

Piotr SIWICKI

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WULS – SGGW

Numeryczne modelowanie rozmyć poniżej budowli piętrzących* **Numerical simulation of scour below the dam**

Słowa kluczowe: rozmycie, transport rumowiska, CFD FLUENT

Key words: scour, sediment transport, CFD FLUENT

Wprowadzenie

Przewidywanie lokalnych rozmyć w stanowisku dolnym poniżej budowli piętrzących pełni ważną rolę na etapie ich projektowania. Nadmierne lokalne rozmycie może być zagrożeniem dla fundamentu budowli. Całkowite zabezpieczenie dna rzeki przed powstającym wybojem jest zbyt drogie, dlatego też maksymalna głębokość rozmycia, miejsce jej występowania i kształt wyboju są przewidywane na etapie projektowania w celu zmniejszenia ryzyka awarii budowli. Problem ten stanowił przedmiot obszernych badań i istnieje bogata literatura, dotycząca rozmywania dna przez turbulentny strumień w dwóch i trzech wymiarach w czasie rzeczywistym. Najwięcej badań ma charakter empiryczny, a powodem jest wysoki stopień skomplikowania tego fizycznego procesu.

Pionierem badań zjawiska rozmycia w wyniku oddziaływania strumienia był Rouse (1939). Rozmywanie spowodowane przez poziomy strumień było tematem wielu prac. W praktyce prawie wszystkie strumienie po przejściu przez budowlę wodną są turbulentne. Turbulencją strumienia za budowlą zajmowali się między innymi: Rajaratnam (1976), Błażejewski i Zawadzki (2001), Urbański (2003). Opis empiryczny strumienia turbulentnego poniżej obiektu hydrotechnicznego przedstawił Kališ (1961). Rozkłady prędkości w powstałym dole rozmycia analizowali: Popova (1970), Rajaratnam i Berry (1977). Rosiński (1961) wyprowadził empiryczną zależność na maksymalną głębokość rozmycia, uwzględniając turbulencję strumie-

*Ze względu na rozbudowane wzory artykuł złożono jednołamowo.

nia. Studia wymienionych badaczy stanowią ważny wkład w stan wiedzy o zjawisku miejscowego rozmywania dna poniżej budowli piętrzącej.

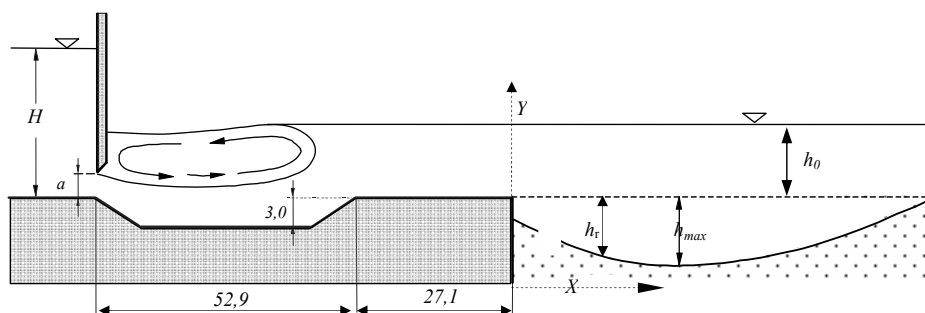
Pomiar bezpośredni parametrów strumienia jest kosztowny i istnieje duże prawdopodobieństwo zafałszowania wyników. Odkąd do badania tych zjawisk można zaadaptować metody komputerowe, znacznie powiększyły się możliwości badań. Symulacje komputerowe stanowią alternatywę do badań na modelach fizycznych. Metody symulacji komputerowej zjawiska mają tę dodatkową zaletę, że dzięki różnym opcjom, jakie można programować, oraz dzięki elastyczności w geometrycznym definiowaniu modeli efekt końcowy badania można uzyskać niewielkim nakładem kosztów. W literaturze na ten temat są dostępne bogate dane doświadczalne i dzięki temu wyniki symulacji komputerowej tych zjawisk mogą być porównywane z doświadczalnymi i są bardziej wiarygodne.

Celem tego artykułu jest sprawdzenie, czy właściwe jest zastosowanie modelu Euler-Euler (Reidar i Olsen 2000) do obliczania przepływu dwufazowego przy prognozowaniu rozmyć poniżej budowli piętrzącej za pomocą programu FLUENT. W tym celu uzyskane wyniki z symulacji komputerowej porównano z wynikami uzyskanymi na modelu fizycznym.

