

THAI THI KIM CHI¹⁾

NUMERICAL STUDY OF DEBRIS FLOWS AROUND BRIDGE PIERS

BADANIE NUMERYCZNE SPŁYWÓW RUMOSZOWYCH WOKÓŁ FILARÓW MOSTU

STRESZCZENIE. Osuwiska stanowią naturalne zagrożenie mające bezpośredni wpływ na środowisko, warunki społeczne i ekonomiczne. Spośród różnych typów osuwisk, spływy rumoszowe stanowią poważne zagrożenie dla konstrukcji drogowych, takich jak mosty w terenach górzystych. Analiza podatności mostów na uszkodzenia spowodowane spływem rumoszowym jest ważnym elementem oceny ryzyka i zarządzania nimi. W niniejszej pracy zbadano charakterystyki spływów rumoszowych w bezpośrednim sąsiedztwie filarów mostu, wykorzystując symulacje numeryczne, dla różnych warunków brzegowych, przy zastosowaniu oprogramowania ANSYS FLUENT. Do modelowania spływu rumoszowego użyto potęgowego modelu reologicznego cieczy nienewtonowskiej. W celu oceny ilościowej odporności filarów mostu na spływy rumoszowe charakteryzujące się różnymi prędkościami i liczbami Reynoldsa, w artykule wyznaczono także współczynnik oporu przepływu osuwiska rumoszowego.

SŁOWA KLUCZOWE: ciecz nienewtonowska, filar mostu, osuwisko, podatność na uszkodzenia, spływ rumoszowy, współczynnik oporu.

ABSTRACT. Landslide is a natural hazard that has crucial direct impact on the socio-economic system. Among various types of landslides, debris flows are a major threat to transportation structures such as bridges in mountainous areas. Vulnerability analysis of bridges that are exposed to debris flows is an important part of risk assessment and management. In the presented study, the characteristics of debris flows around bridge piers are investigated numerically for different boundary conditions using ANSYS FLUENT software. The non-Newtonian power-law model was used to model the debris flow. Drag coefficient was also determined to quantify the vulnerability of bridge piers to debris flows with different velocities and Reynolds numbers.

KEYWORDS: bridge pier, debris flow, drag coefficient, landslide, non-Newtonian fluid, vulnerability.

DOI: 10.7409/rabdim.022.019

¹⁾ University of Transport and Communications, Faculty of Civil Engineering, Department of Urban Transport and Marine-Coastal Engineering, 3 Cau Giay Str., Lang Thuong ward, Dong Da District, Hanoi, Vietnam; chittk@utc.edu.vn

1. WSTĘP

Osuwiska zajmują trzecią pozycję w klasyfikacji największych klęsk żywiołowych na świecie [1]. To powszechne zjawisko geologiczne może wystąpić wszędzie, są najczęściej nieprzewidywalne, przyjmując postać poważnej klęski żywiołowej. Osuwiska pociągają za sobą dużą liczbę ofiar śmiertelnych i powodują poważne szkody w infrastrukturze, terenach uprawnych i budynkach mieszkalnych. Według badań Włoskiego Instytutu Ochrony i Badania Środowiska (ISPRA), szkody spowodowane przez osuwiska w rozwiniętych krajach świata każdego roku są wyceniane na około 6 miliardów Euro. Osuwiska te można podzielić na różne typy w zależności od czynników, które je wywołują [2]. Jednym z najpowszechniejszych, najczęściej występujących i najbardziej niebezpiecznych typów osuwisk jest sływ rumoszowy. W ostatnich dziesięcioleciach na skutek zmian klimatycznych i globalnego ocieplenia częstość jego występowania zwiększyła się.

Sływ rumoszowy to bardzo szybki, aż do ekstremalnie gwałtownego przepływ nasiąkniętego wodą rumoszu (zwięzłych odłamków skalnych) zachodzący w stromym kanale z prędkością osiągającą nawet 15 m/s [3]. Sływ rumoszowy jest w sensie fizycznym typowym układem dwufazowym „ciało stałe-ciecz” i zachowuje się pod względem reologicznym jak przepływ cieczy nienewtonowskiej [4]. Z powodu osiągania dużej prędkości i niszczyielskiej siły sływy rumoszowe należą do niebezpiecznych zjawisk naturalnych, które spowodować mogą zarówno poważne straty gospodarcze jak i ludzkie, w tym znaczne szkody m.in. w infrastrukturze transportowej, drogowej, mostowej oraz kolejowej (Fig. 1).

W przypadku mostów zbudowanych nad dolinami rzecznyymi, sływy rumoszowe mogą spowodować szkody poprzez: bezpośrednie uderzenie frontu sływu, abrazję (ścieranie podłoża skalnego), erozję, wibracje i zasypanie. Stwierdzono także, że główną przyczyną uszkodzeń konstrukcji spowodowanych sływem rumoszowym jest jego siła uderzenia, która może w krótkim czasie bezpośrednio doprowadzić do jej zniszczenia. Stąd wpływ uderzenia rumoszu na bezpieczeństwo mostów, szczególnie ich filarów (które są najbardziej narażone na sływy rumoszowe), stało się ważnym zagadnieniem dla inspektorów nadzoru technicznego i nie należy go absolutnie bagatelizować.

Pomimo, że sływy rumoszowe muszą być brane pod uwagę w projektowaniu i analizie mostów, brak jest wytycznych dotyczących oceny obciążeń rumoszowych, nawet w Normowych Specyfikacjach AASHTO przeznaczonych dla mostów drogowych [5].

Wiele dotychczasowych badań koncentrowało się na wpływie ciśnienia uderzeniowego sływów rumoszowych i ich

1. INTRODUCTION

Landslides are classified as the third most crucial natural disaster worldwide [1]. This common geological event can occur anywhere, at almost any time, assuming the form of a significant natural disaster. Landslides are responsible for significant loss of life and damage to infrastructure, agricultural land and housing. As stated in a research of the Italian Institute for Protection and Environmental Research (ISPRA), damage caused by landslides in the developed countries of the world reaches approximately 6 billion euro each year. Landslides can be divided into different types depending on different variables [2]. Among them, debris flow is one of the most common, numerous and hazardous types. Its frequency of occurrence has increased in the last decades due to climate change and global warming.

Debris flow can be defined as a very rapid to extremely rapid surging flow of saturated debris in a steep channel, with velocity reaching even 15 m/s [3]. Debris flow is a typical solid-liquid two-phase flow and behaves like a non-Newtonian fluid [4]. Because of the high velocity and destructive force, debris flows belong to dangerous natural hazards which can cause very serious economic and human losses, including considerable damage to transport infrastructure in their paths, such as bridges and railways (Fig. 1).



