Archive of SID

4th. International Congress on Civil Engineering , Architecture and Urban Development
27-29 December 2016, Shahid Beheshti University , Tehran , Iran

ارزیابی نرم‌افزار Flow-3D در شبیه‌سازی جریان سرریز تنداب همگرا با مدل‌های مختلف آشفتگی

سیده مریم احمدی موسوی[1*]، جلال عطاری[2]، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران،

M_mousavi_hyd93@yahoo.com

۲و۳- استادیار دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده

سرریزهای تنداب که یکی از انواع پرکاربرد سرریزها هستند، امکان تخلیه سیلاب را از مخزن سد به رودخانه پایین‌دست آن فراهم می‌نمایند. پلان کانال تنداب می‌تواند به علت توپوگرافی منطقه، شرایط لایه‌های زیر زمین و ملاحظات اقتصادی، بصورت همگرا طراحی شود. هرچند تحقیقات آزمایشگاهی در این باره انجام شده است ولیکن بررسی‌های عددی در این زمینه کمتر وجود دارد، همچنین با توجه به پیچیدگی جریان در این نوع سرریز، استفاده از مدل عددی مناسب برای انجام محاسبات امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این تحقیق جریان سرریز تنداب همگرا توسط نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی شد. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل‌های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی مربوط به مدل تنداب همگرای منحرف کننده سیلاب Yuanshantzu مقایسه و مدل آشفتگی RNG در مقایسه با سایر مدل‌ها، دقیق‌ترین مدل معرفی شد. همچنین این مقایسه نشان می‌دهد که این مدل قابلیت شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان در این نوع سرریز را دارد.

واژه‌های کلیدی: تنداب همگرا، شبیه‌سازی عددی، مدل‌های آشفتگی، Flow-3D

۱- مقدمه

سرریزهای تنداب که یکی از انواع پرکاربرد سرریزها هستند، امکان تخلیه سیلاب را از مخزن سد به رودخانه پایین‌دست آن فراهم می‌آورند [۱]. پلان کانال تنداب می‌تواند به علت توپوگرافی منطقه، شرایط لایه‌های زیر زمین و ملاحظات اقتصادی، بصورت همگرا طراحی شود. وجود عارضه‌هایی مانند همگرایی، واگرایی، تغییر در ارتفاع کف، خم‌ها و ... در مسیر کانال‌های دارای جریان با سرعت بالا باعث تغییر ناگهانی در عمق و سرعت جریان شده و تشکیل امواج عرضی را به دنبال خواهد داشت. در مطالعه جریان‌های فوق‌بحرانی، تشکیل امواج عرضی از اهمیت بالایی برخوردار است. در اثر بروز این امواج یک جریان متلاطم تشکیل می‌شود که در مسافت قابل‌توجهی در پایین‌دست تاثیر می‌گذارد [۲]. بررسی این موضوع درجریان‌های فوق‌بحرانی درمجاری روباز و تحت فشار، مورد توجه محققین بوده است.

مطالعه مدل‌های هیدرولیکی برای طراحی تنداب همگرا توسط UACE[1] در سال ۱۹۹۰ انجام شده است. Bhallamudi وChaudhry در سال ۱۹۹۲ به منظور تحلیل جریان در تبدیل‌های همگرا و واگرا، معادلات دو بعدی متوسط گرفته شده جریان غیردائمی در آب‌های کم عمق را با استفاده از روش عددی مک کورمک گسسته و حل نمود. آن‌ها در مدل خود، قادر به به شبیه‌سازی دقیق پروفیل سطح آب نبودند. Vide و همکاران در سال ۱۹۹۵ یک تحقیق بر روی تنداب همگرا انجام دادند.

[1] United States Army Corps of Engineers

www.SID.ir

Archive of SID

تحقیق روی مدل‌های خاص برای بررسی مشخصات سرریز تنداب همگرای پلکانی توسط افراد مختلفی مانند: Hanna & Pungh در سال ۱۹۹۷ ، Robinson و همکاران در سال ۱۹۹۸، Hunt & Kadavy در سال ۲۰۰۶، Hunt و همکاران در سال ۲۰۰۶ و Hunt در سال ۲۰۰۸ انجام شده است [۳]. مطالعات زیادی در ارتباط با همگرایی انجام شده که تعدادی از این مطالعات در جدول ۱ خلاصه شده است:

جدول ۱: خلاصه‌ای از پیشینه‌ی تحقیقاتی مرتبط با همگرایی در کانال‌های روباز

نام محقق	سال	موضوع
Schwartz & Hager	۱۹۹۲	بررسی الگوی موج ضربه‌ای در امتداد دیواره جانبی همگرا [۴]
Hanna & Pugh	۱۹۹۷	بررسی آزمایشگاهی مدل سرریز تنداب پلکانی همگرای سد Pilar [۵]
Reinauer & Hager	۱۹۹۸	بررسی جریان فوق بحرانی در تنداب همگرا [۶]
صباغ یزدی و امین‌نژاد	۱۳۸۴	محاسبه متغیرهای جریان فوق بحرانی در تنداب‌های با دیواره‌های همگرا با استفاده از شار انتقالی جهت‌مند در مرزهای احجام محدود بی‌ساختار [۷]
Woolbright	۲۰۰۸	بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریز پلکانی RCC با دیواره جانبی همگرا [۳]
Jan & Chang	۲۰۰۹	بررسی پرش هیدرولیکی در تنداب همگرا [۸]
Jan et al.	۲۰۰۹	بررسی آزمایشگاهی موج عرضی در همگرایی [۹]
Hunt et al.	۲۰۱۲	بررسی تنداب پلکانی همگرا [۱۰]
نیک پور و همکاران	۱۳۹۳	تاثیر هندسه تبدیل همگرا بر پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه‌ای با استفاده از مدل آزمایشگاهی [۱۱]

برنامه‌نویسان رایانه با توجه به قابلیت‌های رایانه‌های امروزی، نرم‌افزارهایی را ایجاد نمودند که می‌توانند با شبیه‌سازی شرایط واقعی یک سرریز و معرفی شرایط اولیه جریان، پارامترهای هیدرولیکی را در شرایط مختلف و با استفاده از مدل‌های آشفتگی محاسبه نمایند. مدل‌های آشفتگی k-ε، RNG و LES[1] از جمله پرکاربردترین مدل‌های آشفتگی هستند که در محاسبه هیدرولیک جریان استفاده می‌شوند. نرم‌افزارهای فراوانی وجود دارند که با استفاده از مدل‌های یاد شده اقدام به شبیه-سازی مدل‌های هیدرولیکی می‌نمایند. یکی از قوی‌ترین و کاربردی‌ترین این نرم‌افزارها، Flow-3D می‌باشد. این نرم افزار توانایی دارد تا با شبیه‌سازی سه بعدی مدل‌های هیدرولیکی، پارامترهای مهم از جمله عمق سیال در مقطعی دلخواه از طول مسیر جریان، سرعت، فشار، عدد فرود و ... را محاسبه نماید [۱۲].

اغلب تحقیقات پیشین درمورد همگرایی کانال‌های باز به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. در تحقیقات انجام شده بررسی عددی جریان سرریز تنداب همگرا، کمتر مورد توجه بوده است لذا با توجه به دشواری تغییر پارامترها در مدل‌های آزمایشگاهی به طور وسیع در تحقیق حاضر به شبیه‌سازی عددی جریان در سرریز تنداب همگرا و ارزیابی عملکرد نرم‌افزار Flow-3D در مدل‌سازی سه بعدی این جریان با در نظر گرفتن مدل‌های آشفتگی مختلف ذکر شده، پرداخته شده است.

۲- توصیف نرم‌افزار عددی و معادلات حاکم

Flow-3D یک نرم‌افزار قوی و رایج در دنیا در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که برای حل مسائل پیچیده مرتبط با سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرم‌افزار Flow-3D توانایی حل سه بعدی پدیده‌های هیدرولیکی را داراست. این نرم‌افزار توانایی نمایش تغییرات لحظه‌ای پارامترهای هیدرولیکی مختلف مانند فشار و سرعت در جهات مختلف و در هر مقطع دلخواه از سازه را به صورت فایل متنی یا گرافیکی داراست. نمایش سه بعدی تغییرات پارامترهای هیدرولیکی مختلف در هر لحظه از جمله توانایی‌های دیگر نرم‌افزار Flow-3D می‌باشد [۱۳].

[1] Large Eddy Simulation Model

www.SID.ir

Archive of SID

نرم‌افزار Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی یکنواخت تقسیم‌بندی می‌شود که برای هر سلول، مقادیر میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد؛ یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. به لحاظ استفاده از روش احجام محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات گسسته شده مورد استفاده، همانند معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود می‌باشند. بر این اساس، نرم‌افزار از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. این نرم‌افزار از دو روش عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده می‌کند: ۱- روش حجم سیال (VOF[1]) که این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و ۲- روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR[2]) که این روش برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب کاربرد دارد. در سیستم مختصات کارتزین، معادلات حاکم عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتوم که در ادامه ارائه شده‌اند [۱۳].

معادله پیوستگی جرم که به طور کلی مطابق فرمول زیر است:

$$V_F \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\, u\, A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\, v\, A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\, w\, A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \qquad (۱)$$

که V_F نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ جرم مخصوص سیال، R_{DIF} ترم نفوذپذیری آشفتگی و R_{SOR} برای منبع جرم است. u، v و w اجزای سرعت و A_x، A_y و A_z برابر مساحت کسری محیط به جریان به ترتیب در جهت‌های x, y, z هستند.

معادله مومنتوم به شرح زیر است:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left(U_i\, A_i\, \frac{\partial U_i}{\partial x_i}\right) = \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \qquad (۲)$$

در معادلات فوق P فشار، g_i نیروی گرانش در راستای i و f_i تنش رینولدز است.

