

یادداشت فنی

بررسی عددی الگوی رفتاری جریان روی سرریزهای سه‌جانبی

حامد تقی‌زاده^{۱*} و سید علی‌اکبر صالحی نیشابوری^۲

چکیده

سرریزهای سه‌جانبی از جمله مجراهای تخلیه‌کننده سدها بوده که با وجود محدودیت‌های هیدرولیکی، در شرایط خاص توپوگرافی به‌عنوان بهترین انتخاب مطرح می‌شوند. تلفات زیاد انرژی، تلاطم و آشفتگی جریان و اعمال ضربه‌های نوسانی شدید آب بر کف و دیواره‌های کانال جانبی از جمله شرایط نامناسب هیدرولیکی در این سرریزها هستند. در این نوشتار نرم‌افزار FLOW-3D میدان جریان سه‌بعدی بر روی سرریز و آب‌پایه در انتهای کانال جانبی، به‌صورت عددی و با استفاده از مدل آشفتگی RNG(k-ε) شبیه‌سازی و بررسی شده است. مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این مدل قابلیت پیش‌بینی الگوی سه‌بعدی جریان مزبور را دارد، اما در محل تشکیل گرده‌ماهی در داخل کانال جانبی که ناشی از برخورد سفره‌های جریان عمودی و جانبی است، مقادیر عددی کمتر از مقادیر آزمایشگاهی به دست آمده است. این موضوع را می‌توان به نوسانات و اغتشاشات بیش از اندازه جریان در این ناحیه ارتباط داد. همچنین مقایسه نتایج عددی توزیع فشار در کف کانال جانبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی مقادیر فشار در کف کانال جانبی را کمتر از مقادیر آزمایشگاهی برآورد کرده است.

واژه‌های کلیدی: روش حجم محدود، سرریز سد جره، مدل‌سازی عددی، FLOW-3D.

ارجاع: تقی‌زاده ح. صالحی نیشابوری س. ع. ا. ۱۳۹۳. بررسی عددی الگوی رفتاری جریان روی سرریزهای سه‌جانبی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۱۵-۲۱۱: (۱۴)۸.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی عمران، سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
۲- استاد سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

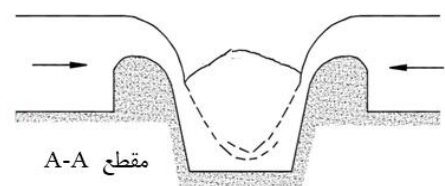
* نویسنده مسئول: hamed.t.nvu@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۱۴

مقدمه

در منطقه‌هایی که محدود کردن ارتفاع سد با طول شدن تاج سرریز همراه بوده و تکیه‌گاه دارای شیب تند و به‌صورت پرتگاه باشد و پی سنگی خوبی نیز موجود باشد، استفاده از سرریزهای سه‌جانبی به‌عنوان یکی از بهترین انتخاب‌ها مطرح است. در صورت تندبودن شیب دیواره‌های تکیه‌گاه، ممکن است ورودی آب به داخل کانال جانبی فقط از یک طرف انجام شود. با وجود این اگر شیب تکیه‌گاه بسیار ملایم باشد و یا کانال جانبی در یک تپه کوچک تعبیه شده باشد، جریان می‌تواند از ابتدای کانال و یا حتی از سمت دیگر نیز وارد کانال جانبی سرریز شود. به نوع خاصی از این سرریزها که جریان از ابتدا و طرفین وارد کانال جانبی می‌شود، سرریز سه‌جانبی (سرریز U شکل) گویند. تا به حال یک روش کامل و دقیق برای طراحی این سرریزها جمعیت پیدا نکرده است. بیشتر سعی شده با ساخت یک مدل فیزیکی- هیدرولیکی و تغییر پارامترهای مؤثر در عملکرد هیدرولیکی این سرریزها، به شرایط بهینه هیدرولیکی مدل دست یافته و نتایج حاصل به نمونه اصلی عمومیت داده شود. اغتشاش و نوسانات فشار در کانال جانبی این سرریزها زیاد است به طوری که نمی‌توان معادله دینامیکی خاصی برای پروفیل سطح آب در آن‌ها ارائه کرد (منتظرکلاته و صالحی نیشابوری، ۱۳۷۴). در شکل ۱ پلان و مقطع عرضی یک سرریز سه‌جانبی نشان داده شده است.