Fig. 1. Bridge destroyed by a debris flow, Vietnam (2019)
Rys. 1. Most zniszczony przez sływ rumoszowy, Wietnam (2019)

For bridges across river valleys, debris flows can cause damage in different ways: direct impact exerted by the flow front, abrasion, scouring, vibration and buried damage. It is also notable that the impact force is the primary form of damage to structures in the area affected by debris

interakcji z konstrukcjami lub barierami ochronnymi, ale nie z mostami. Prace te opierały się na obserwacjach terenowych [6, 7], badaniach laboratoryjnych [4, 8-10] oraz modelach numerycznych [11-13].

Niewiele badań poświęcono opływowi rumoszu wokół filarów mostu i wyznaczeniu związanego z tym współczynnika oporu podpory C_d , mimo że parametr ten należy do najważniejszych czynników decydujących o sile uderzenia i może być użyty do określenia w sensie ilościowym odporności filarów mostu na spływ rumoszowy.

Wang ze współpracownikami przeprowadzili szczegółowe badania doświadczalne i numeryczne spływu rumoszowego wokół filarów o różnym kształcie przekroju poprzecznego, w których określono współczynniki oporu podpory mostowej [14, 15]. Współczynnik oporu związany ze spływem rumoszowym wyznaczano ze wzoru:

$$C_d = \frac{F}{P \cdot A}, \quad (1)$$

gdzie:

F – siła uderzenia,

P – ciśnienie uderzeniowe, $P = \alpha \cdot \rho \cdot v^2$,

w którym:

α – współczynnik ciśnienia uderzeniowego,

ρ, v – odpowiednio gęstość i prędkość spływu rumoszowego,

A – pole powierzchni uderzenia.

Jednakże w powyższych pracach współczynniki oporu wyznaczano dla odrębnych przypadków przepływu osuwiska, charakteryzujących się różnymi własnościami reologicznymi i prędkościami, przez co nie zaobserwowano ogólnych tendencji. Wpływ liczby Reynoldsa Re w przypadku spływu rumoszowego na współczynnik oporu filarów mostowych nie został jednak szczegółowo przeanalizowany. Stąd potrzebne są dalsze badania współczynnika oporu filarów mostu. W niniejszej pracy współczynniki oporu filarów wyznaczano dla spływów rumoszowych o tych samych własnościach reologicznych, lecz o różnych prędkościach ich przepływu (wahających się w granicach od 2 m/s do 5 m/s) i różnych liczbach Reynoldsa.

Dodatkowo w analizie Wanga, który posłużył się programem OpenFOAM [15] uwzględniono tylko powierzchnię swobodną spływu rumoszowego wokół filara i oddzielenie strumienia wzdłuż boku słupa przy opływie. W niniejszym artykule, wykorzystując analizę numeryczną w ramach oprogramowania ANSYS FLUENT, wykorzystano bardziej szczegółowy opis charakterystyki spływu rumoszowego

flows and can lead to structural damage directly within a short time. Hence, the impact of debris flows on the safety of bridges, especially piers, which are most exposed to the debris flow hazards, has become an important issue and should not be underestimated.

Although debris flows must be considered in bridge analysis and design, no guidance on evaluating debris loads is provided, even in the Standard Specification for Highway Bridges (AASHTO) [5].

Many previous research works were focused on the impact pressure of debris flows and their interactions with defense structures or obstacles, but not with bridges. The works were based on field observations [6, 7], laboratory tests [4, 8-10] and numerical methods [11-13].

There are few studies on debris flows around bridge piers and the associated pier drag coefficient C_d , even though the drag coefficient C_d belongs to the most important variables affecting the impact force and can be used to quantify the resistance of bridge piers to debris flow.

Wang et.al performed detailed experimental and numerical analyses of debris flow around piers with various cross-sectional shapes, encompassing determination of the drag coefficient as well. [14, 15]. Drag coefficient associated with debris flow was determined using the equation:

$$C_d = \frac{F}{P \cdot A}, \quad (1)$$

where:

F – impact force,

P – impact pressure, $P = \alpha \cdot \rho \cdot v^2$,

wherein:

α – impact pressure coefficient,

ρ, v – debris flow density and velocity, respectively,

A – impact surface area.

However, drag coefficients were evaluated for each separate case with different rheological properties and velocities, thus no general tendencies were observed in these works. The effect of Reynolds number Re of debris flow on the drag coefficient of bridge piers has not been analyzed in detail. Hence, further investigation on drag coefficient of bridge piers is needed. In this study, drag coefficients are determined for debris flows with the same rheological properties, but various velocities (ranging from 2 m/s to 5 m/s) and different Reynolds numbers.

w otoczeniu filara mostowego. Przeprowadzono badania dla spływu rumoszewego, modelowanego jako ciecz nienewtonowska, przy różnych prędkościach przepływu.

2. METODOLOGIA

Ze względu na złożony skład i charakterystykę reologiczną poszczególnych spływów rumoszewych badacze proponowali różne modele reologii ich przepływu, takie jak: model cieczy newtonowskiej, model cieczy nienewtonowskiej, model cieczy Binghama, model cieczy pseudoplastycznej, model ciała ekspansywnego, model cieczy pseudoplastycznej z granicą plastyczności, model ciała ekspansywnego do granicy plastyczności, model mieszaniny kulombowskiej, itd. [16]. W niniejszej pracy do modelowania reologii spływów rumoszewych przyjęto potęgowy model płynu nienewtonowskiego [17]. W modelu tym lepkość jest funkcją szybkości ścinania lub zmian szybkości ścinania w czasie. Zależność między naprężeniem stycznym a szybkością ścinania dla płynu, w modelu potęgowym, można wyrazić następująco:

$$\tau_{yx} = K(\dot{\gamma}_{yx})^n. \quad (2)$$

Lepkość pozorną płynu w modelu potęgowym jest określona wzorem:

$$\mu = K(\dot{\gamma}_{yx})^{n-1}, \quad (3)$$

gdzie:

K – współczynnik spójności płynu,

n – wskaźnik charakterystyczny przepływu.

Płyn taki wykazuje: efekt rozrzedzania ścinaniem dla $n < 1$, zachowanie newtonowskie dla $n = 1$ i efekt zagęszczania ścinaniem w przypadku $n > 1$.

Równania obowiązujące dla przepływu płynu nienewtonowskiego obejmują:

- równanie ciągłości przepływu:

$$\nabla \cdot U = 0 \text{ lub } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

- równania pędu:

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U - f \right) - \nabla \cdot \sigma = 0, \quad (5)$$

we współrzędnych kartezjańskich:

równanie pędu w kierunku x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right), \quad (6)$$

równanie pędu w kierunku y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right), \quad (7)$$

In addition, only the free surface of debris flow around the pier and the flow separation along the side were captured in Wang's work using OpenFOAM software [15]. Therefore, more detailed characteristics of debris flows in the local region around the bridge pier are numerically investigated in this article using ANSYS FLUENT software. Debris flows at various velocities with non-Newtonian fluid behavior are studied.