اکثر جریانهای موجود در طبیعت به صورت آشفته می باشند. در جریان‌های آشفته یک حالت تصادفی از حرکت در جایی که سرعت و فشار بطور پیوسته درون بخش‌هایی از جریان نسبت به زمان تغییر می‌کنند، گسترش می‌یابد. مدل‌های آشفتگی، لزجت گردابه‌ای و یا تنش رینولدز را تعیین می‌کنند [۱۴].

بسیاری از مدل‌های آشفتگی بر پایه فرضیه بوزینسک استوار هستند. با افزایش نرخ میانگین تغییر شکل‌ها، آشفتگی افزایش می یابد. فرضیه بوزینسک بیان می‌کند که می‌توان تنش‌های رینولدز را به نرخ میانگین تغییر شکل‌ها ارتباط داد [۱۵]:

تنش‌های ویسکوزیته:

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] \qquad (۳)$$

ارتباط تنش‌های رینولدز با نرخ میانگین تغییرشکل‌ها:

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] \qquad (۴)$$

مدل‌های آشفتگی با توجه به فرضیات گفته شده و تعداد معادلات دیفرانسیل جهت ارتباط تنش‌های آشفتگی با سرعت-های متوسط‌گیری شده یا گرادیان آن‌ها به این صورت تقسیم‌بندی می‌شوند: مدل‌های صفر معادله‌ای، مدل‌های تک معادله‌ای، مدل‌های دو معادله‌ای، مدل‌های دارای معادله تنش و مدل‌های شبیه ساز گردابه‌های بزرگ. مدل‌های دو معادله‌ای ساده‌ترین مدل‌ها هستند که قادرند نتایج بهتری در جریان‌هایی که مدل طول اختلاط نمی‌تواند به صورت تجربی در یک روش ساده مورد

[1] Volume Of Fluid
[2] Fractional Area/Volume Obstacle Representation

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده قرار بگیرد، ارائه دهند. این مدل‌ها دو معادله دیفرانسیل را حل می‌کنند، معادله انرژی جنبشی (k)، و معادله نرخ میرایی انرژی جنبشی (ε). k بیان‌کننده مقیاس سرعت است، بدین صورت که اگر قرار باشد سرعت‌های نوسانی مورد بررسی قرار گیرند، می‌توان جذر انرژی جنبشی حاصل از آشفتگی در واحد جرم را بعنوان مقیاس در نظر گرفت، معادله نرخ میرایی انرژی جنبشی (ε) نیز مقیاس طول است. در حقیقت مقیاس طول، اندازه گردابه‌های بزرگ دارای انرژی جنبشی را می‌دهد که باعث انتقال آشفتگی در توده سیال می‌شود [۱۵].

Flow-3D قابلیت اعمال مدل‌های آشفتگی مختلفی شامل طول اختلاط پرانتل، یک معادله‌ای، دو معادله‌ای k-ε، مدل آشفتگی RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را دارد. در بین مدل‌های آشفتگی، مدل RNG که بر اساس یک روش آماری به دست می‌آید نسبت به حالت استاندارد در جریان‌های چرخشی و دارای هندسه پیچیده، کارایی بیشتری دارد. به همین دلیل از این مدل در مدل‌سازی جریان در میدان‌های دارای انحنا و یا پیچیدگی هندسی بیشتر استفاده می‌شود. به طور کلی مدل RNG کاربرد وسیع‌تری نسبت به مدل k-ε استاندارد دارد. با توجه به مطالب گفته شده و نمودارهای ارائه شده در قسمت ارائه و تحلیل نتایج، در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل RNG استفاده شده است.

۳- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مطالعه موردی

۳-۱- داده‌های آزمایشگاهی

با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر بررسی جریان در تنداب همگرا است، بنابراین برای بررسی صحت حل عددی نیاز به نتایج آزمایشگاهی جریان در تبدیل همگرای سرریز تنداب می‌باشد.

