

شبیه‌سازی عددی امواج غلتان در تنداب‌ها

بهروز عاقبتی^{۱*} و جلال بازرگان^۲

^{۱*} - نویسنده مسئول، دانشجوی دکترای مهندسی عمران، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان

^۲ - دانشیار بخش مهندسی عمران، گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان

تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۹

چکیده

تنداب‌ها یکی از انواع سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که به واسطه جریان فوق‌بحرانی باعث ایجاد امواج غلتان و آشفتگی در سطح آزاد جریان می‌شود. در این تحقیق به وسیله نرم‌افزار فلوئنت و با استفاده از مدل حجم سیال و الگوریتم پیزو، شکل‌گیری امواج غلتان در مدل فیزیکی سرریز سد آزاد و مدل‌های عددی بررسی شده است. برای این منظور عمق جریان و ارتفاع موج در نقاط متفاوتی از طول تنداب‌ها به ازای دبی‌های ورودی مختلف و عرض‌ها و شیب‌های طولی مختلف به دست آمد. نتایج حاصل نشان داد که زبری کف و دیواره‌ها نقش به‌سزایی در جلوگیری از تشکیل امواج غلتان دارد، همچنین برای مقاطعی از تنداب که نسبت ارتفاع موج به عمق جریان در آن مقطع بیشتر از $0.57+$ باشد، باید انتظار تشکیل امواج غلتان را داشت.

کلید واژه‌ها: امواج غلتان، الگوریتم پیزو، تنداب، فلوئنت، مدل حجم سیال.

Numerical Simulation of Roll Waves in Chutes

B. Aghebatie^{1*} and J. Bazargan²

1* - Ph.D Student of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures Department, Semnan University, Iran

2- Ph.D, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering University of Zanjan, Iran

Received: 31 August 2014

Accepted: 8 July 2015

Abstract

Chutes are one type of the many hydraulic structures that cause in the formation of the waves and turbulence in the free surface of flow through super critical flow. In this study by the fluent software and by using volume of fluid model and PISO algorithm, the formation of the rolling waves in the physical model of azad damweir and numerical models have been considered. For this purpose, flow depth and weave height are calculated along the chutes length for different discharges, widths and longitudinal slopes of the chute. The results indicate that roughness of the bed and walls impede the formation of the rolling wave, also the rolling waves are expected to be generated for sections of the chute when weave height to hydraulic depth ratio in that section is above 0.57.

Keywords: Roll wave, PISO algorithm, Chute, Fluent, Volume of fluid model.

مقدمه

همواره فوق‌بحرانی می‌باشد. در این حالت زمانی که یک آشفتگی کوچک بر روی حالت یکنواخت پایدار تحمیل می‌شود، جریان سرانجام درون یک سری امواج شکسته یا منفذهای جدا شده دو مقطع از جریان متغیر تدریجی در یک الگوی پلکانی نمو پیدا می‌کند. این الگوی متناوب ناپیوسته اصطلاحاً امواج غلتان نامیده می‌شود. امواج غلتان به سمت پایین دست جریان در یک سرعت

چنان چه در فواصلی از مسیر انتخاب شده برای احداث کانال، شیب طبیعی زمین از شیب لازم برای کف کانال تندتر باشد، برای انتقال آب از سطح بالاتر به پایین‌تر می‌توان از تنداب استفاده کرد. معمولاً جریان یکنواخت در یک کانال باز زمانی که سرعت خیلی زیاد باشد یا شیب خیلی تند باشد، ناپایدار می‌شود. از آنجا که تنداب‌ها دارای شیب طولی تندی می‌باشند، لذا جریان در طول آنها

کریستو و همکاران^۸ (۲۰۰۹)، معیار عدد مونتوری (۱۹۶۱) در ارتباط با طول کانال برای شکل‌گیری امواج غلطان روی بستر ثابت را اصلاح کردند. آنها نشان دادند که امواج در جریان‌های دانه‌ای متراکم که از ذرات ماسه و مهره‌های شیشه‌ای تشکیل شده‌اند با مشخصه‌هایی شبیه به آن در آب رشد می‌کند. برای جریان آب های شفاف، طول حداقل کانال مورد نیاز برای پیدایش امواج غلطان می‌تواند بدین صورت تعیین شود که هر کجای طول که اوج آشفستگی به یک مقدار حد نهایی ε برسد، طول حداقل کانال برای پیدایش امواج غلطان است. طول حداقل کانال بدون بعد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L'_{\min} = -\frac{2(F+1)}{Fb(F-K)\cos\theta} \ln(\varepsilon) \quad (3)$$