2. METHODOLOGY

Due to complex compositions and rheological characteristics of debris flows, many researchers have proposed various models of debris flow rheology, such as Newtonian fluid model, non-Newtonian fluid model, Bingham fluid model, pseudoplastic fluid model, expansion body model, yield pseudoplastic fluid model, yield expansion body, Coulomb mixture model etc. [16]. In this study, the power-law non-Newtonian fluid is chosen to model the rheology of debris flows [17]. Viscosity in this model is not independent of shear rate or shear rate history. The relationship between shear stress and shear rate for power-law fluid can be mathematically expressed as follows:

$$\tau_{yx} = K(\dot{\gamma}_{yx})^n. \quad (2)$$

The apparent viscosity for power-law fluid is given by:

$$\mu = K(\dot{\gamma}_{yx})^{n-1}, \quad (3)$$

where:

K – fluid consistency coefficient,

n – flow behavior index.

For $n < 1$ the fluid exhibits shear-thinning properties; $n = 1$, the fluid shows Newtonian behavior; $n > 1$, the fluid shows shear-thickening behavior.

The governing equations of non-Newtonian flow include:

- the continuity equation:

$$\nabla \cdot U = 0 \text{ or } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

- the momentum equations:

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U - f \right) - \nabla \cdot \sigma = 0, \quad (5)$$

in Cartesian form for the x and y directions:

x -momentum equation:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right), \quad (6)$$

y -momentum equation:

• równania konstytutywne:

$$\tau = 2\mu(I_2)d = 2\mu_0 I_2^{p-1} d, \quad (8)$$

czyli równanie pędu w kierunku x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{2}{Re} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon_{yx} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right), \quad (9)$$

oraz równanie pędu w kierunku y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\eta}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{2}{Re} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right), \quad (10)$$

gdzie:

p – wskaźnik potęgowy,

μ_0 – współczynnik spójności płynu,

$\mu(I_2)$ – lepkość podczas ścinania,

ρ – gęstość,

U – prędkość przepływu,

f – siła masowa,

σ – tensor naprężenia.

Analizę numeryczną przeprowadzono używając oprogramowanie ANSYS FLUENT oraz dodatkowy solver oparty na analizie metodą skończonych objętości. Dane z badań doświadczalnych przeprowadzonych przez Wanga [14] przyjęto jako dane wzorcowe do kalibracji modelu numerycznego FLUENT w symulacji sływu rumoszewego wokół filaru mostu. Warunki ustalone dla symulacji numerycznych były takie same jak te zastosowane w badaniach doświadczalnych Wanga: gęstość sływu rumoszewego $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$ i okrągły filar o średnicy $D = 0.05 \text{ m}$. W przypadku sływu rumoszewego liczbę Reynoldsa N_{Rey} można obliczyć z następującego równania [4, 18]:

$$N_{Rey} = \frac{4 \cdot \rho \cdot v \cdot h}{\mu}, \quad (11)$$

gdzie:

N_{Rey} – liczba Bingham-Reynoldsa,

ρ – gęstość sływu rumoszewego [kg/m^3],

v – prędkość [m/s],

h – głębokość [m],

μ – lepkość dynamiczna [Pa s].

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right), \quad (7)$$

• the constitutive equations:

$$\tau = 2\mu(I_2)d = 2\mu_0 I_2^{p-1} d, \quad (8)$$

or x -momentum:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{2}{Re} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon_{yx} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right), \quad (9)$$

and y -momentum:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\eta}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{2}{Re} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right), \quad (10)$$

where:

p – the power-law index,

μ_0 – consistency factor,

$\mu(I_2)$ – shear viscosity,

ρ – density,

U – velocity,

f – body force,

σ – stress tensor.

The presented numerical study was performed using the ANSYS FLUENT solver based on finite volume method. Data from experiments carried out by Wang [14] were adopted as a benchmark to verify the accuracy of the FLUENT numerical model in simulating debris flows around bridge piers. The conditions set for the numerical simulations were the same as those used in Wang's experiments: debris flow density ρ of 200 kg/m^3 and a round pier with a diameter D of 0.05 m . For the debris flow, the Reynolds number N_{Rey} can be calculated using the equation [4, 18]:

$$N_{Rey} = \frac{4 \cdot \rho \cdot v \cdot h}{\mu}, \quad (11)$$

where:

N_{Rey} – the Bingham Reynolds number,

ρ – density of debris flows [kg/m^3],

v – velocity [m/s],

h – depth [m],

μ – dynamic viscosity [Pa s].

Symulacje numeryczne spływu rumoszewego przeprowadzono dla modelu płaskiego, zakładając siatkę o wymiarach $10D \times 40D$. Wlot znajdował się z przodu filara, a wylot za filarem, tak aby można było uchwycić charakter spływu rumoszewego. W analizie zastosowano model potęgowej lepkości płynu nienewtonowskiego o stałej gęstości. Siatkę MES wygenerowano używając modułów Design Modeler i Meshing Tool. Całkowita liczba elementów czworokątnych przekraczała 460000. Warunki brzegowe dla spływu rumoszewego określono dla wlotu, wylotu, góry, dołu i filaru mostu. Schematyczny szkic obszaru objętego analizą i nałożone warunki brzegowe przedstawiono na Rys. 2.

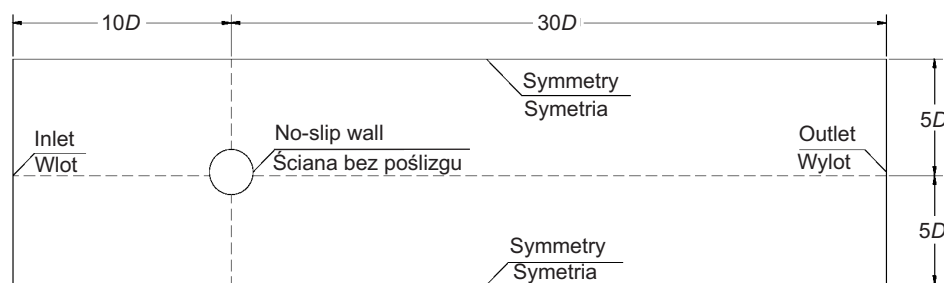


Fig. 2. The debris flow domain
Rys. 2. Szkic obszaru spływu rumoszewego.