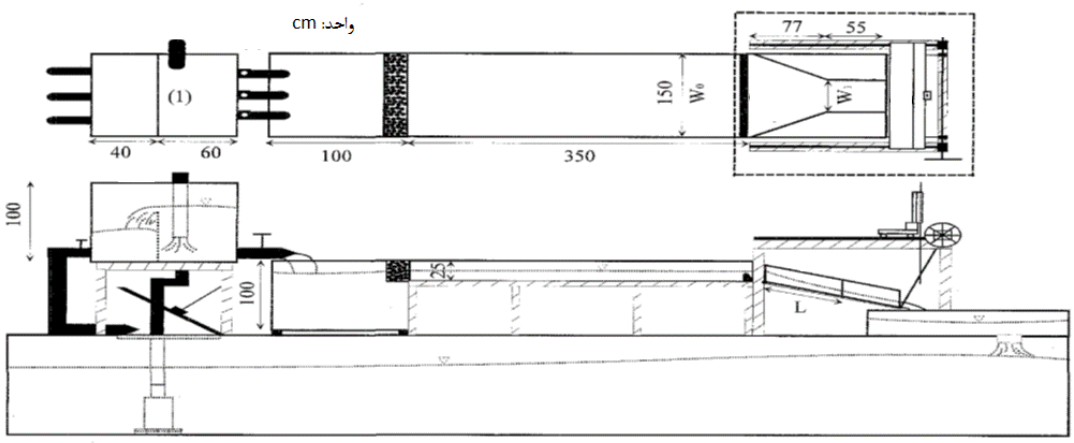
۳-۱-۱- منحرف کننده سیلاب Yuanshantzu

مدل‌سازی فیزیکی تنداب همگرای منحرف کننده سیلاب Yuanshantzu[1]، توسط Jan et al. در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ملی Cheng Kung انجام گرفته است. بر روی مدل فیزیکی، به ازای دبی‌های مختلف آزمایش انجام شده و L_s (فاصله ابتدای سرریز تا محل برخورد دو جبهه موج عرضی) و عمق جریان در مقاطع مختلف، اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق از نتایج ۵ آزمایش آن که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده، استفاده می‌شود. شکل ۱ جزئیات مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

[1] Flood Diversion

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: جزئیات مدل آزمایشگاهی Jan et al. [۹]

جدول ۲: نتایج آزمایشگاهی Jan et al. [۹]

نام اجرا	$Q\ (m^3/s)$	$h_0\ (cm)$	$W_1\ (cm)$	φ	θ	Fr_0	$L_s\ (cm)$
E-1A	۰/۰۰۶	۰/۵۱	۲۰	۴۰/۱۷°	۱۱/۰۲°	۳/۵۱	۸۲/۶
E-1C	۰/۰۰۷۱	۰/۶۸	۲۰	۴۰/۱۷°	۲۰/۵۷°	۲/۷۰	۸۴/۹۰
E-1D	۰/۰۰۸۸	۰/۸	۲۰	۴۰/۱۷°	۲۵/۳۸°	۲/۶۲	۸۵/۱۰
E-2A	۰/۰۰۹۹	۰/۹۲	۳۰	۳۷/۹۳°	۱۱/۰۲°	۲/۳۹	۸۵/۳۰
E-3A	۰/۰۲۳۷	۲/۶۱	۵۰	۳۲/۹۹°	۶/۲۲°	۱/۲۰	۸۱/۱۰

در جدول فوق φ زاویه همگرایی، θ زاویه کف کانال، Fr_0 عدد فرود جریان ورودی و h_0 ارتفاع آب در مقطع ورودی است.

۳-۱-۲- سرریز سد گاوشان

سد گاوشان در ۲۰ کیلومتری شهرستان کامیاران (۷۵ کیلومتری کرمانشاه) بر روی رودخانه گاوه‌رود احداث شده است. موسسه تحقیقات آب (۱۳۸۱) ، مدل فیزیکی سرریز سد گاوشان را با هدف مشاهده، بهینه‌سازی و حصول اطمینان از عملکرد سیستم تخلیه سیلاب زمان بهره‌برداری با مقیاس ۱:۴۰ ساخت. اجزای این مدل شامل مخزن بالادست، محدوده پایین‌دست و سیستم تخلیه سیلاب می‌باشد. در سیستم تخلیه سیلاب کانال تقرب، تنداب، و سازه پرتاب کننده جریان از جنس شفاف پلکسی گلاس اجرا شد. این مدل دارای یک سرریز تنداب همگرا با زاویه همگرایی ۲/۰۷° می‌باشد. شکل ۲ نمائی از تنداب این مدل را نشان می‌دهد.

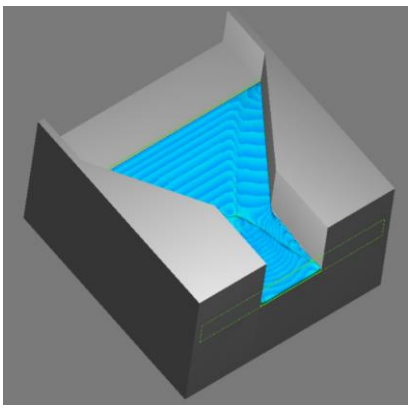
شکل ۲- نمایی از تنداب مدل فیزیکی سد گاوشان [۱۶]

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۲- شبیه‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی جریان عبوری از این سرریز از نرم‌افزار Flow-3D استفاده شده است. در این تحقیق برای ساخت هندسه مدل برای بررسی هیدرولیکی در نرم‌افزار Flow-3D ، بدنه سرریز و دیواره‌های جانبی به صورت سه‌بعدی مطابق شکل ۳ در نرم‌افزار Auto CAD ساخته شد و سپس با فرمت .Stl* به نرم‌افزار Flow-3D معرفی شد. جریان به‌صورت یک سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار Flow-3D تحت شرایطی که شامل این تحقیق نیز می‌شود، VOF به‌صورت خودکار لحاظ می‌شود.