Metodyka badań

Model fizyczny

W celu zweryfikowania wyników obliczeń pakietem FLUENT CFD posłużono się wynikami pomiarów na modelu fizycznym. Badania laboratoryjne przeprowadzono na modelu jazu z zamknięciem zasuwowym z wypływem spod zasuw, niecką wypadową i poziomym umocnieniem dna za wypadem (rys. 1).



RYSUNEK 1. Schemat modelu badawczego z oznaczeniami analizowanych parametrów rozmyć
FIGURE 1. Schema of investigated model with marks of analyzed parameters of scour

Model wykonany był w korycie prostokątnym szerokości 0,58 m. Wartości parametrów hydraulicznych podano w tabeli 1. Jako współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego (n) (Dąbkowski i in. 1982), przyjęto iloraz:

$$n = \frac{h_0 + D}{h_2}$$

gdzie:

D – głębokość niecki,

h_2 – druga głębokość sprzężona.

TABELA 1. Parametry hydrauliczne strumienia podczas doświadczenia

TABLE 1. Hydraulic conditions of flow during investigation

q [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	h_0 [m]	a [m]	H [m]	n [-]
0,037	0,130	0,031	0,279	1,25

Na modelu fizycznym użyto materiału rozmywanego ze średnicami charakterystycznymi podanymi w tabeli 2.

TABELA 2. Średnice charakterystyczne materiału rozmywanego

TABLE 2. Characteristic diameters of eroded material

d	d_5	d_{10}	d_{16}	d_{50}	d_{60}	d_{84}	d_{90}	d_{95}
[mm]	0,42	0,53	0,64	1,10	1,40	2,00	2,40	2,50

Doświadczenie polegało na formowaniu dołu rozmycia za umocnieniem w dnie wypełnionym gruntem przez strumień wody o określonych parametrach hydraulicznych. Czas trwania przepływu wynosił 480 minut. Głębokości (h_r) erodowanego przez strumień dna mierzono w profilach podłużnych osiowej płaszczyzny koryta.

Opis modelu matematycznego Euler-Euler do obliczeń przepływu dwufazowego wykorzystanego do prognozowania rozmyć dla warunków nieustalonych

Do analizowania i rozwiązywania praktycznych problemów projektowych stosuje się metodę symulacji komputerowej opartej na podstawowych prawach mechaniki płynów (CFD), takich jak zachowanie masy, pędu i energii.

Prognozując rozmycie poniżej budowli piętrzącej wykorzystano model ośrodka dwufazowego „Eulerian granular two-phase model”, wchodzącego w skład pakietu programu FLUENT, bazującego na bilansie masy pędu i energii. Model ten zakłada, że przepływ ładunku rumowiska składa się z dwóch faz (rys. 2). Pierwszą fazą jest woda (f), drugą zaś piasek (s).

Jednym z podstawowych równań, na których bazuje kod FLUENT (Fluent 2001) jest równanie ciągłości. Zgodnie z prawem zachowania masy w zamkniętym układzie fizycznym masa czynnika nie może powstawać ani ulegać zanikowi. Założenie ciągłości płynu prowadzi do wniosku, że wypełnia on całkowicie przestrzeń objętą przepływem, czyli że nie występują tam przerwy ani żadne inne nieciągłości. Na podstawie tych założeń można przeprowadzić bilans masy, w którego rezultacie uzyskamy równanie ciągłości przepływu. Model rozwiązuje równanie ciągłości przepływu zarówno dla fazy wody (f), jak i dla fazy piasku (s):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_t \rho_t) + \nabla \cdot (\alpha_t \rho_t \vec{v}_t) = 0 \quad (1)$$