که در اینجا F : برابر عدد فرود و θ : معرف زاویه شیب بستر و b : یک ضریب بدون بعد می‌باشد که برابر است با مقادیر زیر: برای جریان آرام $b = -2S_0$ و برای جریان آشفته $b = -S_0$ است. K یک ضریب بدون بعد است که برابر است با $K = -\frac{a}{b}$ و مقدار a برای جریان آرام برابر $a = S_0$ و برای جریان آشفته برابر با $a = 2S_0$ می‌باشد و در معادله بالا:

$$L'_{\min} = \frac{Lg}{U_0^2} \quad (4)$$

U_0 : معرف سرعت متوسط جریان و g : معرف شتاب جاذبه و L : معرف طول حداقل کانال می‌باشد. طول حداقل ارائه شده در معادله (۳) به ازای $\cos\theta \approx 1$ برای پیش‌بینی امواج غلطان در جریان آب‌های شفاف برای دو حالت آرام و آشفته جریان است. ε : نشان‌دهنده شیب موج است و مقدار حد نهایی آن به وسیله مطابقت داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی می‌شود.

کارلسون^۹ (۲۰۰۷) شکل‌گیری امواج غلطان را در کانال کوچک با استفاده از روش حجم محدود و مدل حجم سیال و مدل آشفستگی $k-\varepsilon$ شبیه‌سازی نمود. همچنین برای کوپل کردن سرعت- فشار از الگوریتم پی‌زو و از طرح کوئیک برای گسسته‌سازی جملات مومنتوم استفاده کرد. نتایج حاصل از مدل سازی عددی شامل سرعت جریان و فشار در طول کانال، مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت که دقت بالای این روش از مدل سازی را می‌رساند. در تحقیق حاضر جریان آب روی سرریز سد آزاد با استفاده از مدل عددی فلوئنت شبیه‌سازی گردید و با نتایج مدل فیزیکی مقایسه گردید. از آنجا که معیارهای مختلف برای پیش‌بینی امواج غلطان نتایج مشابهی را ارائه نمی‌دهند، پژوهش حاضر به منظور صحت‌سنجی معیارهای ارائه شده قبلی و ارائه معیار جدید صورت گرفت. برای این منظور از نرم‌افزار فلوئنت و برای تعیین سطح آزاد جریان در طول تنداب روش حجم سیال و

ثابت، با تغییر حالت دائمی از جریان زیر بحرانی به فوق‌بحرانی و تغییر حالت به جریان زیر بحرانی به وسیله یک پرش هیدرولیکی در چهارچوب یک حرکت یکنواخت پیشرفت می‌کنند (کیو و ژو^۱ ۲۰۰۶). جفریز^۲ (۱۹۲۵) و دریشلر^۳ (۱۹۴۹) با انجام آزمایش‌هایی بر روی کانال مستطیلی عریض و ایواسا^۴ (۱۹۵۴) با انجام آزمایش‌هایی بر روی کانال با شکل دلخواه نشان دادند که به ازای عدد فرود بزرگتر از ۲ جریان ناپایدار شده و امواج غلطان تشکیل می‌شوند. معیار عدد فرود در زیر ارائه شده است، در صورتی که نابرابری زیر صادق باشد باید انتظار شکل‌گیری امواج غلطان را داشته باشیم.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} > 2 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Fr : معرف عدد فرود، V : برابر سرعت جریان و y : نماینده عمق جریان و g : برابر شتاب جاذبه می‌باشد. مونتوری^۵ (۱۹۶۱) و بروک^۶ (۱۹۶۹) با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که طول کانال تاثیر بسزایی در تشکیل امواج غلطان دارد. مونتوری (۱۹۶۱) معیاری را برای تشکیل امواج غلطان متشکل از دو قسمت بی‌بعد که قسمت اول عدد ودرنیکیف و قسمت دوم با طول کانال در ارتباط بود ارائه داد. آرمانی و ریکچیا^۷ (۲۰۰۶) آزمایش‌هایی روی کانال با بستر ثابت به ازای امواج با طول موج متفاوت انجام داده که نتایج حاصله در مورد محل تشکیل امواج غلطان با معیار عدد مونتوری (۱۹۶۱) مطابقت نداشت. معیار عدد مونتوری (۱۹۶۱) در زیر ارائه شده است، در صورتی که نابرابری زیر برقرار باشد باید انتظار تشکیل امواج غلطان را داشته باشیم.

$$V_e > 9M^2 + 1.1 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $V_e = \frac{2}{3} \times \frac{b}{w_p} \times \frac{V}{\sqrt{gd \cos\theta}}$: معرف عدد

و درنیکیف، $M^2 = \frac{V^2}{g_s f L \cos\theta}$: معرف مربع عدد مونتوری، b :

معرف عرض کف تنداب، w_p : معرف پیرامون مرطوب، d : نماینده متوسط سطح آب در تنداب، V : برابر سرعت جریان، g : شتاب جاذبه، S_f : میانگین شیب گرادیان انرژی، L : نشان‌دهنده طول مقطعی که در آنجا باید شکل‌گیری امواج بررسی شود و θ : نشان‌دهنده زاویه شیب افت انرژی می‌باشند.

