

شبیه‌سازی عددی عملکرد هیدرولیکی جریان آب و هوا در سرریزهای سه‌جانبی با در نظر گرفتن آثار مقیاس

مهدیار فرهودی^۱، سیدعلی اکبر صالحی‌نیشابوری^{۲*}، اکبر صفرزاده‌گندشمین^۳

۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

*salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۹/۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۹/۷]

چکیده

استفاده از سرریزهای چندوجهی به دلیل کاهش قابل توجه هزینه و مشکلات اجرایی در مقایسه با سایر سرریزها، مورد توجه طراحان این نوع سازه‌ها است. در مناطقی که از لحاظ مکانی و افزایش عرض کلی جایگاه سرریز، محدودیت وجود دارد و یا در مناطقی که از لحاظ افزایش فضا و حجم اضافی برای سیل محدودیت داشته باشند، همچنین برای اصلاح و افزایش ظرفیت سرریز موجود، می‌توان از سرریز چندوجهی استفاده کرد. از طرفی تلاطم و آشفتگی جریان و اعمال ضربات شدید آب بر کف و دیواره‌های جانبی کانال آب‌بر و به‌طور کلی شرایط نامناسب جریان داخل کانال آب‌بر، کارایی این سرریزها را با مشکل مواجه می‌کند. در این پژوهش ابتدا با استفاده از یک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی (Flow-3D) به بررسی جریان سه‌بعدی در سرریز U شکل با به‌کارگیری مدل آشفتگی RNG پرداخته می‌شود. با توجه به اهمیت ورود هوا به جریان در سازه‌های هیدرولیکی به شبیه‌سازی جریان دوفازی در این پژوهش پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده در مقایسه با شبیه‌سازی عددی تک فاز، حاکی از بهبود پیش‌بینی جریان است. سپس با در نظر گرفتن مدل با ابعاد واقعی، تأثیر مقیاس در مدل‌های آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد مدل‌های فیزیکی در پیش‌بینی ورود هوا به جریان مناسب نیستند و میزان هوای وارد شده وابسته به عدد رینولدز است و از تشابه فرودی تبعیت نمی‌کند.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی عددی، سرریز چندوجهی، جریان دوفازی، اثر مقیاس، Flow 3D

۱- مقدمه

ذخیره سد و یا افزایش دبی سرریز و یا ترکیبی از این دو، اصلاحاتی در تاسیسات مربوط به سد انجام داد. به منظور افزایش دبی سرریزها، ایده استفاده از سرریزهای چندوجهی یکی از راهکارهای پیش‌رو است. این سرریزها برای عبور جریان با بار هیدرولیکی کم، به عنوان سازه مناسبی برای آبیگری از کانال‌ها، مقسم‌ها، سازه کنترل ورودی به نیروگاه‌ها و به طور ویژه برای سرریز سدها مطرح شده‌اند.

هنگامی که با بهره‌گیری از اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژی، سیل بیشینه محتمل^۱ برای سدی خاص بیشتر از دبی طراحی سیلاب است (سیلی که سد مطابق آن طراحی شده است)، در این صورت باید با اقداماتی همچون افزایش حجم

1 Probable maximum flood

در پژوهش‌های بسیاری به مسأله سرریزها، انواع، ساختار و چگونگی طراحی آن‌ها با عناوین مختلف پرداخته شده است و بیشتر سعی شده است تا با ساخت یک مدل هیدرولیکی و تغییر پارامترهای مؤثر در عملکرد این سرریزها به شرایط بهینه هیدرولیکی مدل دست یافته و نتایج حاصل به نمونه اصلی تعمیم داده شود [1].

برای بررسی دقیق رفتار سازه‌های هیدرولیکی، در بسیاری مواقع، مدل‌های فیزیکی از سازه مورد نظر، که همواره تحت تأثیر عامل مقیاس بوده و محدودیت‌هایی دارند، ساخته شده و آن را مورد آزمایش قرار می‌دهند که این خود متحمل هزینه‌های اقتصادی و زمانی قابل توجهی است. ضمن اینکه اثر مقیاس روی نتایج، خود از جمله مشکلاتی است که گریبان‌گیر مدل‌سازی فیزیکی است. با پیشرفت قابل توجه کامپیوترهای امروزی، روش‌های عددی قدرت بیشتری را برای حل مسائل پیچیده پیدا نموده‌اند و در این راستا نرم‌افزارهای زیادی به وجود آمده‌اند. برتری ویژه مدل‌های عددی، امکان شبیه‌سازی مسئله با همان مقیاس واقعی است.