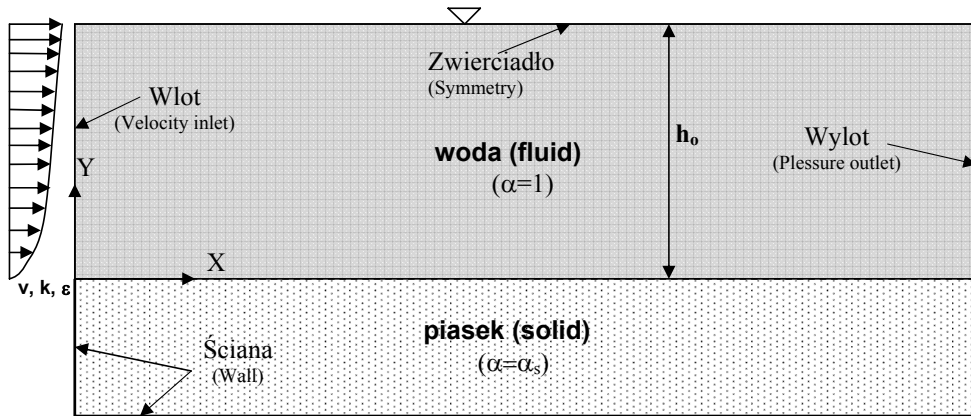
gdzie:

$t = f, s$ i $\alpha_f + \alpha_s = 1$,

α_s – objętość gruntu w fazie s ,

α_f – objętość wody w fazie s ,

\vec{v}_t – prędkości średnie odpowiednio wody i piasku.



RYSUNEK 2. Numeryczna konfiguracja modelu do prognozowania rozmyć: X – kierunek przepływu, Y – przekrój pola przepływu

FIGURE 2. Numerical configuration for the simulation of scour: X – is in the streamwise direction, Y – in the cross-stream direction

Objętość zajęta przez każdą z faz zdefiniowana jest przez parametr α (*volume fraction*). Dla fazy drugiej (piasek) α przyjmuje wartości od zera do jedności ($0 \leq \alpha = \alpha_s \leq 1$). Objętość fazy piasku (s) wyznaczana jest z zależności:

$$V_s = \int_V \alpha_s dV \quad (2)$$

gdzie:

$$\sum_{s=1}^n \alpha_s = 1,$$

$\rho = \alpha_s \rho_s$ – efektywna gęstość fazy gruntu,

ρ_s – fizyczna gęstość fazy piasku (s).

Dla pierwszej fazy (woda – f) wartość parametru α zawsze musi równać się jedności. Śledzenie zmian stężenia piasku w fazie s w trakcie oddziaływania przepływu wyznaczone jest z równania ciągłości przepływu (Fluent 2001):

$$\frac{1}{\rho_s} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot \left(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \right) \right] = S_{\alpha_s} + \sum_f^n (m_{fs} - m_{sf}) \quad (3)$$

gdzie:

m_{fs} – wymiana masy z fazy f do fazy s ,

m_{sf} – wymiana masy z fazy s do fazy f ,

S_{α_s} – źródło masy domyślnie w programie równe zero,

\vec{v}_s – średnia prędkość piasku.

Równanie pędu rozwiązywane jest dla fazy wody f (4) i fazy piasku s (5) odpowiednio (Fluent 2001):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \right) + \nabla \cdot \left(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f \right) = -\alpha_f \nabla P + \nabla \cdot \overset{=}{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + K_{sf} \left(\vec{v}_s - \vec{v}_f \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \right) + \nabla \cdot \left(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s \right) = -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \overset{=}{\tau}_f + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{fs} \left(\vec{v}_f - \vec{v}_s \right) \quad (5)$$

gdzie:

\vec{v}_f, \vec{v}_s – średnie prędkości przepływu odpowiednio dla wody i piasku,

P – parcie reprezentatywne dla dwóch faz,

$\overset{=}{\tau}_s = \alpha_s \mu_s \left(\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^t \right) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \overset{=}{\mathbf{I}}$ – tensor naprężeń dla fazy piasku,

$\overset{=}{\tau}_f = \alpha_f \mu_f \left(\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^t \right)$ – tensor naprężeń dla fazy wody,

$\overset{=}{\mathbf{I}}$ – tensor zbieżności,

$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta}{\pi} \right)^{1/2}$ – lepkość objętościowa piasku,

d_s – średnica miarodajna piasku,

$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1}$ – funkcja dystrybucji, która jest interpretowana jako praw-

podobieństwo zetknięcia się cząstki piasku z inną cząsteczką,

$\alpha_{s,max} = 0,63$ – maksymalna wartość stężenia fazy piasku,

Θ – „granular temperature”, która jest proporcjonalna do energii kinetycznej fluktuacyjnej nieuporządkowanego ruchu cząsteczki,

$e_{ss} = 0.993 - 1.76\beta + 1.56\beta^2 - 0.49\beta^3$ – współczynnik uwzględniający odbicie się cząstki od ściany zdefiniowanej w warunkach brzegowych jako *wall*,