Na wlocie równomierny spływ rumoszewy opisany jest przez prędkość wlotową, przy czym pozioma składowa prędkości jest stała, a składowa pionowa jest równa zero:

$$U_x = U_0, U_y = 0. \quad (12)$$

W płaszczyźnie wylotowej zastosowano warunek brzegowy dla wypływu. Góra i dół definiowane są jako symetryczne oraz wymuszono tam gradienty prędkości równe zero. Na powierzchni filarów mostu zastosowano standardowy warunek brzegowy bez uwzględnienia poślizgu, przy czym zarówno poziome jak i pionowe prędkości są tam równe zero:

$$U_x = 0, U_y = 0. \quad (13)$$

W celu wyznaczenia wartości gradientów wyników rozwiązania (potrzebnych nie tylko do wyznaczenia wartości na brzegach komórek, ale także do obliczenia składników drugiego rzędu i pochodnych prędkości), użyto metody najmniejszych kwadratów. Rozwiązanie otrzymano wykorzystując wielowymiarową aproksymację liniową. W analizie ciągłości i przy wyznaczaniu składowych x i y prędkości przepływu zastosowano kryteria względnej zbieżności rzędu 10^{-8} .

3. WYNIKI I DYSKUSJA

Analiza wyników modelu numerycznego powinna być poprzedzona sprawdzeniem dokładności uzyskanego rozwiązania. Ponieważ zachowanie się nienewtonowskich spływów rumoszewych w lokalnym obszarze filarów mostu nie było dotychczas szczegółowo badane do walidacji modelu użyto

Numerical simulation of debris flows was conducted in a two-dimensional computational flow domain of the size of $10D \times 40D$. The inlet was closer to the front of the pier and the outlet was farther away from the rear of the pier to enable capturing of the evolution of the debris flow downstream. The non-Newtonian power-law viscosity model and constant density were used. The mesh of the domain was generated using the Design Modeler and Meshing tool. The total number of unstructured quadrilateral cells exceeded 460000. The boundary conditions for the debris flow consist of inlet, outlet, top, bottom and the pier. A schematic sketch of the domain and the boundary conditions enforced on the domain boundaries are given in Fig 2.

At the inlet, uniform debris flow is defined by inlet velocity, where the horizontal velocity is constant, and the vertical velocity is zero:

$$U_x = U_0, U_y = 0. \quad (12)$$

At the exit plane, the outflow boundary condition was used. The top and bottom are defined as symmetric, where the velocity gradients in the vertical direction are forced to be zero. On the surface of the bridge piers, the standard no-slip boundary condition is used, where both the horizontal and vertical velocities are zero:

$$U_x = 0, U_y = 0. \quad (13)$$

In order to evaluate gradients of solution variables (that are needed not only for constructing values of a scalar at the cell faces, but also for computing secondary diffusion terms and velocity derivatives), Least Squares Cell-Based method is used. The second-order upwind using a multidimensional linear reconstruction approach is selected to find face values. Relative convergence criteria of 10^{-8} are used for the continuity and x and y components of the velocity in the presented study.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Before the numerical model is demonstrated, it is necessary to prove and ascertain the accuracy of the new results reported herein. Since the behavior of non-Newtonian debris flows in the local region around bridge piers has not

współczynnika oporu. Przebieg symulacji uznano za zbieżny i zakończony, gdy na wykresie zmienności współczynników oporu w czasie, zaobserwowano więcej niż 10 stałych cykli. Stwierdzono dobrą zgodność między wartościami współczynników oporu uzyskanych w symulacji numerycznej z wynikami badań doświadczalnych Wang (2018), dla sływów rumoszowych o różnych prędkościach i własnościach reologicznych (Tabl. 1).

Table 1. Verification of the numerical model
Tablica 1. Weryfikacja modelu numerycznego

No. Nr	Velocity [m/s] Prędkość	Viscosity [Pa s] Lepkość	C_d (Wang's experiments) (eksperyment Wanga)	C_d (numerical results) (symulacje numeryczne)	Relative difference [%] Względna różnica
1	2.4	0.406	1.24	1.25	0.81
2	3.6	0.329	0.49	0.55	12.2
3	2.7	0.702	0.69	0.76	10.1
4	2.8	1.229	1.36	1.28	5.9
5	2.8	1.596	0.65	0.72	10.8

Przykładowo, minimalne i maksymalne różnice wyniosły odpowiednio 0.81% (przypadek 1: gdzie lepkość = 0,406 Pa s, prędkość = 2.4 m/s) i 12.2% (przypadek 2: gdzie lepkość = 0.329 Pa s i prędkość = 3.6 m/s). Zmiany współczynników oporu w czasie dla przypadków 1 i 2 przedstawiono na Rys. 3.

been studied in detail before, drag coefficient is used to validate the presented numerical model. The simulation run is considered converged and stopped when more than 10 constant periodic cycles have been observed in the time evolution plot of drag coefficients. Good agreement is observed between the drag coefficients obtained from the numerical simulation and data from Wang's experiments (2018) for debris flows with different velocities and rheological properties, as shown in Table 1.

For instance, the minimum and maximum differences equaled 0.81% (case 1 with viscosity of 0.406 Pa s, velocity of 2.4 m/s) and 12.2% (case 2 with viscosity of 0.329 Pa s and velocity of 3.6 m/s), respectively. Temporal variations of drag coefficients for cases 1 and 2 are shown in Fig. 3.

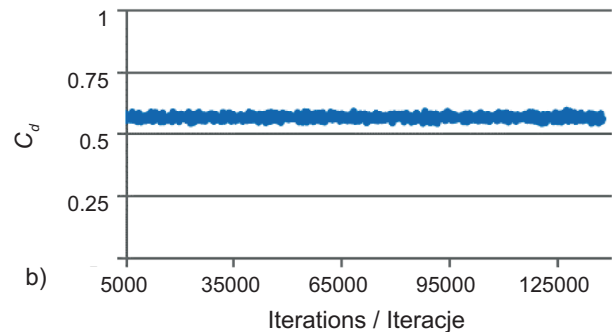
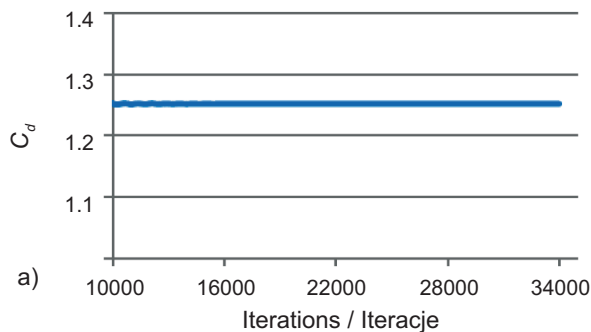


Fig. 3. Variation of drag coefficient C_d in time for: a) case 1, b) case 2

Fig. 3. Zmiany współczynnika oporu C_d w czasie dla: a) przypadek 1, b) przypadek 2

Po walidacji modelu numerycznego do dalszego badania charakterystyk sływu rumoszowego i jego wpływu na współczynniki oporu filarów wybrano sływ rumoszowy określony w przypadku 1 ($\mu = 0.406$ Pa s) charakteryzujący się minimalnym błędem. Jak podano wcześniej, wszystkie obliczenia przeprowadzono dla prędkości w granicach od 2 m/s do 5 m/s. Tabl. 2 przedstawia własności reologiczne sływów rumoszowych i liczby Reynoldsa dla poszczególnych przypadków.