شکل ۱- پلان و پروفیل یک سرریز سه‌جانبی

تاکنون مطالعات زیادی برای درک ارتباط بین پارامترهای مؤثر و چگونگی اثر آن‌ها در جریان بر روی سرریزهای تک‌جانبی انجام شده است. که از جمله آن‌ها می‌توان به کارهای هیندز (۱۹۶۲)، فارنی و مارکوس (۱۹۶۲) و کوچک‌زاده و همکاران (۱۳۸۲) اشاره نمود. اما مطالعات محدودی در مورد عملکرد هیدرولیکی سرریزهای سه‌جانبی انجام شده است و بیشتر کارهای انجام شده به مسأله بهبود و اصلاح عملکرد هیدرولیکی جریان روی این سرریزها پرداخته است. از جمله مطالعات انجام شده در ارتباط با سرریزهای سه‌جانبی می‌توان به مطالعات فارنی (۱۹۶۲)، نایت (۱۹۸۹) و مطالعات مؤسسه تحقیقات آب (۱۳۷۴) اشاره کرد. مطالعات مؤسسه تحقیقات آب بر روی شکل آب‌پایه، ارتفاع و محل نصب آن و تراز کف کانال جانبی در سه مدل هیدرولیکی سرریزهای سد شهید یعقوبی، جره و سیوند بوده است. منتظرکلاته و صالحی نیشابوری (۱۳۷۴) به مطالعه کلاسیک بر روی تعدادی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی این سرریزها پرداختند.

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D میدان جریان سه‌بعدی بر روی سرریز جانبی سد جره و آب‌پایه واقع در انتهای کانال جانبی، به‌صورت عددی و با استفاده از مدل آشفتگی دو معادله‌ای RNG(k-e) مدل‌سازی و بررسی شده است.

حل عددی

رابطه‌های حاکم بر میدان

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم، که برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به‌صورت معادلات ۱ و ۲ بیان می‌شود (فرزیگر، ۱۹۹۶).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + g_{x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

معادلات پروفیل سطح آزاد

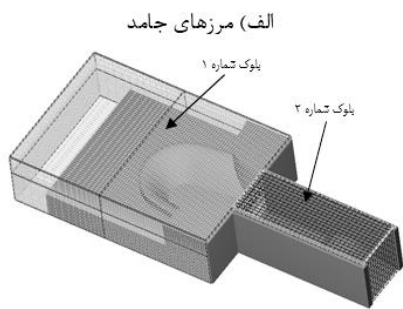
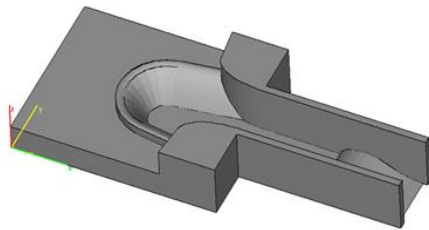
موقعیت سیال در پارامتر تابع حجم سیال (VOF) تعریف می‌شود $F(x,y,z,t)$. این تابع بیانگر حجم سیال بر واحد حجم و به‌صورت معادله ۳ است (فرزیگر، ۱۹۹۶).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) \right] + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] + \xi \frac{FA_x u}{x} = FDIF + FSOR \quad (3)$$

که در آن:

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} + R \frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_y R \frac{\partial F}{\partial y} \right) \right) \right\} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_F A_x F}{x} \right\} \quad (4)$$

سرعت مخصوص استفاده شده است که ویژگی این شرط مرزی این است که می‌توان دبی معینی را از این مرز عبور داد. برای انتهای کانال جانبی، یعنی بعد از آب‌پایه شرط مرزی جریان خروجی اعمال شده است.