β – kąt natarcia cząstki przy odbiciu od ściany mierzony względem powierzchni ściany,

μ_f – lepkość ścinająca dla wody,

$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr}$ – lepkość ścinająca dla piasku,

$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta}{\pi} \right)^{1/2}$ – lepkość kolizyjna,

$\mu_{s,fr} = \frac{P_s \sin \phi}{2 \sqrt{I_{2D}}}$ – lepkość tarcia,

$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\Theta \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right]$ – lepkość kinematyczna,

ϕ – kąt tarcia wewnętrzznego piasku,

$P_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s$ – parcie gruntu,

I_{2D} – tensor dewiacji naprężeń,

$K_{sf} = K_{fs} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f}{V_{r,s} d_s} C_D \left(\frac{Re_s}{V_{r,s}} \right) \left| \vec{v}_s - \vec{v}_f \right|$ – współczynnik międzyfazowej wymiany pędu,

$C_D = \left(0.63 + 4.8 \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right)^{-2} \right)^2$ – funkcja tarcia,

$Re_s = \frac{\rho_f d_s \left| \vec{v}_s - \vec{v}_f \right|}{\mu_f}$ – względna liczba Reynoldsa pomiędzy fazą wody a fazą piasku,

$v_{r,s} = 0.5 \left(A - 0.06 Re_s + \sqrt{(0.06 Re_s)^2 + 0.12 Re_s (2B - A) + A^2} \right)$ – graniczna prędkość korelacyjna dla fazy piasku, gdzie dla $\alpha_f \leq 0.85$ – $A = \alpha_f^{4.14}$; $B = \alpha_f^{1.28}$.

Dodatkowo, kiedy mamy do czynienia z przepływem turbulentnym, rozwiązane jest równanie transportu dla fazy wody (*f*). W wyniku analizy dostępnych modeli turbulentnych proponowanych w pakiecie FLUENT przyjęto model *k-ε* standard (Siwicki 2007). Model ten dla warunków ustalonych dawał największą zgodność charakterystyk przepływu z wynikami uzyskanymi na modelach fizycznych.

Prognoza kinetycznej energii turbulencji (k_f) i jej przedziału rozproszenia (ε_f) jest otrzymana z poniższych równań (Fluent 2001):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f k_f) + \nabla \cdot \left(\alpha_f \rho_f \vec{U}_f k_f \right) = \\ = \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_k} \nabla k_f \right) + \alpha_f G_{k,f} - \alpha_f \rho_f \varepsilon_f + \alpha_f \rho_f \Pi_{k_f} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \varepsilon_f) + \nabla \cdot \left(\alpha_f \rho_f \vec{U}_f \varepsilon_f \right) = \\ = \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_f \right) + \alpha_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} (C_{1\varepsilon} G_{k,f} - C_{2\varepsilon} \rho_f \varepsilon_f) + \alpha_f \rho_f \Pi_{\varepsilon_f} \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

$$\Pi_{k_f} = \frac{K_{f,s}}{\alpha_f \rho_f} \left(k_{s,f} - 2k_f + v_{sf} \cdot \vec{v}_{dr} \right) \quad \Pi_{\varepsilon_f} = C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon_f}{k_f} \Pi_{k_f} \quad - \text{parametry opisujące}$$

oddziaływanie fazy piasku (s) na fazę wody (f),

$$v_{dr} = -D_{t,sf} \left(\frac{1}{\sigma_{sf} \alpha_s} \nabla \alpha_s - \frac{1}{\sigma_{sf} \alpha_f} \nabla \alpha_f \right) \quad - \text{prędkość osadu,}$$

$D_{t,sf}$ – współczynnik dyfuzji turbulენტnej,

$\sigma_{sf} = 0,75$,

k_{sf} – kowariancja prędkości dla fazy wody i gruntu,

K_{fs} – międzyfazowy współczynnik wymiany pędu,

$G_{k,f}$ – produkcja kinetycznej energii turbulენტnej przepływu,

$C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $C_{3\varepsilon} = 1,2$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

W celu opisanja turbulencji w fazie piasku zastosowano teorię Tchen, używając modelu turbulენტnego „k- ε dispersed”. Skala czasu i długości zostały wykorzystane do scharakteryzowania ruchu fazy w celu oszacowania współczynników dyspersji, funkcji korelacji oraz kinetycznej energii turbulენტnej dla fazy piasku. Określane są one na podstawie charakterystyk ruchu turbulენტnego fazy wody za pomocą dwóch skal czasowych. Pierwsza skala czasu związana jest z efektem bezwładności cząstek piasku, która jest reprezentowana przez:

$$\tau_{F,sf} = \alpha_s \rho_f K_{sf}^{-1} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} + Cv \right)$$

gdzie $C_v = 0,5$ – dodatkowy współczynnik masy.