هواگیری جریان یکی از مسائل مهم مرتبط با سازه‌های هیدرولیکی است. ورود هوا به جریان روی سرریزهای جانبی، ریزشی، پلکانی و غیره از نمونه‌های هواگیری طبیعی جریان است. این پدیده با تأثیری که روی عمق، فشار و توزیع سرعت جریان در سازه‌های هیدرولیکی می‌گذارد، در اغلب موارد در روند طراحی هیدرولیکی و سازه‌ای سازه‌های هیدرولیکی تأثیرگذار است. مهمترین اثر این پدیده را می‌توان در تأثیر آن روی توزیع فشار، به ویژه فشار روی سطح سازه‌های هیدرولیکی دانست [2].

تاکنون پاره‌ای مطالعات آزمایشگاهی در مورد سرریزهای چندوجهی انجام شده است و اشکال گوناگونی از این نوع سرریزها در ارتباط با عملکرد بهینه ارائه شده است. اما مطالعات محدودی در مورد عملکرد هیدرولیکی سرریزهای سه‌جانبی صورت گرفته است و اغلب کارهای انجام شده به مسئله بهبود و اصلاح عملکرد هیدرولیکی جریان روی این سرریزها پرداخته است [3]. در مؤسسه تحقیقات آب (۱۳۷۴) روی شکل آبپایه، ارتفاع و محل نصب آن و تراز کف کانال

جانبی در سه مدل هیدرولیکی سرریزهای سد شهید یعقوبی، جره و سیوند پژوهش‌هایی انجام شده است [4]. مطالعات فارنی و نایت روی ضریب تخلیه و میزان آبگذری یک سرریز جانبی بهینه ال شکل با قابلیت ارجاع آن به سرریز صاف و یا یو شکل بوده است [5,6]. منتظرکلاته و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی و کلاسیک روی تعدادی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی این سرریزها پرداختند. ایشان با تعریف نوسانات فشار به عنوان تابع هدف و پارامترهایی چون ارتفاع آبپایه، محل آبپایه، شیب کف کانال جانبی و عدد فرود جریان ورودی به عنوان پارامترهای مؤثر، مطالعات جزئی‌تری روی این سرریزها انجام دادند [7]. دانش‌د و همکاران بوسیله مدل عددی *Fluent*، جریان روی سرریز سه‌جانبی سد سیوند را مدل‌سازی کردند [8]. البته مطالعات ایشان بیشتر متوجه مدل‌های آشفتگی، روش‌های حل معادلات حاکم و کارایی مدل عددی بوده است. تقی‌زاده به مطالعه بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای سه‌جانبی با استفاده از شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار *Flow3D* پرداخت [9]. ایشان مدل سرریز سد جره را بدون در نظر گرفتن ورود هوا و به صورت تک فاز بررسی کرد. همچنین به بررسی اثر پلکانی کردن پروفیل استاندارد سرریز سه‌جانبی و ارائه روابط مناسبی برای محاسبه ضریب آبگذری در پلان‌های مختلف پرداخت.

شبیه‌سازی عددی جریان در روی سرریز چندوجهی یو شکل و دوزنقه‌ای شکل در پلان به وسیله یک پژوهشگر انجام شده است، ولی تاکنون در مورد شبیه‌سازی عددی سه بعدی جریان دو فازی آب و هوا، روی سرریزهای چندوجهی گزارشی مشاهده نشده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی عددی چگونگی عملکرد این نوع سرریزها با در نظر گرفتن اثر هوای ورودی به داخل جریان و تأثیر آن بر میدان جریان و در نتیجه بهبود نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشین از طریق مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های تک فاز انجام شده است.

۲- معادلات حاکم

در این پژوهش، با بررسی امکانات و توانایی‌ها و

مناسب را در آن سطوح اعمال کند. برای جریان آب و هوا پارامتر F بیانگر کسر حجمی آب، و ناحیه متمم آن با کسر حجمی $1-F$ معرف هوا می‌باشد. معادلات حجم سیال در یک حجم واحد برابر است با [11]:

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

که در آن F_{SOR} نرخ زمانی تغییر کسر حجمی آب در ارتباط با منبع جرم R_{SOR} است و ترم پخش برابر است با [11]:

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_f A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_f A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_f A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right] \quad (4)$$

و ضریب پخش برابر $v_f = \frac{c_f \mu}{\rho}$ است که در آن c_f ثابتی وابسته به عدد اشمیت است [11].