ب) شبکه‌بندی مدل عددی

شکل ۲- مرزهای جامد و شبکه‌بندی مدل عددی

جدول ۱- مرزهای جامد و شبکه‌بندی مدل عددی

جدول ۱- مرزهای جامد و شبکه‌بندی مدل عددی		
تعداد بلوک‌های محاسباتی	۲	
تعداد حجم‌های محاسباتی	۱۰۰۰۰۰	
نوع شبکه	مستطیلی	شبکه
بدنه سرریز	Solid	
مرزهای کناری	Symmetry	شرایط
ورودی	Specified Velocity	مرزی
خروجی	Outflow	
مدل آشفتگی	RNG(k-e)	
الگوریتم حل معادلات فشار	GMRES	
الگوریتم حل تنش برشی سیال	صریح	معادلات
مدل سطح آزاد	الگوی حجم سیال	

FSOR برابر با نرخ زمانی تغییرات تابع حجم یک سیال که همراه با منبع جرم برای آن است، می‌باشد. برای یک سیال منفرد، F بیانگر جمع حجم اشغال شده با سیال است، بنابراین جاهایی که $F=1$ است از سیال و جاهایی که $F=0$ است از حباب و حفره اشغال شده‌اند. نواحی حبابی و خالی نواحی هستند که جرم سیال وجود ندارد و یک فشار یکنواختی حاکم است (هرت و نیکولس، ۱۹۸۱).

مشخصات هندسی و هیدرولیکی میدان

برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی مدل هیدرولیکی سرریز سد جره موجود در مؤسسه تحقیقات آب استفاده شده است. طول کل تاج سرریز ۲ متر بوده که وجه بالادست آن قوسی از یک دایره به شعاع ۴۱/۲۴ سانتی‌متر و زاویه مرکزی ۱۶۴ درجه و طول ۱/۱۸ متر است. وجوه جانبی از خط‌های مستقیم که هر یک به طول ۴۱ سانتی‌متر و با زاویه ثابت ۸ درجه به تدریج باز می‌شوند تشکیل شده است. همچنین یک آب‌پایه به شکل یک‌چهارم بیضی در انتهای کانال جانبی قرار دارد. از این‌رو نتایج آزمایشگاهی دبی‌های ۱۱، ۵۵، ۱۱۳ و ۱۷۷ لیتر بر ثانیه استفاده شده است.

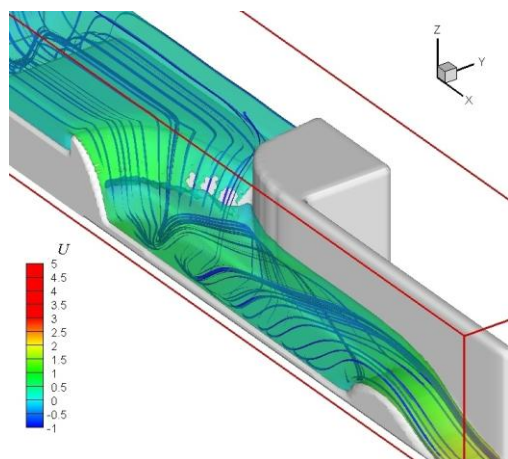
ایجاد هندسه مرزهای جامد و شبکه‌بندی مدل عددی

برای تهیه هندسه مرزهای جامد همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شده است. برای انفصال میدان از دو بلوک محاسباتی استفاده شده است، که در مجموع ۱۰۰۰۰۰ حجم محاسباتی را شامل می‌شود. در جدول ۱ اطلاعات شبکه‌بندی، شرایط مرزی و انفصال معادلات آورده شده است.