- 1- Que and Xu
- 2- Jeffres
- 3- Dressler
- 4- Iwasa
- 5- Montouri
- 6- Brock
- 7- Armanini and Recchia

8- Cristo *et al.*
9- Carlson

مدل $k - \epsilon$ به دلیل دقت معقولانه برای دامنه های وسیع جریان، کاربردی ترین مدل دو معادله ای می باشد که در این مدل میدان آشفتگی بر حسب دو متغیر انرژی جنبشی اغتشاش (k) و تلفات انرژی جنبشی اغتشاش (ϵ) بیان می شود. مدل $k - \epsilon$ بر سه نوع استاندارد و RNG و مدل قابل درک می باشد. لاندر و اسپالدینگ^۳ (۱۹۷۴) از اولین کسانی بودند که مدل $k - \epsilon$ استاندارد که یک مدل نیمه تجربی می باشد را ارائه کردند.

کوپل نمودن سرعت-فشار

فلوئنت^۴ سه روش سیمپل، سیمپلس و پیزو را برای کوپل کردن سرعت-فشار در حل کننده تفکیکی پیش بینی نموده است. به طور کلی برای محاسبات حالت دائمی الگوریتم سیمپل یا سیمپلس و برای شبکه های با درجه تغییر شکل (کجی) بالا و محاسبات وابسته به زمان الگوریتم پیزو به خصوص که از بازه های زمانی بزرگ استفاده شود، توصیه شده است. استفاده از الگوریتم سیمپلس در مسائلی که افزایش ضرایب زیرتخفیف مورد نظر باشد بهتر از الگوریتم سیمپل است. برای جریان های غیرپیچیده شامل جریان های آرام و جریان های پیچیده مانند مدل های آشفتگی که همگرایی منحصر به کوپل نمودن سرعت-فشار می باشد، برای یک حل همگرایی سریع تر باید از الگوریتم سیمپلس استفاده نمود و ضریب زیرتخفیف فشار برابر یک تعیین می شود که به همگرایی سریع تر کمک می نماید. در بعضی از مسائل افزایش ضریب زیرتخفیف به یک می تواند باعث واگرایی شود که برای چنین مواردی باید از یک مقدار ضریب زیرتخفیف همگرا و یا از الگوریتم سیمپل استفاده نمود. الگوریتم پیزو محاسباتی دقیق به ازای بازه زمانی بزرگ و ضرایب زیرتخفیف یک برای فشار و مومنتوم ارائه می هد.

مدل آزمایشگاهی

برای ارزیابی صحت مدل سازی عددی از مدل فیزیکی سرریز سد آزاد در بخش سازه های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب که با مقیاس ۳۳/۳۳ و از جنس پلکسی گلاس ساخته شده و با دبی ورودی ۸۰۰ مترمکعب مورد مطالعه قرار گرفته بود، استفاده شد. مطابق شکل (۱) سرریز از نوع اوجی با معادله $Y = 0.0584X^{1.85}$ و طول افقی ۹/۷۸ متر است. طول افقی تندابها با شیب پنج درصد و ۳۶/۴ درصد و عرض ۳۰ متر به ترتیب ۴۵/۴ متر و ۱۹۸/۳۱ متر و پرتاب کننده به شعاع ۱۵ متر و طول افقی ۱۰/۵۸ متر و عرض ۳۰ متر است. مطابق جدول زیر متغیر هیدرولیکی شامل فشار هیدرواستاتیکی، سرعت و عمق جریان در طول مدل فیزیکی در حدود ۵۰ نقطه اندازه گیری شده است. موقعیت نقاط اندازه گیری پارامترهای هیدرولیکی مدل در نزدیکی دیواره ها و در نقاط میانی عرض مدل می باشد.

مدل آشفتگی $k - \epsilon$ و از الگوریتم پیزو برای کوپل نمودن سرعت-فشار استفاده شد.