۲-۲- مدل آشفتگی RNG k-ε

مدل آشفتگی RNG که در این پژوهش استفاده شده است، شامل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ استهلاك آشفتگی (ϵ) برای بدست آوردن تنش‌های رینولدز و لزجت گردابه‌ای است. معادله انتقال استهلاك آشفتگی (ϵ) برابر است با [11]:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P + C_{3\epsilon} G) + D_{diff} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

که ضرایب آن برابر با $C_{1\epsilon} = 1.44$ ، $C_{2\epsilon} = 1.92$ و $C_{3\epsilon} = 0.2$ هستند و ترم پخش استهلاك برابر است با [11]:

$$D_{diff} = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (v_\epsilon A_x \frac{\partial \epsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v_\epsilon A_y \frac{\partial \epsilon}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_\epsilon A_z \frac{\partial \epsilon}{\partial z}) \right] \quad (6)$$

$RMDTKE$ ضریب پخش استهلاك آشفتگی است که برای مدل k-ε استاندارد برابر با مقدار ۰/۷۷ بوده، ولی در مدل RNG این مقدار برابر با ۱/۳۹ است [11].

۲-۳- هواگیری جریان

در سرریزهای سه‌جانبی، جریان از یک ارتفاع بلند فرو می‌ریزد و سرعت جریان به سمت انتهای سرریز به شدت افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت جریان سبب شکل‌گیری پدیده

محدودیت‌های نرم‌افزارهای در دسترس از نرم‌افزار *Flow3D* برای شبیه‌سازی میدان جریان در سرریز سه‌جانبی استفاده شده است. معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم‌ناپذیر لزج در حالت آشفتگی، توسط معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده، موسوم به رینولدز (RANS) بیان می‌شوند. از آنجایی که جریان در پایین سرریز همواره به شدت آشفتگی است، بنابراین در اینجا از معادلات (RANS) با مدل آشفتگی دو معادله‌ای برای حل جریان آشفتگی و محاسبه انتقال آشفتگی در حوزه محاسباتی استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای حل معادلات حاکم بر جابه‌جایی^۲ و پخش^۳ از روش آپ-ویند مرتبه دوم^۴ استفاده شده است.

در سیستم مختصات کارتزین، معادلات حاکم عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم، که در ذیل ارائه شده‌اند [10].

معادله پیوستگی جرم که به‌طور کلی به‌صورت زیر است:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

که V_F نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ جرم مخصوص سیال، R_{DIF} ترم نفوذپذیری آشفتگی و R_{SOR} برابر 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 به جهت‌های x ، y و z هستند.

معادلات مومنتم به شرح زیر هستند [11]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(U_i A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

در معادلات فوق $\dot{P}$ فشار، g_i نیروی گرانش در راستای i و f_i تنش رینولدز است.

۲-۱- مدل‌سازی جریان سطح آزاد

در این پژوهش از مدل حجم سیال VOF برای بدست آوردن سطح آزاد استفاده شده است [12]. مدل حجم سیال در این مدل می‌تواند سطح آزاد را ردیابی^۵ کرده و شرایط مرزی

- 1 Reynolds Averaged Navier Stokes
- 2 Convection
- 3 Diffusion
- 4 Second Order Upwind (S.O.U)
- 5 Track

هواگیری سطحی (خودهواگیری) در جریان‌ها می‌شود. پدیده خود هواگیری سبب تورم جریان و افزایش عمق می‌شود که این تورم و افزایش عمق بر توزیع فشار بر کف و همچنین در طراحی ارتفاع دیواره‌های کناری سرریز تأثیر چشم‌گیری دارد؛ اما وجود هوا در جریان تأثیر مثبتی بر کاهش خطرات ناشی از کاپیتاسیون می‌گذارد. بنابراین مهندسين طراح سازه‌های آبی علاقه دارند از چگونگی توزیع هوا در جریان در تئداب سرریز سدها آگاهی داشته باشند [13].

وقتی که آشفتگی در جریان به اندازه کافی برای بهم زدن پایداری سطح آب باشد، ورود هوا زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی بالابرنده آشفتگی (P_t) بزرگ‌تر از نیروهای پایداری سطح، شامل جاذبه و کشش سطحی (P_d) باشد [11]:

$$\rho k > \rho g_n L_t + \frac{\sigma}{L_t} \quad (7)$$

که در آن k = انرژی جنبشی آشفتگی، ρ = جرم مخصوص مایع، σ = ضریب کشش سطحی آب برابر با 0.073 (N/m) ، g_n = مؤلفه عمود بر سطح آب شتاب گرانش و L_t = ارتفاع بالا آمده المان آب است که برابر است با [11]:

$$L_t = c_\mu \times \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{k^2}{\epsilon}\right) \quad (8)$$

که c_μ = ضریب لزجت آشفتگی می‌باشد. هنگامی که این معیار برآورده شد، حجم هوای ورودی که در واحد زمان در آب محبوس می‌شود برابر است با [11]:

$$(V_{air}) = C_{air} A_s \sqrt{\frac{2(P_t - P_d)}{\rho}} \quad (9)$$

که در آن A_s = مساحت سطح و C_{air} = ضریب تناسب کسر حجم باز به جریان و ترم زیر رادیکال سرعت ورود هوا است. به عنوان یک حدس اولیه خوب پیشنهاد می‌شود که $C_{air} = 0.5$ باشد، و به این معنی است که مقدار هوای ورودی به اندازه نصف مساحت سطح المان است [11].