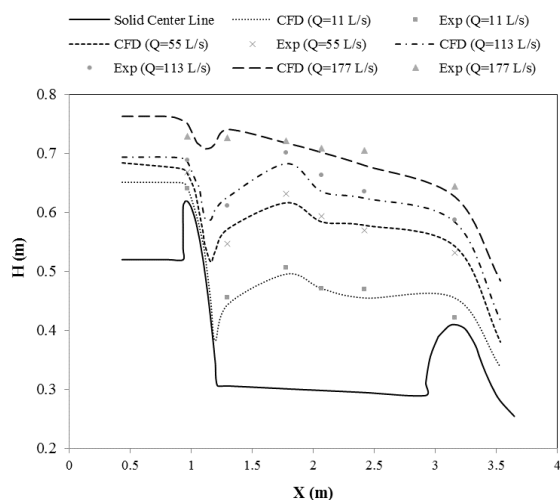
کالیبراسیون مدل عددی

اولین گام در یک مدل عددی، کالیبره کردن مدل است. بدین معنی که تأثیرات عامل‌های خارجی را به حداقل رسانده و شرایط مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر کرد. برای استخراج مقادیر درست داده‌های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن حالت جریان به یک شرایط پایدار ضروری است. در مدل عددی حاضر پس از بررسی چند مدل زمان مناسب برای اجرا ۴۰ ثانیه در نظر گرفته شد. برای شرایط مرزی، در ابتدای آبراهه تقرب شرط مرزی

قادر به شبیه‌سازی حباب‌های هوا ایجاد شده نبوده و با استفاده از تعادل بین نیروهای کشش سطحی آب و نیروی ناشی از آشفتگی و نیز تغییرات چگالی ناشی از ورود هوا، برای تعیین سطح آزاد سیال استفاده می‌کند. ورود هوا به سیال به‌خصوص در جریان‌های متلاطم دیده می‌شود که کشیده شدن دامنه هواگیری سیال در عمق جریان تأثیر مستقیمی بر فشار دارد و مقادیر آن را کاهش می‌دهد. با توجه به نمودارهای توزیع فشار در شکل ۵، ضعف روش VOF در مدل کردن ورود هوا به جریان در توزیع فشار خودنمایی می‌کند و مقادیر فشار هیدرواستاتیک با خطای بیشتری نسبت به عمق جریان، برآورد می‌شود و روش VOF قابلیت اعمال این شرایط را به‌خصوص در عمق سیال ندارد.



شکل ۳- خطوط جریان عبوری از مجاورت تاج سرریز در دبی ۵۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۴- پروفیل سطح آب در محور مرکزی

شبکه‌بندی مدل عددی

حساسیت مدل‌های عددی به شبکه‌بندی و انفصال میدان حل همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی بوده است. در این مدل عددی، ایجاد مرزهای جامد مناسب در شبکه بندی مدل عددی، به‌خصوص در مدل‌هایی با هندسه پیچیده (مانند مدل در دست بررسی)، بزرگ‌ترین محدودیت است و انتخاب مناسب آن می‌تواند دقت محاسبات را زیاد کند. اما با توجه به هندسه پیچیده مدل، استفاده از ۱۰۰ هزار حجم محاسباتی و دو بلوک شبکه بندی امری لازم به نظر رسیده است.

نتایج و بحث

الگوی جریان

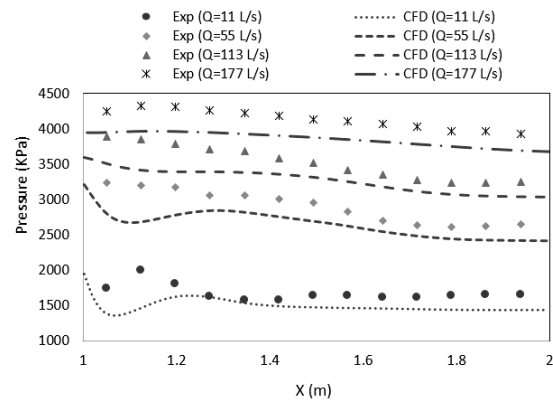
در محدوده مرکزی کانال جانبی سرریز، یک برآمدگی در سطح جریان (گرده ماهی) تشکیل می‌شود که عامل اصلی آن برخورد جریان‌های ورودی در این محدوده است. مومنتم جریان‌های ورودی در جهت عمود بر جریان محوری (در محدوده محور مرکزی کانال جانبی) به دلیل برخورد با یکدیگر، به فشار تبدیل شده و به‌صورت افزایش عمق جریان خودنمایی می‌کند. در شکل ۳ می‌توان نحوه شکل‌گیری جریان در روی سرریز با خطوط جریان را مشاهده کرد.