مواد و روش ها

روش حجم محدود

روش حجم محدود یکی از انواع روش مانده های وزن دار می باشد. در این روش دامنه مورد نظر به تعدادی حجم کنترل غیر هم پوشان به طوری که هر حجم کنترل حول یک نقطه از میدان قرار گیرد، تقسیم می شود و سپس از معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال گیری شده و معادله ها به روش عددی گسسته سازی می شوند. پس از انتگرال گیری روی حجم کنترل مربوط به هر گره، عبارت انتقال و پخش باید به نحوی گسسته سازی شوند که رابطه ای پایدار را ارائه دهند.

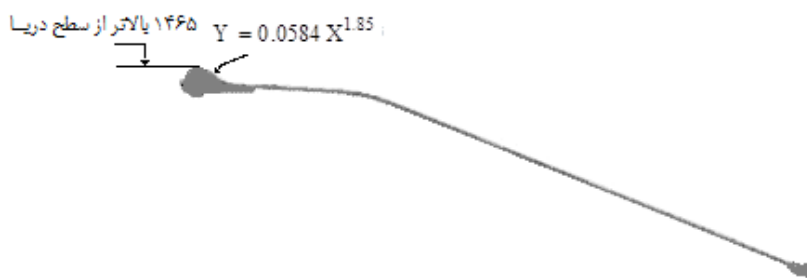
شبیه سازی سطح آزاد جریان

مدل حجم سیال اولین بار توسط هیرت و نیکول^۱ (۱۹۸۱) مطرح شد. مدل حجم سیال بر این اصل تکیه دارد که دو یا چند سیال تداخلی با هم ندارند و برای هر فاز جدید که به مدل اضافه می شود، متغیری به نام نسبت حجمی فاز در سلول محاسباتی تعریف می شود. در هر حجم کنترل، جمع نسبت های حجمی کلیه فازها برابر یک است. با استفاده از نسبت حجمی هر یک از فازها که در هر نقطه مشخص است، مقادیر متغیرها و خصوصیات بین فازها لحاظ می شود که مقادیر متوسط حجمی را نشان می دهد. به عبارت دیگر اگر نسبت حجمی سیال q را در یک سلول با α_q نشان دهیم، اگر α_q برابر یک باشد، سلول از سیال q پر است و اگر α_q برابر صفر باشد، سلول از سیال q خالی است و اگر مقدار جزء حجم بین صفر و یک باشد، در سلول هر دو فاز وجود دارد و بین سیال q و سیال دیگر فصل مشترک شکل می گیرد. پس با در نظر گرفتن سطح آزاد در یک جزء حجمی معین، سطح آزاد جریان را می توان تعیین نمود. برای q امین فاز، معادله پیوستگی به صورت زیر می باشد (چن و همکاران^۲ ۲۰۰۲):

$$\frac{1}{r_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q r_q) + \nabla \cdot (\alpha_q r_q \bar{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، α_q ، ρ_q و \bar{v}_q : به ترتیب جزء حجمی، چگالی و سرعت برداری مربوط به فاز q می باشند. همچنین m_{pq} : انتقال جرم از فاز p به فاز q و m_{qp} : انتقال جرم از فاز q به فاز p می باشد.

عاقبتی و بازرگان: شبیه‌سازی عددی امواج غلتان در تنداب‌ها



شکل ۱- مدل آزمایشگاهی سرریز سد آزاد

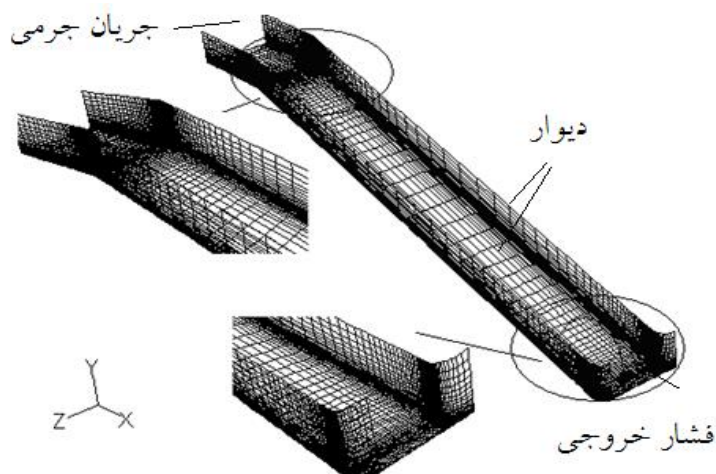
جدول ۱- نتایج متغیرهای هیدرولیکی در مدل آزمایشگاهی سرریز سد آزاد