شکل ۳: هندسه سرریز در Flow-3D

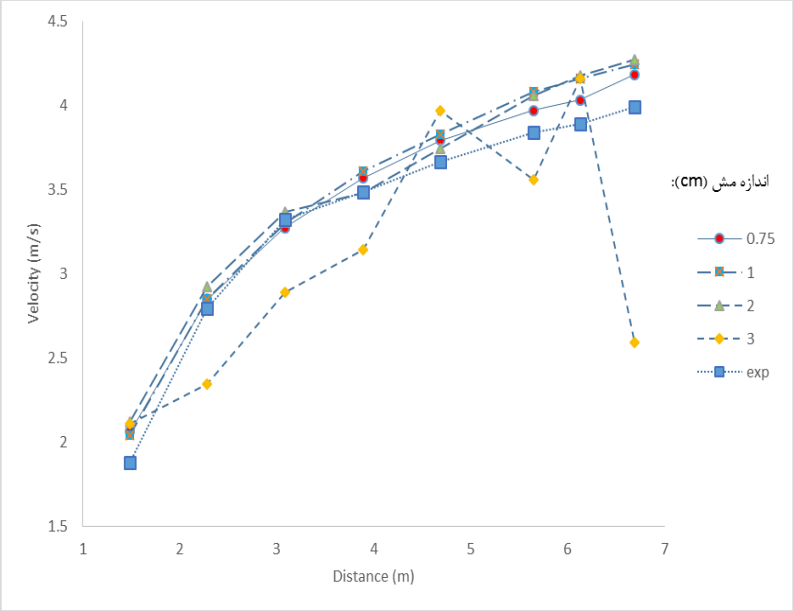
در گزارش آزمایش مدل سرریز سد گاوشان، مقادیر سرعت در هشت ایستگاه اندازه‌گیری شده است. در سال ۲۰۰۹ و درمقاله .Jan et al مقادیر عمق جریان در چهار مقطع و محل برخورد دو جبهه موج (Ls) بصورت آزمایشگاهی آورده شده است. در این تحقیق برای بررسی استقلال نتایج عددی از شبکه محاسباتی از نتایج آزمایشگاهی مدل سرریز سد گاوشان و برای صحت‌سنجی نتایج عددی از مقادیر آزمایشگاهی موجود در مقاله .Jan et al استفاده شده است.

۳-۲-۱- بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

حساسیت مدل‌های عددی به شبکه‌بندی و شرایط مرزی، از مسائل مهم در مدل‌سازی‌های عددی هستند. نرم‌افزار Flow-3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه‌بندی، برخوردی نسبتا متفاوت را نسبت به سایر نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی دارد. از این رو برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه اندازه‌های میدان جریان مورد نظر در داخل آن تعریف می‌گردد. در این تحقیق برای سنجش حساسیت مدل عددی نسبت به شبکه‌بندی از نتایج سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایش سرریز تنداب همگرای سد گاوشان استفاده شده است. برای مدل‌سازی از دو بلوک برای کانال تقرب و سرریز استفاده می‌شود که بعد از حساسیت‌سنجی‌ها نسبت به اندازه شبکه‌بندی، شبکه یکنواخت با ابعاد مش ۰/۰۰۷۵ متر انتخاب شد. .در مطالعه حاضر برای شبکه‌بندی دامنه مدل، از چهار نوع شبکه مختلف به این صورت استفاده شده است که ابتدا با شبکه‌بندی درشت (شبکه یکنواخت با ابعاد مش ۰/۰۳ متری) ، مدل را اجرا کرده و در ادامه با ریزتر کردن ابعاد شبکه، مدل‌سازی صورت پذیرفت. شکل ۴ نشان دهنده مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. در نهایت با مقایسه مقادیر سرعت جریان با نتایج آزمایشگاهی، ملاحظه می‌شودکه شبکه‌بندی یکنواخت با ابعاد مش ۰/۰۰۷۵ متر تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. به همین دلیل از نتایج این اجرا برای بخش‌های بعدی استفاده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴: منحنی تغییرات سرعت برای اندازه‌های مختلف مش

۳-۲-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی استفاده شده برای مدل عددی سرریز به شرح زیر است:

در ورودی میدان از شرط مرزی سرعت استفاده شده است. با توجه به اینکه طول کانال تقرب قبل از ورودی سرریز به اندازه کافی زیاد می‌باشد، لذا پروفیل سرعت در ورودی حالت توسعه یافته خواهد داشت. در انتهای سرریز شرط خروجی Out Flow و شرط مررزی وجه بالای میدان، فشار صفر در نظر گرفته شد. شرط مرزی دیوار به مرزهای صلب شامل دیواره‌های جانبی و کف اعمال شده است.