After validation of the numerical model, debris flow in case 1 ($\mu = 0.406$ Pa s) with the minimum error is chosen to further study the characteristics of debris flow and its effect on the drag coefficients of piers. As stated in the previous section, all computations were conducted for velocities in the range from 2 m/s to 5 m/s. Table 2 shows rheological properties of debris flows and Reynolds numbers for each case.

Table 2. Properties of debris flows
 Tablica 2. Własności spływów rumoszowych

No. Nr	Density Gęstość ρ [kg/m ³]	Depth Głębokość h [m]	Velocity Prędkość v [m/s]	Dynamic viscosity Lepkość dynamiczna μ [Pa s]	Reynolds number Liczba Reynoldsa N_{Rey}
1	2000	0.083	2	0.406	3270.9
2	2000	0.083	2.5	0.406	4088.7
3	2000	0.083	3	0.406	4906.4
4	2000	0.083	3.5	0.406	5724.1
5	2000	0.083	4	0.406	6541.9
6	2000	0.083	4.5	0.406	7359.6
7	2000	0.083	5	0.406	8177.3

Na Rys. 4 przedstawiono rozkład prędkości spływów rumoszowych wokół filaru mostu. Zmiany przepływu są widoczne, gdy czoło rumoszu dociera do filaru. W punkcie rozdziału spływ rumoszowy zaczyna odrywać się od ściany filaru. Obszar wokół filarów można podzielić na dwie części: obszar znajdujący po stronie napływu rumoszu i obszar śladu spływowego po stronie przeciwnej. Na przedstawionych ilustracjach wyraźnie widać, że najwyższa prędkość przepływu występuje po bokach filarów ze mostu, a najniższą prędkość odnotowuje się z przodu i z tyłu filara.

Fig. 4 illustrates velocity distribution of debris flows around the bridge pier. Different flow behaviors are observed when the front reaches the pier. At the separation point, the debris flow begins to separate from the wall of the pier. The domains around piers can be divided into the region upstream of the pier and the wake region downstream. It is clearly visible in these figures that the highest velocity occurs at the sides of the bridge piers, while lower velocity is noted at its front and rear.

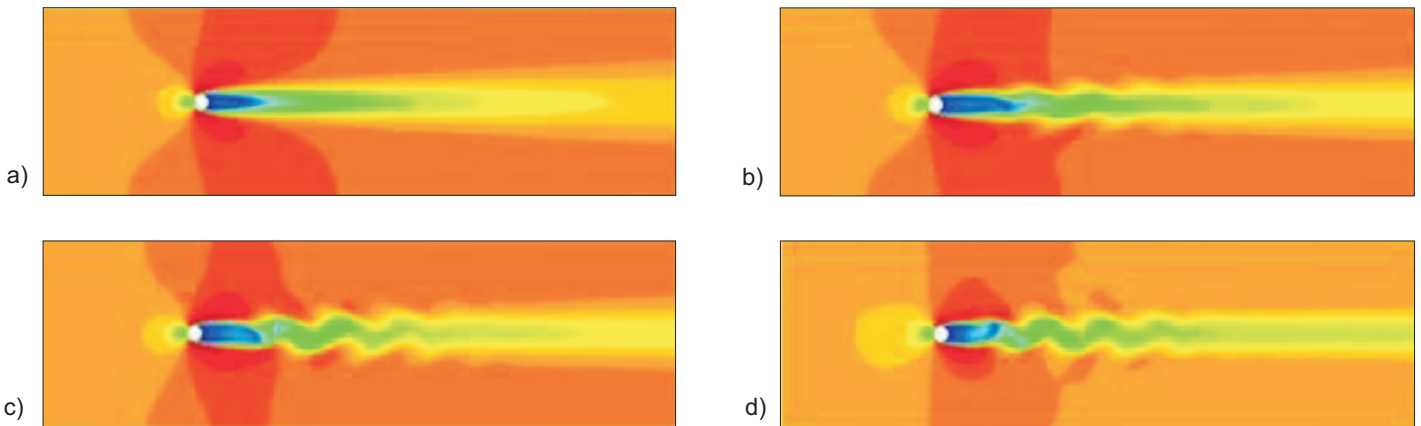


Fig. 4. Velocity contour of debris flows around bridge piers for: a) $v = 2$ m/s, b) $v = 3$ m/s, c) $v = 4$ m/s, d) $v = 5$ m/s
 Rys. 4. Kontur prędkości spływu rumoszowego wokół filarów mostu dla: a) $v = 2$ m/s, b) $v = 3$ m/s, c) $v = 4$ m/s, d) $v = 5$ m/s

Charakterystyki spływów rumoszowych analizowane są szczegółowo za pomocą linii prądu wyznaczonych dla różnych prędkości. Przykładowe wykresy przedstawiające zależność chwilowej linii prądu w sąsiedztwie filara w zależności od prędkości przedstawiono na Rys. 5.

W dwóch pierwszych przypadkach, gdzie prędkości są małe, wynoszące 2 m/s i 2.5 m/s (liczby Reynoldsa odpowiednio 3271 i 4089), przepływ jest ustalony i symetryczny względem osi x . Spływ rumoszowy kształtuje się zgodnie z kształtem

Detailed characteristics of debris flows are studied using streamlines for different values of velocities. Representative plots showing the dependence of instantaneous streamline in the vicinity of the pier on velocity are presented in Fig. 5.

Instantaneous wake patterns can be seen in this figure. For the first two cases with low velocity of 2 m/s and 2.5 m/s (Reynolds number of 3271 and 4089, respectively), the flow is steady and symmetric about the x -axis. The debris

filaru mostu, gdyż efekt lepkości dominuje nad wpływem inercji. Za filarem tworzy się obszar śladu spływowego obejmujący dwa symetryczne zamknięte wiry (pierwotny i wtórny). W pierwszym przypadku obszar śladu spływowego jest krótszy i szerszy, a w drugim przypadku jest on dłuższy i węższy.

flow follows the shape of the bridge pier, as the viscous effect dominates over the inertial effect. A wake region consisting of two closed symmetric vortices (primary and secondary) is formed behind the pier. The wake region in the first case is shorter and wider, while in the second case it is longer and narrower.

