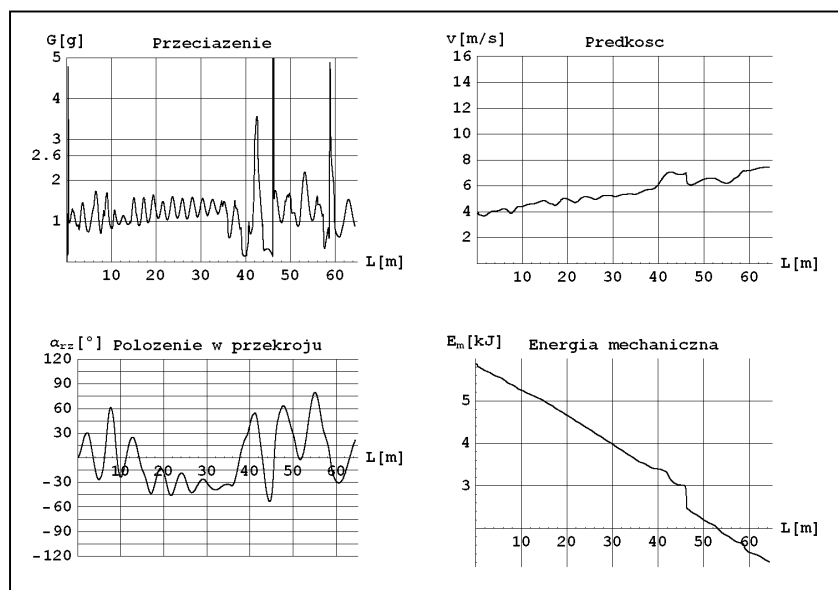
$$G = \frac{\sqrt{(\mathbf{F}_{\text{Sum}} - \mathbf{F}_G) \circ (\mathbf{F}_{\text{Sum}} - \mathbf{F}_G)}}{mg} \quad (23)$$

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} \rightarrow v = \sqrt{\mathbf{v}^T \mathbf{v}} \quad (24)$$

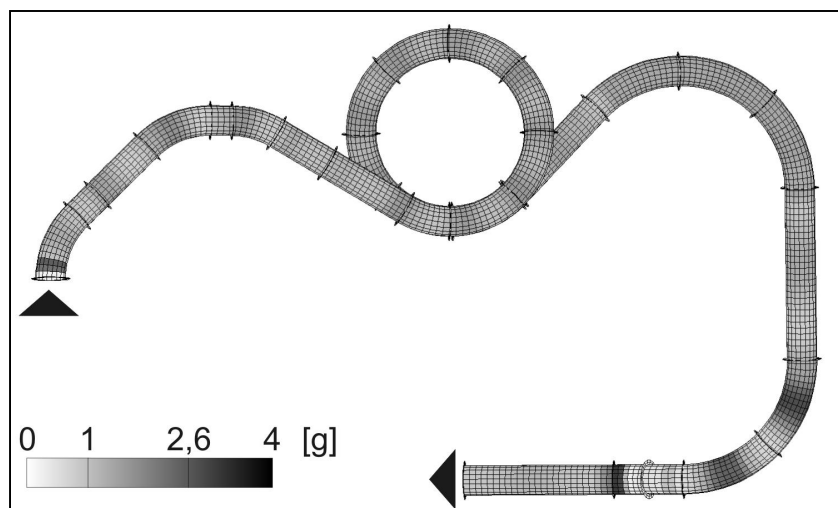
$$E_m = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 k u_j^2 + mg x_3 + \frac{1}{2} m \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{A} \mathbf{I}_0 \mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega} \quad (25)$$



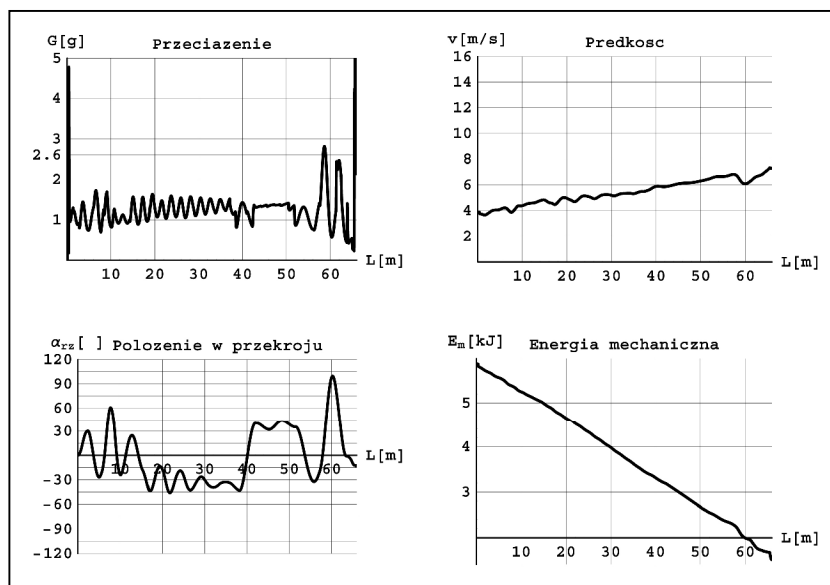
Rys. 5. Mapa przeciążenia dla zjeżdżalni testowej – przed przebudową