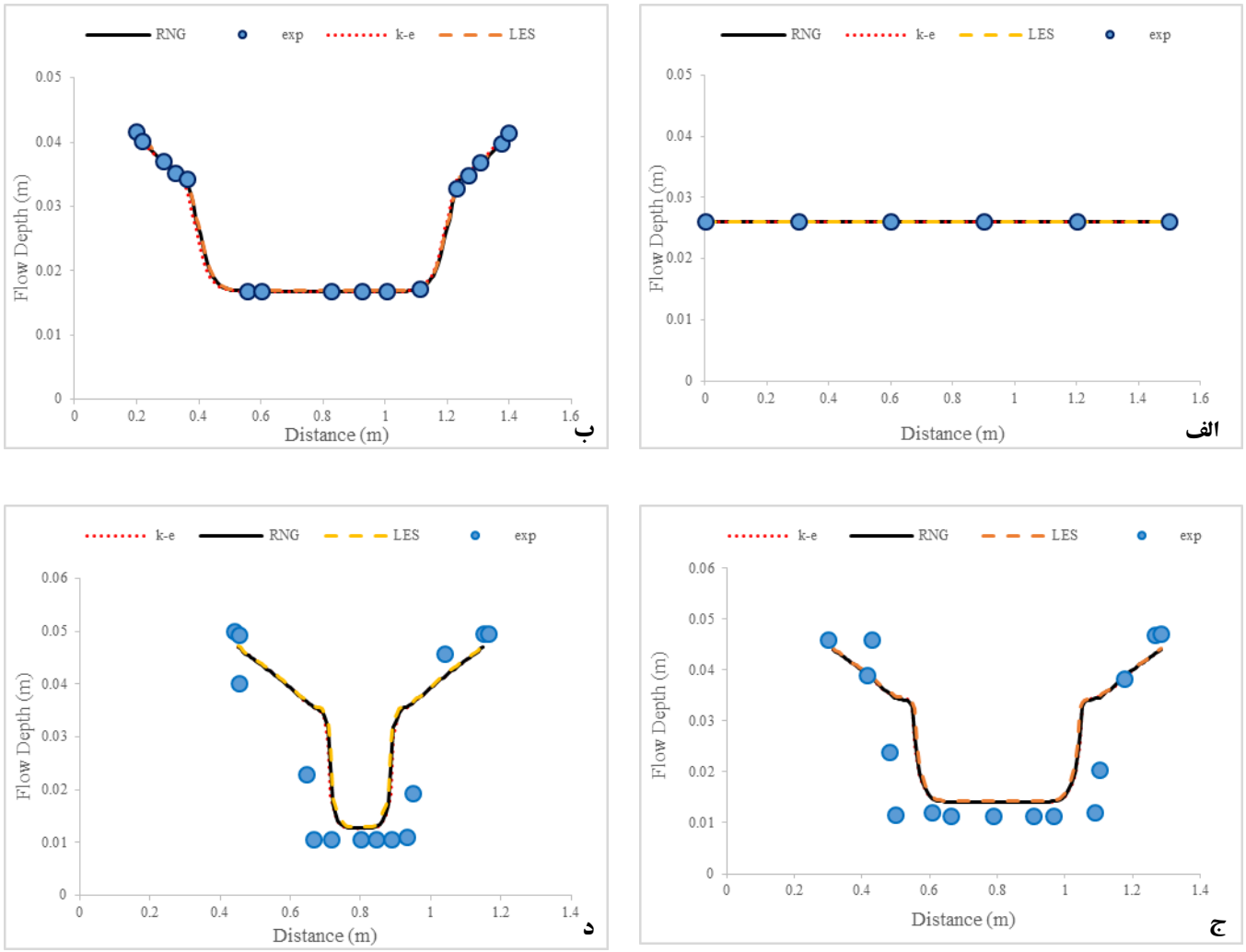
۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

۴-۱- عمق جریان

در شکل ۵ و ۶ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی عمق جریان در چهار مقطع عرضی از جریان برای دو اجرای E-3A و E-1D نمایش داده شده است. مقادیر عددی عمق جریان به ازای شبیه‌سازی با سه مدل آشفتگی k-ε و RNG و LES رسم شده اند.