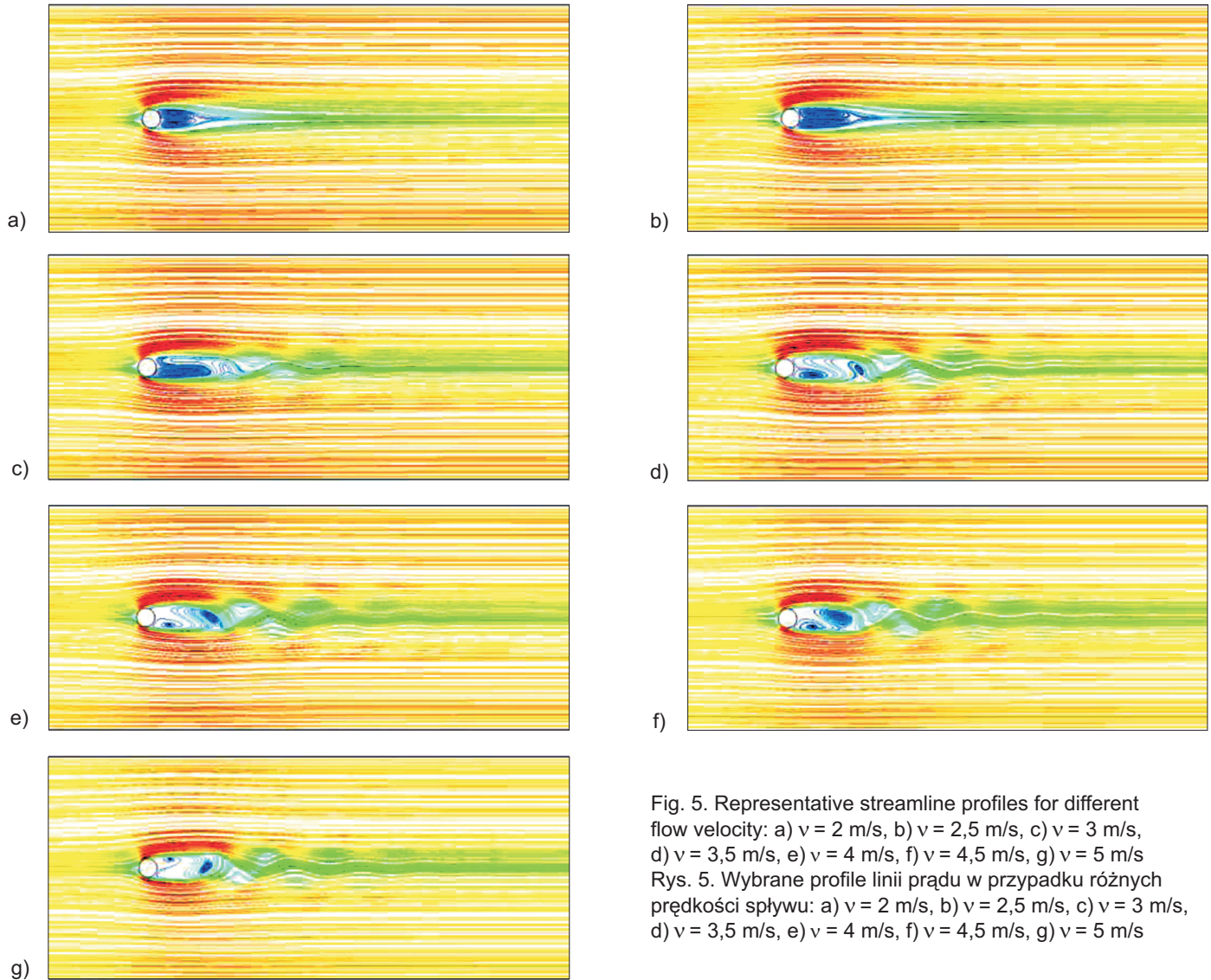


Fig. 5. Representative streamline profiles for different flow velocity: a) $v = 2$ m/s, b) $v = 2,5$ m/s, c) $v = 3$ m/s, d) $v = 3,5$ m/s, e) $v = 4$ m/s, f) $v = 4,5$ m/s, g) $v = 5$ m/s
Rys. 5. Wybrane profile linii prądu w przypadku różnych prędkości spływu: a) $v = 2$ m/s, b) $v = 2,5$ m/s, c) $v = 3$ m/s, d) $v = 3,5$ m/s, e) $v = 4$ m/s, f) $v = 4,5$ m/s, g) $v = 5$ m/s

Natomiast w pozostałych przypadkach występował przepływ nieustalony. Przy wyższych liczbach Reynoldsa, przepływ zmienia się z symetrycznego na asymetryczny. Tylko jeden zamknięty wir tworzy się za filarem. W miarę jak prędkość i wartość liczby Re są stopniowo zwiększane, wielkość obszaru śladu spływowego zmniejsza się. Zmniejsza się zarówno długość jak i szerokość śladu spływowego. Ślad spływowy wykazuje zachowanie okresowe, powtarzające się po każdym

contrast, unsteady flow was observed for remaining cases. At higher Reynolds numbers, the flow behavior changes from symmetric to asymmetric. Only one closed vortex is formed downstream of the pier. As the velocity and Re value are gradually increased, the size of the wake region is reduced. Both the length and width of the wake decrease. The wake has a constant periodic behavior that repeats after each period. The layer attached to the pier

okresie. Warstwa związana z powierzchnią filara wznosi się i opada w zależności od przebiegu czasu. Ta stała okresowość uwidacznia się wyraźniej wraz ze zmianami wartości współczynnika oporu w czasie.

Zmiany współczynników oporu w czasie dla spływów rumoszowych o prędkościach 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s przedstawiono na Rys. 6. Chwilowe wartości współczynników oporu wyznaczone są w każdym kroku czasowym i wykreślone w funkcji czasu.

surface is lifted upward or downward depending on the time. This constant periodicity can be observed more clearly in time evolution of drag coefficient.

Temporal variations of drag coefficients for debris flows with velocities of 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s and 5 m/s are shown in Fig. 6. The instantaneous values of drag coefficients are determined at each time step and plotted against time.