Druga skala czasu charakteryzuje korelację czasową ruchu turbulentnego lub zawirowań cząsteczek gruntu, która jest zapisana jako:

$$\tau_{f,sf} = \tau_{t,f} \left(1 + C_\beta \xi^2\right)^{1/2}$$

gdzie:

$$\xi = \left| \vec{v}_r \right| / \sqrt{\frac{2}{3} k_f},$$

$$\tau_{t,f} = \frac{3}{2} C_\mu \frac{k_f}{\varepsilon_f},$$

$\left| \vec{v}_r \right|$ – średnia wartość lokalnej względnej prędkości pomiędzy cząstką piasku a otaczającą ją wodą,

$C_\beta = 1,8 - 1,35 \cos^2 \theta$ – gdzie θ jest kątem pomiędzy średnią prędkością cząstki piasku a średnią relatywną prędkością.

Współczynnik pomiędzy tymi dwoma charakterystycznymi czasami zapisać można jako:

$$\eta_{sf} = \frac{\tau_{t,sf}}{\tau_{F,sf}} \quad (8)$$

Kinetyczna energia turbulencji dla fazy piasku (k_s) wyrażona jest zależnością:

$$k_s = k_f \left(\frac{b^2 + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right) \quad (9)$$

oraz dodatkowa lepkość fazy piasku (D_s):

$$D_s = D_{t,sf} + \left(\frac{2}{3} k_s - b \frac{1}{3} k_{sf} \right) \tau_{F,sf} \quad (10)$$

gdzie: $b = (1 + C_v)(\rho_s / \rho_f + C_v)^{-1}$, a k_{sf} jest kowariancją prędkości fazy wody.

W celu uwzględnienia przypadkowego ruchu cząstek fazy piasku rozwiązywane jest dodatkowe równanie transportu, opisujące energię kinetyczną przypadkowego ruchu cząstek piasku w celu określenia parametru Θ_s – „granular temperature”. Równanie transportu z teorii kinetyki zapisane jest następująco (Fluent 2001):

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \Theta_s) + \nabla \cdot \left(\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \Theta_s \right) \right] = \\ & = \left(-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \vec{v}_s + \nabla (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} + \phi_{fs} \end{aligned} \quad (11)$$

gdzie:

$\left(-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \vec{v}_s$ – produkcja energii przez tensor naprężeń piasku,

$k_{\Theta_s} = \frac{15 d_s \rho_s \alpha_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{4(41-33\eta)} \left[1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta-3) \alpha_s g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi} (41-33\eta) \eta \alpha_s g_{0,ss} \right]$ – współ-

czynnik dyfuzji,

$k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s$ – dyfuzyjny przepływ energii uziarnienia,

$\eta = \frac{1}{2} (1 + e_{ss})$,

$\gamma_{\Theta_s} = \frac{12(1-e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \Theta_s^{\frac{3}{2}}$ – rozproszenie energii w wyniku kolizji ziaren piasku,

$\phi_{fs} = -3K_{fs} \Theta_s$ – wymiana energii kinetycznej prędkości pomiędzy fazą piasku (s) a fazą wody (f) w wyniku nieuporządkowanego ruchu cząstek piasku.

Analizując dynamikę pojedynczej cząstki piasku, można zidentyfikować następujące siły: statyczny gradient ciśnienia, gradient ciśnienia piasku, ewentualnie siły wynikające z oddziaływania pomiędzy cząsteczkami; siła tarcia powstała w wyniku różnych prędkości pomiędzy dwoma fazami, lepkość, siły masowe. Inne siły przyjęto jako mało ważne.