www.SID.ir

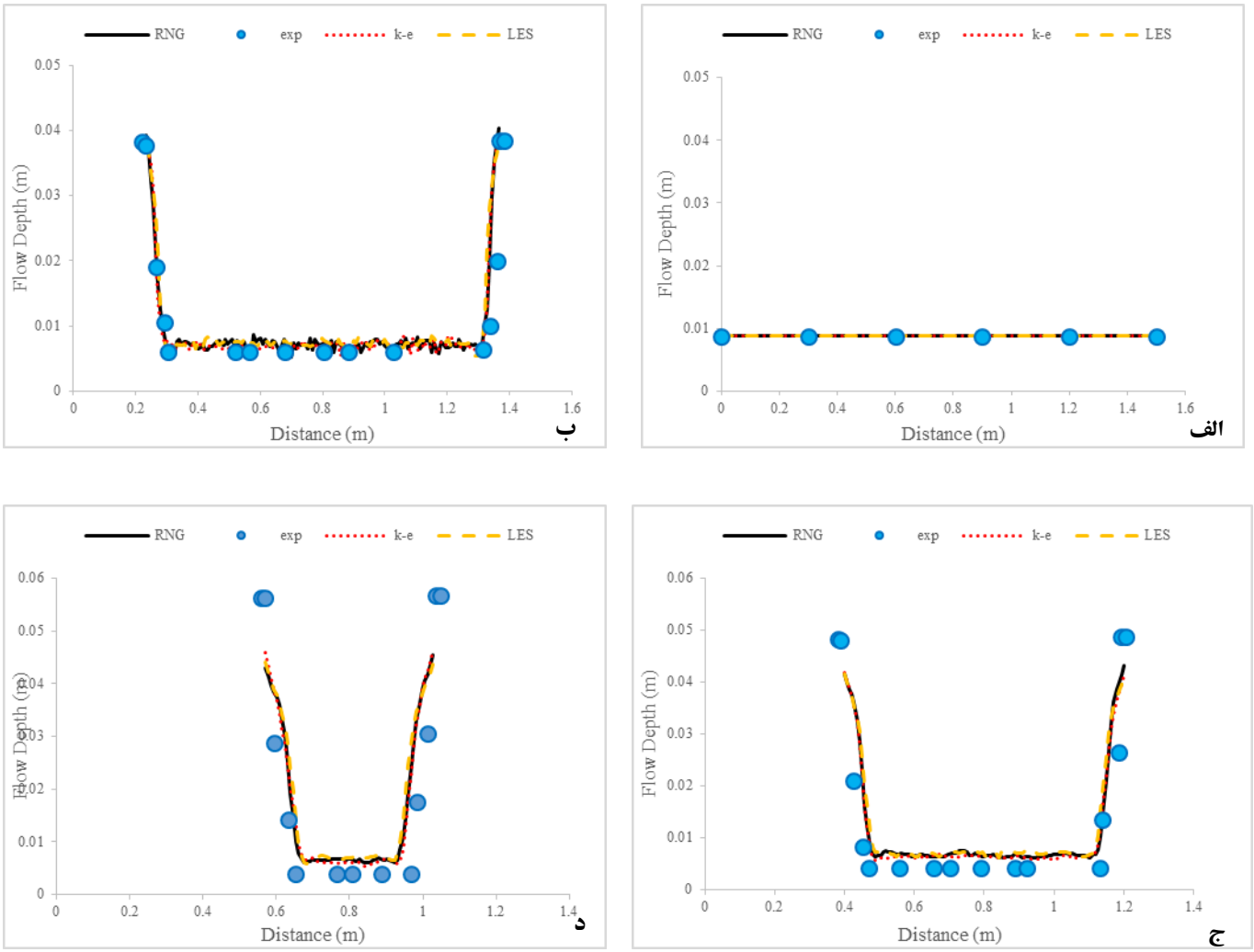
Archive of SID



شکل ۵: پروفیل عمق جریان برای اجرا E-3A: الف- در شروع سرریز، ب- در فاصله ۲/. متری از شروع سرریز، ج- در فاصله ۴/. متری از شروع سرریز، د- در فاصله ۶/. متری از شروع سرریز

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶: پروفیل عمق جریان برای اجرا E-1D: الف- در شروع سرریز، ب- در فاصله ۲/. متری از شروع سرریز، ج- در فاصله ۴/. متری از شروع سرریز، د- در فاصله ۶/. متری از شروع سرریز

همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی جریان با مدل‌های آشفتگی مختلف مقادیری نزدیک به هم دارند و عملکرد مدل‌های آشفتگی k-ε و RNG و LES در محاسبه عمق جریان در سرریز تنداب همگرا دقیق می‌باشد. با این وجود در این نوع سرریز، شبیه‌سازی با مدل آشفتگی RNG نسبت به دو مدل آشفتگی دیگر، دقیق‌تر می‌باشد. با توجه به نمودارهای ارائه شده، تطابق نتایج عددی و آزمایشگاهی در فاصله‌های نزدیک به شروع سرریز، بسیار زیاد و با فاصله گرفتن از آن کاهش می‌یابد و در وسط مقطع عرضی جریان، مقادیر عددی عمق جریان بیشتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به مقایسه نمودارهای شکل ۵ و ۶، در سرعت‌های بالاتر جریان در سرریز تنداب همگرا، شبیه-سازی عددی تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

جدول ۳ زمان اجرای نرم‌افزار را برای دو اجرای مختلف نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳: مقایسه زمان اجرای نرم‌افزار

نام اجرا / مدل آشفتگی	زمان اجرای نرم‌افزار (min)	
	E-3A	E-1D
RNG	۶۸	۱۲۹
k-ε	۷۲	۱۳۸
LES	۷۷	۱۵۸

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۳ نتایج عددی مدل‌سازی با مدل آشفتگی RNG نسبت به دو مدل دیگر کمی دقیق‌تر و از لحظ زمان محاسبات به صرفه‌تر می‌باشد.