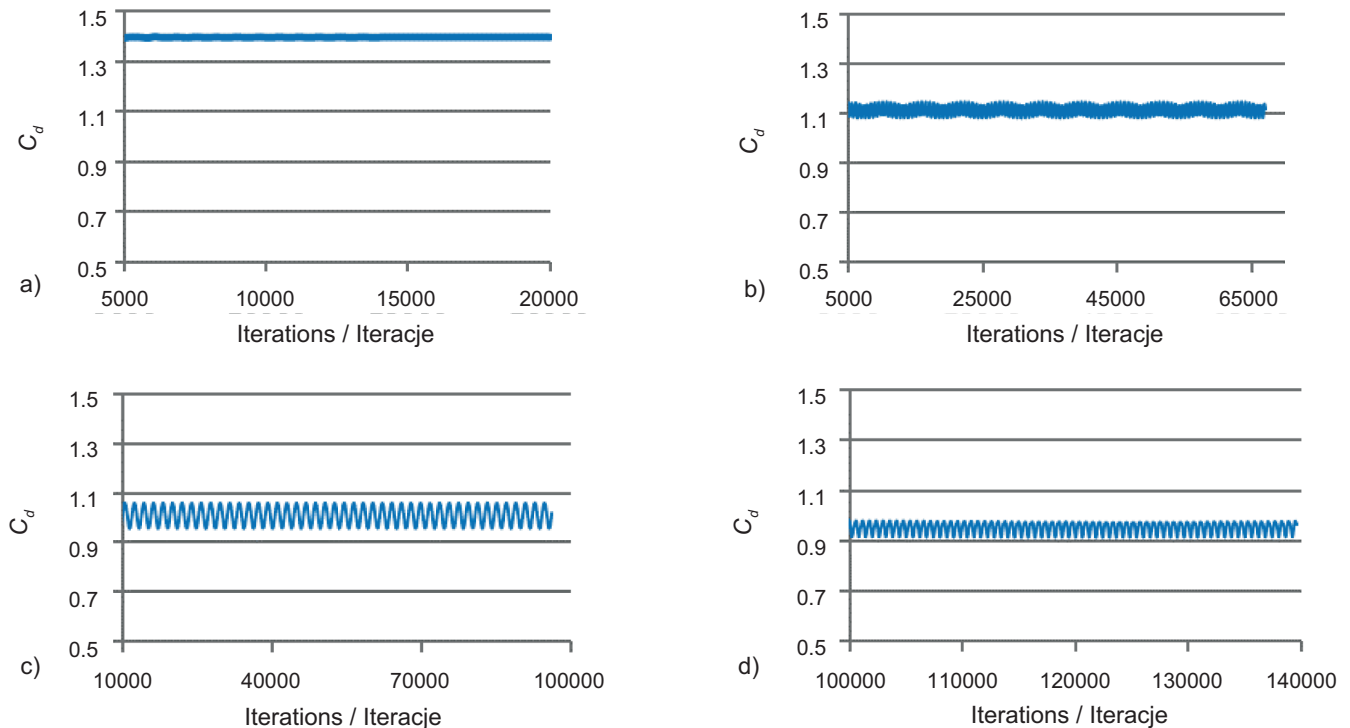


Fig. 6. Variation of drag coefficient C_d in time for flow velocity of: a) $v = 2$ m/s, b) $v = 3$ m/s, c) $v = 4$ m/s, d) $v = 5$ m/s

Rys. 6. Zmiany współczynnika oporu C_d w czasie w przypadku prędkości spływu: a) $v = 2$ m/s, b) $v = 3$ m/s, c) $v = 4$ m/s, d) $v = 5$ m/s

Uśrednione w czasie wartości współczynników oporu, dla wszystkich siedmiu powyżej wymienionych przypadków, uzyskane jako wynik modelowania numerycznego, przedstawiono w Tabl. 3. Na Rys. 7 zobrazowano zmiany średniego współczynnika oporu w zależności od liczb Reynoldsa.

Results of numerical modeling of the time-averaged drag coefficients for all the seven abovementioned cases are presented in Table 3. Fig. 7 shows variations in the mean drag coefficient depending on Reynolds numbers.

Table 3. Drag coefficients of bridge piers

Tablica 3. Współczynniki oporu filarów mostu

No. / Nr	1	2	3	4	5	6	7
v (m/s)	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
N_{Rey}	3270.9	4088.7	4906.4	5724.1	6541.9	7359.6	8177.3
C_d	1.39	1.225	1.12	1.05	1.01	0.98	0.955

Jak widać na powyższym rysunku, przy jednakowych własnościach reologicznych spływów rumoszowych współczynniki oporu zmniejszają się, w miarę jak zwiększają się wartości liczby Reynoldsa. Może to wynikać z mniejszej różnicy ciśnień między przodem a tyłem filarów przy wyższych liczbach Reynoldsa. Przy niższych liczbach Reynoldsa szybkość zmniejszania się współczynnika oporu jest większa, co wskazuje na znaczącą zmianę oporu hydrodynamicznego działającego na filary mostu.

Poznanie charakterystyk spływu rumoszowego i określenie wartości współczynnika oporu odgrywa istotną rolę w prawidłowej analizie podatności na uszkodzenia, efektywnej ocenie ryzyka, zmniejszaniu szkód spowodowanych przez rumosze i zapobieganiu możliwym zagrożeniom dla mostów. Zatem potrzebne są szersze zakrojone badania spływów rumoszowych obejmujące szerszy zakres własności reologicznych i prędkości wokół filarów mostu.

4. WNIOSKI

W pracy przeprowadzono symulację numeryczną spływów rumoszowych wokół filarów mostu za pomocą oprogramowania ANSYS FLUENT. Do opisu spływu rumoszowego użyto modelu potęgowego cieczy nienewtonowskiej. Uzyskane wyniki dostarczają bardziej szczegółowych informacji na temat charakterystyk spływów rumoszowych wokół filarów mostu przy różnych prędkościach (w granicach od 2 m/s do 5 m/s) i liczbach Reynoldsa (w granicach od 3271 do 8177).

Obszar spływu rumoszowego wokół filarów można podzielić na dwie części: obszar przed filarem i obszar śladu spływowego za filarem. W przypadku spływów rumoszowych z prędkością 2 i 2.5 m/s, im mniejsza liczba Reynoldsa, tym krótszy i szerszy jest obszar śladu spływowego. W przypadku większych liczb Reynoldsa, w miarę jak prędkość i wartości liczby Reynoldsa zwiększają się, wielkość obszaru śladu spływowego za filarem, jego długość i szerokość, zmniejsza się, a przepływ zmienia się z symetrycznego na asymetryczny.

Wpływ liczb Reynoldsa na filary jest określono ilościowo za pomocą współczynników oporu. Ogólnie rzecz biorąc, wraz ze wzrostem liczb Reynoldsa obserwowano zmniejszanie się wartości współczynnika oporu C_d . Tempo zmniejszania się współczynników oporu jest większe przy niższych wartościach liczb Reynoldsa.