W celu opisanie oddziaływań zachodzących pomiędzy fazami – określenia współczynnika wymiany międzyfazowej (K_{fs}) zastosowano model „Symmetric drag”:

$$K_{fs} = \frac{\alpha_f (\alpha_f \rho_f + \alpha_s \rho_s) f}{\tau_{fs}} \quad (12)$$

gdzie:

$f = \frac{C_D \text{Re}}{24}$ – funkcja tarcia pomiędzy dwoma fazami,

$C_D = \begin{cases} 24(1+0,15\text{Re}^{0,687})/\text{Re} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0,44 & \text{Re} > 1000 \end{cases}$ współczynnik tarcia międzyfazowego,

$$\tau_{fs} = \frac{\alpha_f (\alpha_f \rho_f + \alpha_s \rho_s) d_s^2}{18(\alpha_f \mu_f + \alpha_s \mu_s)}$$

Model ten przyjęto w wyniku weryfikacji innych dostępnych modeli z teorią transportu rumowiska, jak również na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych dla innych dostępnych modeli w pakiecie FLUENT.

W celu rozwiązania powyższych równań należy zdefiniować i wprowadzić warunki brzegowe oraz początkowe warunki brzegowe. Jest to jeden z ważniejszych etapów analizy CFD.

Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie przedstawionych równań i założeń przeprowadzono obliczenia przebiegu rozmycia w czasie trwania przepływu. Uzyskane wyniki porównano z wynikami laboratoryjnymi.

Obliczenia prowadzone były na modelu dwuwymiarowym (w osi modelu) ze względu na czasochłonność obliczeń. Siatkę obliczeniową skonstruowano według numerycznej konfiguracji modelu i przedstawiona na rysunku 3. Składała się z 6150 komórek i 6342 węzłów.

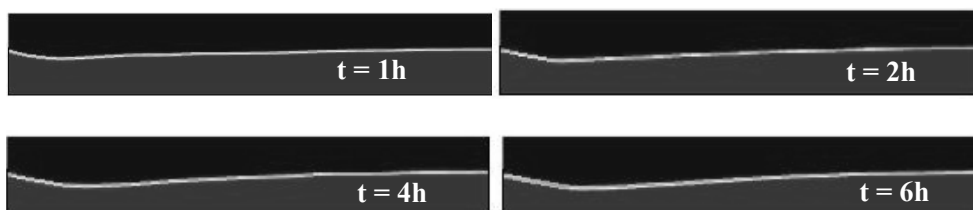


RYSUNEK. 3. Siatka elementów skończonych badanego modelu
FIGURE 3. The grid for two-phase model calculations

Dokonano zagęszczenia siatki w strefie interakcji między fazą wody a fazą piasku. Ze względu na bardzo długi czas obliczeń w celu zminimalizowania liczby węzłów siatki zrezygnowano z symulacji przepływu na budowli. Przedstawiona siatka reprezentuje obszar strefy rozmywanej, gdzie wlot jest przekrojem końca umocnień. Aby uwzględnić charakter strumienia na wylocie z budowli, na wlocie modelu zadano: rozkłady prędkości (v_x i v_y) oraz rozkłady kinetycznej energii turbulentnej (k) oraz jej dyssypację (ϵ). Rozkłady tych parametrów w przekroju końca umocnień uzyskano z symulacji przepływu przez model dla warunków ustalonych. Po zdefiniowaniu modelu, przyjmując jako średnicę materiału rozmywanego 0,0011 m oraz maksymalne stężenie fazy piasku 0,63, przystąpiono do procesu obliczeń.

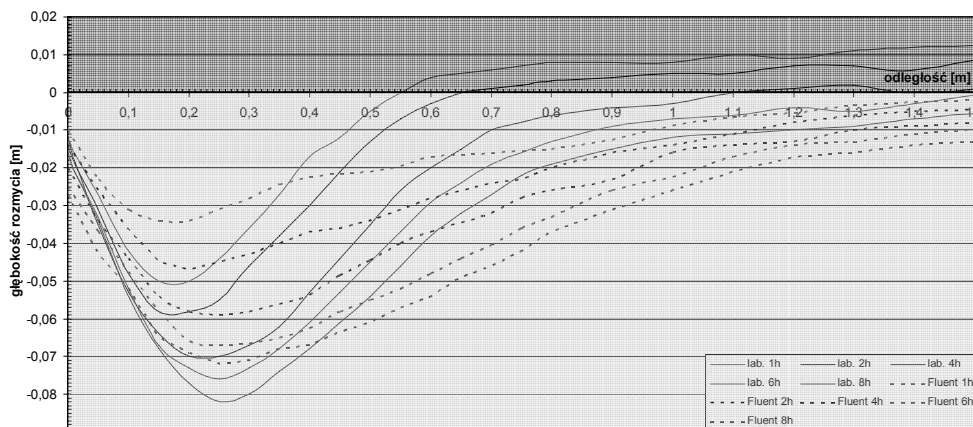
Układ uzyskiwał rozwiązanie zdefiniowanych równań w kroku czasowym 0,001 s w 40 iteracjach. Czas ośmiu godzin trwania przepływu uzyskano po 10 miesiącach obliczeń. Przyspieszenie procedury obliczeniowej poprzez zwiększenie kroku czasowego wymagałoby zastosowania rzadszej siatki obliczeniowej, co w efekcie pro-