مدل آزمایشگاهی	دبی ورودی = ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب		
	عمق جریان (متر)	سرعت (متر بر ثانیه)	ارتفاع معادل فشار (متر)
۰	۴/۹۸	۸/۱۵	۲/۱
۸/۴۱	۳/۲	۱۲/۵۳	۱/۷۲
۱۵/۲۸	۲/۷۹	۱۴/۱۶	۵/۶۳
۳۰/۵۴	۲/۵	۱۵/۵۲	۲/۰۱
۶۰/۵۴	۲/۲۷	۱۶/۳۴	۱/۵۹
۷۲/۳	۱/۸۴	۱۶/۷۷	۱/۱۷
۸۲/۵۳	۱/۷۹	۱۷/۹۳	۱/۰۹
۹۰/۹۳	۱/۶۹	۱۸/۷۳	۰/۷۲
۱۰۷/۴۷	۱/۵۹	۲۱/۸۵	۱/۱۸
۱۳۴/۹۴	۱/۲۹	۲۴/۱۴	۰/۷۹
۱۵۹/۶۷	۱/۴۴	۲۶/۱۸	۰/۵۳
۱۸۴/۴	۱/۴۲	۲۸/۱۱	۰/۷۴
۲۰۹/۱۲	۱/۲۳	۳۰/۱۳	۰/۶۷
۲۴۷/۵۹	۱/۲۵	۳۲/۶۱	۰/۳۹
۲۶۴/۰۷	۱/۲۴	۳۲/۲۱	۰/۲۹

مدل سازی عددی

شبکه‌بندی مدل‌ها از شبکه‌های مستطیلی شش‌وجهی نابرابر استفاده شده است. ابعاد این شبکه‌بندی برای مدل با مقیاس ۳۳/۳۳: ۱: برای قسمت‌های ریز و درشت از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۱۵ متر تا ۰/۰۱۵ متر و در مدل‌ها با مقیاس واقعی از ۰/۰۲ تا ۰/۱ متر متغیر بود. از آنجا که برای y^+ بین ۳۰ تا ۳۰۰ رابطه لگاریتمی سرعت معتبر می‌باشد قابل ذکر است که در ابتدا y^+ عددی بزرگ به دست آمد و بعد از تصحیح و کوچک‌تر کردن شبکه‌بندی و اجرای دوباره مدل y^+ حدود ۲۱۰ به دست آمد. نمایی از این شبکه‌بندی و شرایط مرزی مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. گام‌های زمانی برای حل مساله از ۰/۰۰۰۱ ثانیه در ابتدای حل تا ۰/۰۱ ثانیه در انتهای حل متغیر بود. معیار ماندگار شدن در مدل‌های عددی، برابر شدن تقریبی دبی ورودی به مدل و دبی خروجی از آن است و حداکثر اختلاف دبی ورودی و خروجی ۰/۰۵ درصد برای ماندگار شدن جریان در نظر گرفته شد. با استفاده از روش میان‌بانی خطی، سطح آب در نقطه‌ای در نظر گرفته شد که در آن نقطه حجم سیال برابر ۰/۵ باشد.

شبیه‌سازی آشفتگی جریان و تشکیل امواج غلتان در تنداب‌ها با استفاده از روش حجم محدود انجام گرفت. برای شبیه‌سازی جریان چند فاز از مدل حجم سیال و مدل سازی آشفتگی جریان از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و از طرح پرستو برای گسسته‌سازی معادله‌های فشار و برای تحلیل جریان در نزدیکی دیواره، از مدل تابع دیواره استاندارد و برای کوپل نمودن سرعت-فشار از الگوریتم پیرو استفاده شد. در مدل سازی عددی طول بالادست و پایین دست تنداب به ترتیب ۱۶ متر و هشت متر و طول قسمت شبیدار آن ۳۰/۵۹ متر و ارتفاع دیواره تنداب سه متر است و در کلیه تنداب‌های مدل شده این مقادیر ثابت است. مشخصات هیدرولیکی جریان بر روی تنداب با عرض چهار متر و شیب طولی یک به پنج به ازای دبی‌های ورودی ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ مترمکعب بر ثانیه و برای تنداب با عرض چهار متر و دبی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه به ازای شیب‌های ۱۷ و ۱۸ درصد و در تنداب با دبی ورودی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه و شیب طولی یک به پنج به ازای عرض‌های ۳/۶ و ۳/۴ متر مورد بررسی قرار گرفت. برای