Uzyskane wyniki symulacji numerycznej można użyć jako dane wejściowe w projektowaniu i optymalizacji filarów mostu, co prowadzi do bardziej efektywnej i właściwej oceny ryzyka i zapewnienia bezpieczeństwa i trwałości całej konstrukcji mostu. W przyszłości należałoby przeprowadzić więcej badań numerycznych i doświadczalnych dla szerszego zakresu

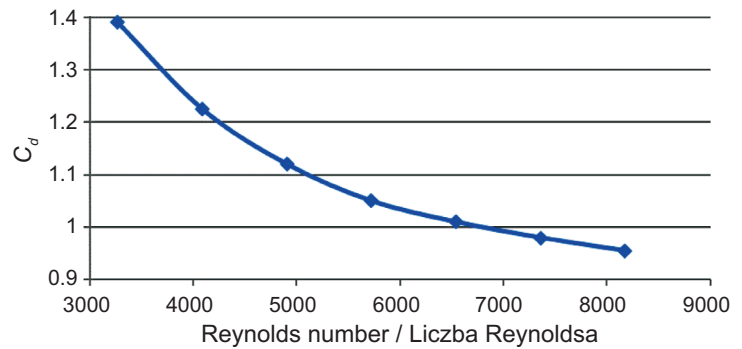


Fig. 7. Variation in drag coefficient C_d according to Reynolds numbers

Rys. 7. Zmiany współczynnika oporu C_d w zależności od liczb Reynoldsa

As visible in the figure, drag coefficients decrease with an increase in the values of Reynolds number, with rheological properties of debris flows being equal. It can be explained by smaller pressure difference between the front and rear of piers at higher Reynolds numbers. At lower Reynolds numbers, the rate of decrease in drag coefficient is higher, which indicates a significant change in hydrodynamic drag acting on bridge piers.

Understanding the debris flow characteristics and obtaining appropriate drag coefficient play a significant role in proper vulnerability analyses, effective risk assessments, reduction of debris-induced structural damage, and prevention of possible risks to bridges. Thus, a more comprehensive investigation of debris flows with a wider range of rheological properties and velocities around the bridge piers is needed in the future.

4. CONCLUSIONS

In this study, numerical simulation was performed for debris flows around bridge piers using ANSYS FLUENT. The non-Newtonian power-law fluid model was used to describe the debris flow. The obtained results provide more detailed information on characteristics of debris flows around bridge piers at various velocities (ranging from 2 m/s to 5 m/s) and Reynolds numbers ranging from 3271 to 8177.

The debris flow domain around piers can be divided into the region upstream of the pier and the wake region downstream. In the case of debris flows with velocity of 2 and 2.5 m/s, the lower the Reynolds number, the shorter and wider the wake region. At higher Reynolds numbers, as the velocity and Reynolds values gradually increase, the size of the wake region behind the pier (including length and width) decreases. The flow behavior changes from symmetric to asymmetric as well.

parametrów spływów rumoszowych i filarów mostu, aby otrzymać pełniejszy model oddziaływania spływu rumoszowego.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania, które wykorzystano w niniejszej pracy zostały sfinansowane przez Uniwersytet Transportu i Komunikacji, Hanoi, Wietnam, w ramach grantu T2021-CT-008TD.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Zillman J.*: The physical impact of the disaster, in: Ingleton J. (ed.), *Natural disaster management*, Tudor Rose, Leicester, 1999
- [2] *Varnes D.J.*: Slope movement types and processes, in: *Landslides: analysis and control*, Transportation Research Board Special Report, **176**, 1978, 11-33
- [3] *Hungr O., Evans S.G., Bovis M., Hutchinson J.N.*: Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, **7**, 3, 2001, 221-238, DOI: 10.2113/gsegeosci.7.3.221
- [4] *Cui P., Zeng C., Lei Y.*: Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, **40**, 12, 2015, 1644-1655, DOI: 10.1002/esp.3744
- [5] AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2002
- [6] *Zanchetta G., Sulpizio R., Pareschi M.T., Leoni F.M., Santacroce R.*: Characteristics of May 5-6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): Relationships to structural damage and hazard zonation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **133**, 1-4, 2004, 377-393, DOI: 10.1016/S0377-0273(03)00409-8
- [7] *Hu K., Wei F., Li Y.*: Real-time measurement and preliminary analysis of debris-flow impact force at Jiangjia Ravine, China. *Earth Surface Processes and Landforms*, **36**, 9, 2011, 1268-1278, DOI: 10.1002/esp.2155
- [8] *Takahashi T.*: Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **13**, 1, 1981, 57-77, DOI: 10.1146/annurev.fl.13.010181.000421
- [9] *Iverson R.M., George D.L., Logan M.*: Debris-flow run-up on vertical barriers and adverse slopes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **121**, 12, 2016, 2333-2357, DOI: 10.1002/2016JF00393
- [10] *Gao L., Zhang L.M., Chen H.X.*: Two-dimensional simulation of debris flow impact pressure on buildings. *Engineering Geology*, **226**, 2017, 236-244, DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.06.012
- [11] *Pudasaini S.P.*: A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **117**, F3, 2012, DOI: 10.1029/2011JF002186
- [12] *Dai Z., Huang Y., Cheng H., Xu Q.*: SPH model for fluid structure interaction and its application to debris flow impact estimation. *Landslides*, **14**, 3, 2017, 917-928, DOI: 10.1007/s10346-016-0777-4
- [13] *Kattel P., Kafle J., Fischer J.T., Mergili M., Tuladhar B.M., Pudasaini S.P.*: Interaction of two-phase debris flow with obstacles. *Engineering Geology*, **242**, 2018, 197-217, DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.05.023
- [14] *Wang Y., Liu X., Yao C., Li Y., Liu S., Zhang X.*: Finite release of debris flows around round and square piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, **144**, 12, 2018, 06018015, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001542
- [15] *Wang Y., Liu X., Yao C., Li Y.*: Debris-Flow Impact on Piers with Different Cross-Sectional Shapes. *Journal of Hydraulic Engineering*, **146**, 1, 2020, 04019045, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001656
- [16] *Yu X., Chen X., Wang H., Jia C.*: Numerical Study on the Interaction Between Debris Flow Slurry and Check Dams Based on Fluid-Solid Coupling Theory. *Geotechnical and Geological Engineering*, **38**, 3, 2020, 2427-2445, DOI: 10.1007/s10706-019-01160-0
- [17] ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15.0, ANSYS, Inc., Canonsburg, 2013
- [18] *Kang Z., Lee C., Law K., Ma A.*: *Debris Flow Research in China*. Science Press, Beijing, 2004.

The influence of Reynolds numbers on the piers is quantified using drag coefficients. In general, a decrease in the values of drag coefficient C_d was observed with an increase in Reynolds numbers. The rate of decrease of drag coefficients is greater at lower Reynolds number values.

The obtained numerical simulation results can be used as input data for the design and optimization of bridge piers, leading to more effective and proper risk assessment and ensuring safety and durability of entire bridge structures. More numerical and experimental works with a wider range of parameters of debris flows and bridge piers should be carried out in the future to obtain a more comprehensive impact model.

ACKNOWLEDGMENT

This research is funded by University of Transport and Communications (UTC), Hanoi, Vietnam, under grant number T2021-CT-008TD.