wadziłyby do zmniejszenia dokładności obliczeń. Gęstość zastosowanej siatki i tak była mała w stosunku do dokładności, z jaką odczytywane były rozmycia na modelu fizycznym. Z przeprowadzonych symulacji dla siatek o mniejszej gęstości uzyskiwano niezadowalające wyniki. Wyniki przeprowadzonej symulacji za pomocą programu FLUENT przedstawiono na rysunku 4.



RYSUNEK 4. Profile rozmyć po różnym czasie trwania przepływu obliczone programem FLUENT
 FIGURE 4. Bed profiles during the development of scour calculated by FLUENT

Porównanie uzyskanych profili rozmyć w laboratorium z wynikami obliczeń numerycznych programem FLUENT przedstawia rysunek 5.



RYSUNEK 5. Porównanie profili rozmyć uzyskanych z modelu matematycznego z profilami z badań laboratoryjnych

FIGURE 5. Profiles of erosion on the model and comparison with numerical simulation

W wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych uzyskano zbliżone profile rozmyć na obu modelach.

Pierwszą z przypuszczalnych przyczyn uzyskanych odchyłeń od wyników laboratoryjnych są ograniczenia w zdefiniowaniu materiału rozmywanego. W modelu numerycznym materiał ten może być zdefiniowany przez jedną średnicę, co w oczywisty sposób wpływa na rozbieżności w uzyskanych wynikach. Przyjmując materiał o jednakowej średnicy, pomijany jest wpływ różnoziarnistości materiału na takie

zjawiska, jak wymywanie cząstek drobniejszych, sortowanie materiału i obrukowanie dna wyboju, przysłanianie cząstek mniejszych przez cząsteczki gruntu większe.

Kolejną przyczyną rozbieżności jest problem z rozwiązywaniem interakcji międzyfazowej i parametrów przepływu w momencie, kiedy faza gruntu znajduje się we wcześniej zadeklarowanej fazie wody (powstanie osadku, odsypiska). Układ nie radzi sobie wówczas z rozwiązywaniem parametrów przepływu w fazie gruntu. W przeprowadzonych obliczeniach na początku trwania przepływu widoczne było powstawanie osadku, który bardzo szybko był wymywany ze strefy wody. Utrzymanie tego osadku i prawidłowe rozwiązanie parametrów przepływu i interakcji międzyfazowej możliwe byłoby w przypadku zastosowania dynamicznej siatki, która zmieniałaby się wraz ze zmianą profilu rozmycia, deklarując na nowo strefę wody i strefę gruntu. Niestety program nie umożliwia stosowania tego narzędzia przy zastosowaniu modelu Eulerian granular. Rozwiązać ten problem można przez ręczne wprowadzanie nowej siatki dla powstałego profilu rozmycia po określonym czasie trwania przepływu i zadeklarowaniu na nowo fazy gruntu i fazy wody. Niestety są to czynności czasochłonne, ponieważ procedurę tę należałoby wykonywać co 0,1 s (dla badanego przypadku) – po takim czasie trwania przepływu osad ten powstaje, dłuższe obliczenia powodują rozmycie osadku. Procedurę tę można przyspieszyć, wykorzystując narzędzia do zautomatyzowania tych czynności poprzez stworzenie plików wsadowych do programu GAMBIT i komendy „Jurnal” w programie FLUENT.