شکل ۲-نمایی از شبکه بندی و شرایط مرزی مورد استفاده برای مدل عددی

جدول ۲- مقایسه تغییرات عمق و فشار استاتیکی برای سرریز سد آزاد

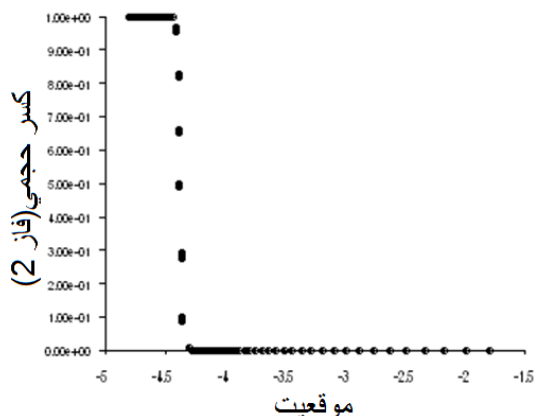
مدل عددی						
دبی ورودی=۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب						
طول سرریز (متر)	ارتفاع معادل فشار (متر) (آزمایشگاهی)	ارتفاع معادل فشار (متر) (عددی)	درصد خطا	عمق جریان	عمق جریان	درصد خطا
				(متر)	(متر) (عددی)	
۰	۲/۱	۲/۱۶	-۲/۸	۴/۹۸	۵/۰۹	-۲/۲
۸/۴۱	۱/۷۲	۱/۷۹	-۴	۳/۲	۳/۲۵	-۱/۵۶
۱۵/۲۸	۵/۶۳	۵/۷۳	-۱/۷	۲/۷۹	۲/۷۸	-۰/۳۵
۳۰/۵۴	۲/۰۱	۲/۱۱	-۴/۹	۲/۵	۲/۴۸	۰/۸
۶۰/۵۴	۱/۵۹	۱/۶۸	-۵/۶	۲/۲۷	۲/۱۲	-۱۵/۲
۷۲/۳	۱/۱۷	۱/۲۶	-۷/۶	۱/۸۴	۲/۰۱	۱۱/۵
۸۲/۵۳	۱/۰۹	۱/۱۷	-۷/۳	۱/۷۹	۱/۷۹	۰
۹۰/۹۳	۰/۷۲	۰/۸۶	-۱۹	۱/۶۹	۱/۷۱	-۱/۱
۱۰۷/۴۷	۱/۱۸	۱/۲۴	-۵	۱/۵۹	۱/۵۹	۰
۱۳۴/۹۴	۰/۷۹	۰/۸۴	-۶/۳	۱/۲۹	۱/۳۱	-۱/۵
۱۵۹/۶۷	۰/۵۳	۰/۶۳	-۱۸/۸	۱/۴۴	۱/۴۲	۱/۳
۱۸۴/۴	۰/۷۴	۰/۷۶	-۲/۷	۱/۴۲	۱/۳۷	۰/۵
۲۰۹/۱۲	۰/۶۷	۰/۶۶	۱/۴	۱/۲۳	۱/۲۳	۰
۲۴۷/۵۹	۰/۳۹	۰/۳۸	۲/۵	۱/۲۵	۱/۲۱	۳/۲
۲۶۴/۰۷	۰/۲۹	۰/۳۲	-۱۰/۳	۱/۲۴	۱/۱۹	۴

نتایج و بحث

۳۶/۴ درصد بین مقادیر مدلسازی عددی و آزمایشگاهی وجود دارد که به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز و جدا شدن خطوط جریان از بستر و ورود هوا به جریان در ناحیه پروفیل محدب است که اندازه گیری دقیق آزمایشگاهی عمق جریان را مشکل می سازد. بررسی کلیه مدل های عددی نشان داد که افزایش عمق هیدرولیکی تمایل به پایداری جریان و تشکیل دیرتر امواج غلتان دارد و افزایش تغییرات سرعت عاملی برای ناپایداری و آشفته گی جریان می باشد.

جدول (۲) مقایسه ای از نتایج مدلسازی عددی شامل تغییرات فشار استاتیکی و عمق هیدرولیکی و سرعت جریان با نتایج مدل آزمایشگاهی، بر روی سرریز و تنداب سد آزاد به ازای دبی ورودی ۸۰۰ مترمکعب را نشان می دهد. سطح آزاد جریان و تغییرات فشار که از مدل سازی عددی و آزمایشگاهی به دست آمده، ترسیم و مشاهده شد که مقادیر مربوط به مدل سازی عددی تطابق بسیار خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارند. تنها گسستگی اندکی در ناحیه اتصال تنداب با شیب پنج درصد به تنداب با شیب

عاقبتی و بازرگان: شبیه‌سازی عددی امواج غلتان در تنداب‌ها



شکل ۳- منحنی تغییرات عمق در نقطه‌ای به طول ۳۰ متر برای تنداب با عرض ۳/۶ متر و شیب طولی ۲۰ درصد و دبی ورودی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه

معیار طول حداقل کانال پرداخته شد. برای تنداب با شیب ۲۰ درصد و عرض ۳/۶ متر و دبی ورودی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه در نقطه‌ای به طول ۱۹/۵ متر از تنداب امواج غلتان تشکیل شده‌اند که معیارهای طول حداقل کانال و عدد فرود، همین نقطه را برای شروع آشفتنگی جریان و پیدایش امواج غلتان پیش‌بینی نمودند ولی معیار عدد موتوری برای این نقطه از تنداب جریان را پایدار و بدون آشفتنگی محاسبه کرد. در کلیه مدل‌های عددی، معیار عدد موتوری محل تشکیل امواج را نتوانست به درستی و مطابق با مدل‌های عددی تعیین نماید ولی معیارهای طول حداقل کانال و عدد فرود دقت لازم را در تعیین محل دقیق تشکیل امواج داشتند و در کلیه موارد محل شکل‌گیری امواج غلتان را به درستی پیش‌بینی نمودند (برای مطالعه بیشتر به مرجع عاقبتی ۱۳۹۲ مراجعه نمایید). کف و دیواره‌های مدل‌های عددی در حالت‌های با زبری متفاوت، شبیه‌سازی گردید اثر ارتفاع زبری مرزهای تنداب بر شکل‌گیری امواج غلتان بررسی شود. در کلیه مدل‌ها، کف و دیواره‌ها به ازای ارتفاع زبری برابر ۰/۱۵ و ۰/۲۰ و ۰/۲۵ میلی‌متر در مقیاس واقعی مدل سازی شدند. برای تنداب با شیب ۲۰ درصد و عرض ۳/۴ متر و دبی ورودی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه با افزایش زبری کف و دیواره‌ها مشاهده گردید که از شدت آشفتنگی جریان کاسته و محل تشکیل امواج غلتان به پایین دست تنداب میل می‌کند. در تنداب با شیب طولی ۲۰ درصد و عرض ۳/۶ متر و دبی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه نیز با افزایش مقادیر زبری کف و دیواره‌ها، جریان در تنداب پایدارتر شده و امواج غلتان دیرتر تشکیل شدند. افزایش مقادیر زبری کف و دیواره‌ها تاثیر به سزایی برای عمق هیدرولیکی در بالادست نداشت تا جایی که می‌شد عمق هیدرولیکی را در بالادست با افزایش ارتفاع زبری ثابت فرض کرد ولی با نزدیک شدن به پایین دست تنداب عمق هیدرولیکی افزایش چشمگیری یافته و افزایش زبری مرزها تاثیرش را نمایان می‌نمود. سرعت متوسط جریان در نقاط متفاوتی از طول تنداب محاسبه گردید و مشاهده شد که با افزایش زبری مرزها، سرعت متوسط سیر نزولی طی می‌کند و برای پایین دست تنداب مقادیر کاهش

در کلیه مدل‌های عددی مشاهده گردید که در لحظه آشفتنگی جریان و شکل‌گیری امواج غلتان، نسبت ارتفاع موج به عمق جریان آب و تغییرات سرعت در آن منطقه از تنداب افزایش یافته و با نزدیک شدن به پایین دست تنداب مقادیر این افزایش چشمگیرتر می‌شود. برای تنداب با شیب طولی ۲۰ درصد و عرض ۳/۶ متر و دبی ورودی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه در نقطه‌ای به طول ۱۹/۵ متر امواج غلتان تشکیل شده‌اند که در این نقطه عمق هیدرولیکی برابر ۰/۷۲۵ متر می‌باشد.

در مدل‌های عددی به ازای دبی‌های ورودی ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ مترمکعب بر ثانیه مشاهده گردید که با افزایش دبی جریان ورودی به تنداب، ارتفاع امواج ایجاد شده کاهش یافته و جریان دیرتر به حالت آشفته و ناپایدار می‌رسد و محل تشکیل امواج غلتان به پایین دست تنداب میل می‌نماید. بررسی سایر مدل‌های شبیه‌سازی نشان داد که با کاهش عرض تنداب یا کاهش شیب طولی، پیرامون مرطوب افزایش یافته و امواج رشد کمتری کرده و امواج غلتان دیرتر تشکیل می‌شوند. برای کلیه مدل‌های عددی به ازای کاهش شیب طولی تنداب و کاهش عرض تنداب و افزایش دبی ورودی، کسر حجمی آب در بازه‌های زمانی متفاوت محاسبه شد و مشاهده گردید که با حرکت موج به سمت پایین دست تنداب، نسبت ارتفاع موج (h) به عمق جریان (y) افزایش چشمگیری یافته و حد نهائی این نسبت برای غلتیدن موج برابر ۰/۵۷ است. در تمامی تنداب‌های مدل شده مشاهده گردید اگر رابطه زیر برقرار باشد تحت هر شرایطی امواج غلتان تشکیل می‌شوند:

$$\frac{h}{y} \geq 0.57 \quad (۶)$$

شکل (۳) نشان‌دهنده کسر حجمی آب (فاز ۲) در نقطه‌ای به طول ۳۰ متر برای تنداب با عرض ۳/۶ متر و شیب طولی ۲۰ درصد و دبی ورودی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. برای مناطقی از تنداب که براساس مدل سازی عددی امواج غلتان تشکیل شده بودند، به ارزیابی صحت معیار عدد موتوری و

در رابطه بالا، h : معرف ارتفاع موج و y : معرف عمق جریان است.