با توجه به مقادیر پروفیل جریان در شکل ۴، بیشترین خطا در محاسبات از نظر مکانی در ناحیه تشکیل گرده ماهی مشاهده شده است. با مشاهده نوسانات فشار در این ناحیه مشخص می‌شود که این ناحیه دارای آشفتگی شدید جریان بوده و ناحیه پرتلاطمی است و میزان خطای وارده را می‌توان به همین خاطر دانست. به لحاظ عدد فرود ورودی بیش‌ترین خطا در دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه رخ داده است، به این دلیل که در دبی‌های پایین عمق جریان در کانال جانبی کم است و اغتشاش و نوسانات باعث خطا به نسبت قابل‌زیادی می‌شود.

توزیع فشار در محور مرکزی کانال جانبی

نتایج نشان دهنده این مطلب است که روش VOF، در عمل به‌صورت تک‌فازه عمل می‌کند و از حالت دوفازی فقط برای محاسبه سطح آزاد سیال استفاده می‌کند. روش VOF هوا را فقط به سطح‌های سیال وارد می‌کند و در رساندن هوا به عمق سیال (آنچه اتفاق می‌افتد) دچار مشکل می‌شود. دلیل این مسأله این است که روش VOF

5. Hinds J. 1962. Side channel spillway. Transactions of the American Society of Civil Engineering. 89(4):881-927.
6. Hirt C. and Nichols B. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics. (39):201-225.
7. Knight A. 1989. Design of efficient side channel spillway. Journal of Hydraulic Engineering. 115(9):1275-1289.



شکل ۵- توزیع فشار در محور مرکزی کانال جانبی

نتیجه گیری

الگوی سه بعدی جریان بر روی سرریز سه جانبی با استفاده از مدل آشفتگی RNG(k-e) استاندارد بررسی شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که این مدل در تعیین پروفیل سطح آب در طول کانال جانبی دارای دقت مناسبی است. بیشترین خطاها در مدل عددی از نظر مکانی در ناحیه تشکیل گرده ماهی دیده شده است. با مشاهده نوسانات فشار در این ناحیه مشخص می‌شود که این ناحیه دارای آشفتگی شدید جریان بوده و ناحیه پرتلاطمی است و میزان خطای وارده را می‌توان به همین خاطر دانست. به لحاظ عدد فرود ورودی بیشترین خطا در دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه رخ داده است. با توجه به اینکه نتایج مدل عددی دارای دقت مناسبی است استفاده از این مدل‌ها به خصوص بر روی این چنین سازه‌هایی که دارای محدودیت‌های از نظر ساخت و مدل سازی هیدرولیکی هستند، پیشنهاد می‌شود.

منابع

۱. منتظرکلاته ش. و صالحی نیشابوری س. ع. ا. ۱۳۷۴. بررسی تعدادی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای سه جانبی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۴۰ ص.
۲. مؤسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو. ۱۳۷۴. گزارش نهایی مدل هیدرولیکی سرریز سد جره. نشریه شماره ۲۶۸. ۲۰۰ ص.
3. Farney I. H. S. and Markus. A. 1962. Side channel spillway design. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 88(3):131-154.
4. Ferziger J. and Peric. M. 1996. Computational methods for fluid dynamics. Springer Verlag.