Innym czynnikiem, mogącym wpłynąć na ostateczny wynik, jest nierealistyczny wzrost prędkości wody w gruncie w trakcie długiego czasu obliczeń dla warunków nieustalonych. Prędkości te osiągają wartości znacznie większe od prędkości wynikającej ze współczynnika filtracji dla badanego gruntu. Układ ten nie radzi sobie z rozwiązywaniem równań ruchu turbulentnego dla dwóch faz. W niniejszych obliczeniach problem ten rozwiązano przez obliczenie pola prędkości dla jednej fazy (wody), używając równania Navier-Stokesa i modelu $k-\epsilon$ bez uwzględniania efektu uziarnienia. Sprowadzało się to do obliczenia pola prędkości dla fazy wody w strefie wody i gruntu dla warunków ustalonych w czasie, przy zadanych zerowych prędkościach cząstek gruntu. Tak obliczone pole prędkości było wyjściowe do obliczeń w warunkach nieustalonych dla modelu dwufazowego. Procedurę tę powtarzano w trakcie trwania przepływu w momencie, kiedy prędkości wody w gruncie przyjmowały wartości mało realistyczne.

Wnioski

Symulację przepływu dwufazowego (2D) wykorzystano do prognozowania rozmycia poniżej budowli piętrzącej i porównano z wynikami badań laboratoryjnych. Modelowanie numeryczne przeprowadzono, wykorzystując pakiet programów CFD FLUENT, który rozwiązuje równania zachowania masy, pędu i energii dla każdej z faz (faza gruntu i faza wody) indywidualnie, model Euler-Euler i zmodyfikowany

model przepływu turbulentnego k- ϵ rozwiązywany dla fazy wody. Parametry interakcji międzyfazowej (woda-piasek, piasek-piasek) zostały ustalone w modelu FLUENT. Uzyskano podobne profile rozmyć z modelu numerycznego i z badań laboratoryjnych. Przyczynami rozbieżności w uzyskanych wynikach są ograniczenia w modelowaniu materiału rozmywanego i problemy modelu w momencie zajęcia wcześniej zadeklarowanego obszaru dla fazy wody przez fazę gruntu. Rozwiązaniem tego problemu byłoby zastosowanie ruchomej siatki, niestety program nie daje takiej możliwości dla zastosowanego modelu – nierealistyczny jest wzrost prędkości wody w strefie piasku.

Literatura

- BŁAŻEJEWSKI R., ZAWADZKI P. 2001: Local scour in non-uniform bed material below a horizontal solid apron. *Arch. of Hydro-Engin. and Envinronmental Mech.* 48, 1: 3–17.
- DĄBKOWSKI Sz.L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Fluent 6.0, 2001: User' Guide Fluent Inc.
- KALIŠ J. 1961: Diminution de la turbulence derivire ala ressant Rapport 1.11 IX Congress de AIRH Belgrad.
- POPOVA K.S. 1970: Issledowanie kinematičeskoj struktury potoka na risbermie i v jame razmyva za vodoslivnymi plotinami na niesviaznyh gruntach. *Izvestia VNIIG*, 94.
- RAJARATNAM N. 1976: Turbulent jet. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- RAJARATNAM N., BERRY B. 1977: Erosion by circular turbulent wall-jet. *J. Hydr. Res.* 15(3): 277–289.
- REIDAR N., OLSEN B. 2000: CFD algorithms for hydraulic engineering. Department of Hydraulic and Environmental Engineering. The Norwegian University of Science and Technology.
- ROSINSKI K.I. 1961: Hydraulic of scouring pits. Chapter 2. Problems of river runoff control, Acad. Sci. USSR. Section for Scientific Study of Water Engineering Problems.
- ROUSE H. 1939: Criteria for similarity in the transportation of sediment. *Proc. Hyd. Conf. Studies Engineering Bull.*, Univ. of Iowa.
- SIWICKI P. 2007: Modelowanie fizyczne i numeryczne rozmyć poniżej budowli piętrzącej. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Stare Jabłonki 19–22.06.
- URBAŃSKI J. 2003: Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań modelowych. Rozprawa doktorska. Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW, Warszawa.

Summary

Numerical simulation of scour below the dam. The scour below the dam is numerically simulated using an Eulerian two-phase model that implements Euler-Euler coupled governing equation for fluid and solid phase and a modified k- ϵ turbulence closure for the fluid phase and comparison with laboratory results. The modeling system being a part of CFD software package FLUENT. Both flow-particle and particle-particle interactions are considered in the model. During the simulations, the interface between sand and water is specified using a threshold volume fraction of sand. The predictions of bedform evolution are in good agreement with conducted laboratory measurements.

Autor's address:

Piotr Siwicki

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska

ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

e-mail: piotr_siwicki@sggw.pl