برای پایداری جریان و کاهش احتمال تشکیل امواج غلتان باید نسبت ارتفاع موج به عمق جریان را کاهش داد که مدل‌های شبیه‌سازی شده در این تحقیق نشان دادند که افزایش دبی ورودی یا کاهش عرض تنداب و یا کاهش شیب طولی تنداب روش‌هایی بسیار مطلوب برای این امر می‌باشند. در مدل‌های عددی برای مناطقی از تنداب که امواج غلتان تشکیل شده بود، معیار طول حداقل کانال و عدد فرود در کلیه موارد محل تشکیل امواج غلتان را به درستی توانستند پیش‌بینی نمایند ولی معیار عدد موتوری دقت لازم در تعیین محل دقیق تشکیل امواج را نداشت. برای بررسی اثر ارتفاع زبری کف و دیواره‌های تنداب بر احتمال تشکیل امواج غلتان مشاهده گردید که با افزایش مقادیر زبری کف و دیواره‌ها در کلیه مدل‌ها مناطق تشکیل امواج غلتان به پایین دست تنداب میل می‌نماید و جریان دیرتر به حالت ناپایدار می‌رسد.

سرعت بسیار مشهود بود. در کلیه مدل‌ها با افزایش مقادیر زبری مرزها مشاهده گردید که عمق هیدرولیکی جریان افزایش و سرعت متوسط جریان کاهش یافته و جریان دیرتر ناپایدار شده و مناطقی که امواج غلتان تشکیل می‌شود به پایین دست تنداب میل می‌نماید.

نتیجه‌گیری

نرم‌افزار فلوئنت به همراه مدل حجم سیال و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ و الگوریتم پیرو ابزاری مناسب برای مدل‌سازی جریان در تنداب‌ها و کانال‌های باز می‌باشد. در کلیه مدل‌های عددی مشاهده گردید، برای هر مقطع از تنداب برقراری رابطه زیر شکل‌گیری امواج غلتان را نتیجه می‌دهد:

$$\frac{h}{y} \geq 0.57 \quad (7)$$

منابع

- ۱- عاقبتی، ب. ۱۳۹۱. پیش‌بینی امواج غلتان در کانال‌های باز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه زنجان.
- 2- Armanini, A. and N, Recchia. 2006. Experimental analysis of roll waves in overconcentrated flow. CUDAM and Department of Civil and Environmental Engineering, 149-157.
- 3- Brock, R. 1969. Development of roll-wave trains in open channel. Journal of The Hydraulics Division, 95(HY4): 1401-1427.
- 4- Carlson, A. 2007. Numerical simulations of slug Flow in a micro channel. Division of Nuclear Power Safety, The Royal Institute of Technology. 119 p.
- 5- Chen, Q., Guangling, D. and L, Hava. 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway over flow. Journal of Hydraulic Engineering, 128(7): 683-688.
- 6- Cristo, D. C., Lervolino, M., Vacca, A. and B, Zanuttigh. 2009. Roll-waves prediction in dense granular flows. Journal of Hydrology, 377: 50-58.
- 7- Dressler, R. F. 1949. Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2(3): 149-194.
- 8- Anonymous. 2005. Fluent Users Guide, computational fluid dynamics.
- 9- Hirt, C. W. and B. D. Nichols. 1981. Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, 39(1): 201-225.
- 10- Iwasa, Y. 1954. The criterion for instability of steady uniform flows in open channels. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University, Japan, 16(6): 264-275.
- 11- Jeffreys, H. J. 1925. The flow of water in an inclined channel of rectangular section. Philosophical Magazine, 49(293): 793-807.
- 12- Launder, B.E. and D. B. Spalding. 1974. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3(2): 269-289.

- 13- Montouri, C. 1961. Spontaneous formation of wave trains in steep channels. *L'energia Elettrica*, 38 (2): 127-141.
- 14- Que, Y. T. and K. Xu. 2006. The numerical study of roll-waves in inclined open channels and solitary wave run-up. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 50: 1003–1027