Rys. 6. Wykresy wyników modelowania ruchu dla zjeżdżalni testowej – przed przebudową



Rys. 7. Mapa przeciążenia dla zjeżdżalni testowej – po przebudowie



Rys. 8. Wykresy wyników modelowania ruchu dla zjeżdżalni testowej – po przebudowie

Charakterystycznym wynikiem wskazującym na poważne zagrożenie bezpieczeństwa są naprzemienne jasne i ciemne prążki na zaznaczonym fragmencie zjeżdżalni (rys. 5) oraz odpowiadające im zaburzenia na wykresach przeciążenia i prędkości pomiędzy 40 i 50 mb (rys.6). Są one wywoływane przez następujące po sobie gwałtowne przyspieszenie na fragmencie zjeżdżalni o zwiększonym nachyleniu (jasny prążek, 40 mb), prawie całkowite oderwanie się użytkownika od powierzchni zjeżdżalni (drugi jasny prążek) oraz uderzenie podczas lądowania (drugi ciemny prążek, połączony ze znacznym ubytkiem energii kinetycznej). Ponieważ taka konstrukcja zjeżdżalni wywoływała dużą ilość wypadków, to musiała ona zostać zmodyfikowana, a wyniki powtórnego modelowania ruchu dla skorygowanej geometrii potwierdzają fakt, iż zastosowana korekta była właściwa i skuteczna (rys. 7 i 8).

5. WNIOSKI

Podsumowując całość przedstawionej pracy doktorskiej, można stwierdzić, iż opracowany model numeryczny wraz z jego walidacją doświadczalną stanowi skuteczne narzędzie do oceny bezpieczeństwa zjeżdżalni wodnych. O zgodności obliczeń komputerowych z wynikami pomiarów świadczy też fakt, iż od czasu wdrożenia pierwszych wersji programu w zaprzyjaźnionej pracowni projektowej, czyli przez ostatnich 5 lat, nie zaistniała ani jedna konieczność przebudowy zjeżdżalni ze względu na zagrożenie bezpieczeństwa użytkowników. Tym samym stworzone zostało skuteczne narzędzie do projektowania i oceny bezpieczeństwa tych specyficznych obiektów budowlanych.

Duże zainteresowanie, jakie wzbudziło przedstawienie opracowanych animacji zjazdu na międzynarodowych targach urzędów rekreacyjnych w Atlancie, wydatnie służy też rozpropagowaniu polskiej myśli technicznej w świecie.

LITERATURA

1. Szczepaniak P.: Zjeżdżalnie wodne. Obliczanie geometrii i modelowanie ruchu użytkownika. Praca magisterska. Gliwice: Wydział Budownictwa Pol. Śl., 2003.

2. Szczepaniak P.: Modelowanie ruchu w zjeżdżalniach wodnych. Symulacja komputerowa i jej weryfikacja doświadczalna. Praca doktorska. Gliwice: Wydział Budownictwa Pol. Śl., 2008.
3. PN-EN 1069-1:2003 Zjeżdżalnie wodne o wysokości 2 m i większej – Część 1: Wymagania bezpieczeństwa i metody badań. Warszawa: PKN, 2003.
4. Joo S.-H.: Shape design optimization of parametric flume sections. Praca doktorska. Norman OK: University of Oklahoma, 2006.
5. Bober T., Zawadzki J.: Biomechanika układu ruchu człowieka. Wrocław: Wydawnictwo BK, 2003.
6. Gedliczka A.: Atlas miar człowieka: dane do projektowania i oceny ergonomicznej. Warszawa: Centralny Instytut Ochrony Pracy, 2001.
7. Hebda M., Wachal A.: Trybologia. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1980.

MODELLING OF MOTION IN WATER SLIDES. COMPUTER SIMULATION AND ITS EXPERIMENTAL VERIFICATION

Summary. The paper presents main parts of a PhD dissertation, written at the Faculty of Civil Engineering of the Silesian University of Technology in 2008. The main topics described in the article are as follows: computer model of motion in water slides, the most important results of measurements of motion and the calibration of the numerical model.