۴-۲- محل برخورد دو جبهه موج

همگرایی دیواره‌های جانبی در سرریز تنداب با جریان فوق‌بحرانی باعث تغییر ناگهانی در عمق و سرعت جریان شده و تشکیل امواج عرضی را به دنبال دارد. امواج عرضی از ابتدای همگرایی ایجاد و در کانال منتشر می‌شوند. در پایین‌دست جریان، دو جبهه موج در فاصله L_s از شروع سرریز با هم برخورد می‌کنند. جدول ۴ مقادیر L_s و میزان تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی در دبی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقایسه مقادیر L_s

نام اجرا	$Q\ (m^3/s)$	$L_s\ (cm)$		اختلاف (٪)
		آزمایشگاهی	عددی	
E-1A	۰/۰۰۶	۸۲/۶	۷۹/۷۲	۳/۴۸
E-1C	۰/۰۰۷۱	۸۴/۹۰	۸۶/۷۱	۲/۱۴
E-1D	۰/۰۰۸۸	۸۵/۱۰	۸۹/۳۴	۴/۹۹
E-2A	۰/۰۰۹۹	۸۵/۳۰	۸۲/۶۶	۳/۰۹
E-3A	۰/۰۲۳۷	۸۱/۱۰	۸۵/۳۰	۵/۱۸

همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، تطابق مطلوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج عددی قابل استناد هستند.

۵-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل نرم‌افزاری Flow-3D به شبیه‌سازی عددی سرریز تنداب همگرا پرداخته شد. برای این منظور از سه مدل آشفتگی k-ε و RNG و LES با چهار نوع شبکه‌بندی مختلف استفاده شد و برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی از نتایج تحقیق آزمایشگاهی Jan et al. استفاده گردید.

به طور کلی می‌توان نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های مختلف اجرا شده را به صورت زیر بیان کرد:

- انتخاب یک شبکه‌بندی مناسب در شبیه‌سازی‌های عددی امری بسیار مهم است. زیرا می‌توان با انتخاب دقیق یک ابعاد شبکه-بندی، علاوه بر حفظ دقت نتایج مدل، به طور چشمگیری در زمان شبیه‌سازی صرفه‌جویی کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

- مدل‌های آشفتگی k-ε و RNG و LES قادرند با دقت بالایی، میدان جریان سرریز تنداب همگرا را مدل کنند؛ هرچند مدل RNG تا حدودی دقیق‌تر از دو مدل دیگر مدل عمل کرده و از لحاظ زمان محاسبات با صرفه‌تر از مدل k-ε و LES می‌باشد (مخصوصا اگر شبکه‌بندی ریز باشد).

- تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد که این موضوع نشان می‌دهد که در سایر تحقیقات در مورد سرریز تنداب همگرا، این مدل عددی می‌تواند با دقت بالایی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[۱] عطاری، ج.، حوضچه‌های استغراق در پایاب سرریزهای آبشاری، سمینار کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۲.

[۲] افشار، ع.، نیک صفت، غ.، طراحی سازه‌های هیدرولیکی سدهای کوچک، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۷۶.

[3] Woolbright, R.W., Hydraulic Performance Evaluation of RCC Stepped Spillways with Sloped Converging Training Walls, M. SC, Oklahoma State University, 2008.

[4] Schwartz, H. I., Hager, W. H., Shock Pattern at Abrupt Wall Deflection, ASCE, 1992.

[5] Hanna, L. J., Pugh, C. A., Hydraulic Model Study of Pilar Dam, Denver, Colorado, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, 1997.

[6] Reinauer, R., Hager, W. H., Supercritical Flow in Chute Contraction, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE; 124 : 55-64, 1998.

[۷] صباغ یزدی، س.، امین‌نژاد، ب.، محاسبه متغیرهای جریان فوق بحرانی در تندابهای با دیواره‌های همگرا با استفاده از شار انتقالی جهت‌مند در مرزهای احجام محدود بی‌ساختار، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۴.

[8] Jan, C. D., Chang, C. J., Hydraulic Jumps in an Inclined Rectangular Chute Contraction, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE; 135(111): 949-958, 2009.

[9] Jan, C. D., Chang, C. J., Lai, J. S., Guo, W. D., Characteristisc of Hydraulic Shock Wave in an Inclined Chute Contraction, Journal of Mechanics, Vol. 25, No. 2, 2009.

[10] Hunt, S. L., Temp, D. M., Kadavy, C., Hanson, G., Converging Stepped Spillways: Simplified Momentum Analysis Approach, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE; 138 : 796-802, 2012.

[۱۱] نیک پور، م.، فرسادی‌زاده، د.، حسین‌زاده دلیر، ع.، بهمنش، ج.، سلماسی، ف.، تاثیر هندسه تبدیل همگرا بر پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه‌ای، نشریه آب و خاک، جلد ۲۸، شماره ۲، ۱۳۹۳.

[۱۲] عظیمیان، ا.، دینامیک سیالات محاسباتی، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۳.

[13] Flow Science, Inc., Flow-3D User's Manual, 2012.

[14] Shames, I.R., Mechanics of Fluids (2nd ed.) , McGraw-Hill International Book Company, 1982.

[15] Wilcox, D.C., Turbulence Modeling for CFD (2nd ed.) , DCW Industries Inc., California, 2000.

[۱۶] موسسه تحقیقات آب، گزارش نهایی مدل هیدرولیکی سرریز سد گاوشان، ۱۳۸۱.

www.SID.ir