۴-۲- مدل Drift flux

در جریان‌های متشکل از چند مؤلفه، برای نمونه مخلوط‌های سیال / ذره، سیال / حباب‌های هوا و سیال / سیال که در آن هر کدام از مؤلفه‌ها دارای جرم مخصوص متفاوتی است، مشاهده شده، که هر کدام از آن‌ها می‌توانند مقدار سرعت

متفاوتی را داشته باشند. این تفاوت در سرعت ناشی از نیروهای حجمی غیریکنواختی است که بعلافت تفاوت در جرم مخصوص مؤلفه‌ها بوجود آمده است. هدف این مدل محاسبه حرکت دو فاز وابسته به سرعت حجم متوسط $\bar{u}$ است. سرعت متوسط وزن‌دار حجمی^۲ برابر است با [11]:

$$\bar{u} = f u_1 + (1 - f) u_2 \quad (10)$$

برای جریان‌های دوفازی معادله‌ای برای سرعت نسبی به دست می‌آید که در آن u_r تفاوت سرعت نسبی بین فازهای پیوسته و پخش شده است [11]:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_2 \cdot \nabla u_2 - u_1 \cdot \nabla u_1 = \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) \nabla P - \left(\frac{1}{(1-f)\rho_2} + \frac{1}{f\rho_1}\right) k u_r \quad (11)$$

∇P گرادیان فشار و k ضریب درگ در یک حجم واحد است که وابسته به تعامل دو فاز می‌باشد. در این قسمت هدف تعیین سرعت نسبی u_r است.

۳- مدل عددی

۳-۱- مشخصات میدان حل

مطالعه حاضر بر اساس کار آزمایشگاهی انجام شده در مؤسسه تحقیقات آب در مورد سرریز سد جره صورت گرفته است. سرریز سه جانبی با طول ۱۰۰ متر از سه قسمت تشکیل شده است. وجه مقابل، قوسی از دایره به شعاع $20/62$ متر و زاویه مرکزی 164 درجه با طول ۵۹ متر و وجه جانبی مستقیم طرفین، با زاویه ۸ درجه نسبت به محور سرریز به طول $20/5$ متر می‌باشد. در مسیر عبور جریان از کانال انتقال یک آبپایه به شکل یک چهارم بیضی و به ارتفاع $2/99$ متر قرار داده شده است. کارشناسان هیدرولیک مقیاس مورد نیاز برای ساختن مدل فیزیکی را ۱:۵۰ انتخاب کردند [7].

میدان مورد نظر عبارت است از سه قسمت سرریز یو شکل اوجی، کانال انتقال و آبپایه، که در آن جریان از سه جهت از یک ارتفاع بلند فرو می‌ریزد و سرعت جریان به سمت انتهای سرریز به شدت افزایش می‌یابد. پس از برخورد جریان‌ها با یکدیگر و تشکیل گرده‌ماهی جریان به سمت

1 Volume-averaged velocity

2 Volume-weighted averaged velocity

شکل ۱. جسم جامد و شبکه بندی مدل عددی

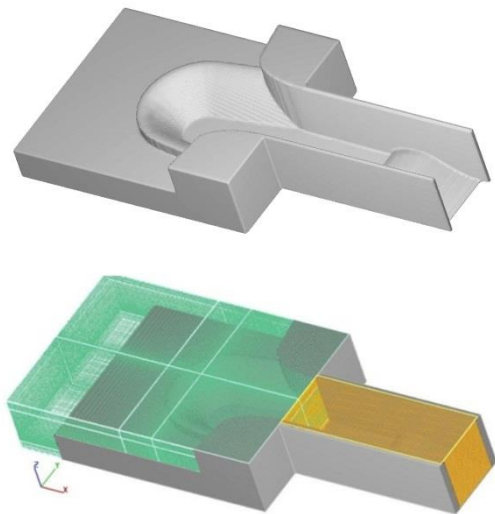


Fig. 1. Solid object and mesh grids

سه شبکه حل در این آزمایش بررسی شده است، بطوری که تعداد سلول‌های شبکه دوم سه برابر شبکه اول و به همین ترتیب تعداد سلول‌های شبکه سوم سه برابر شبکه دوم در هر سه جهت مختصاتی انتخاب شده است. در سه نقطه در طول کانال داده‌های فشار بدست آمده، برداشت شده و با استفاده از برون‌یابی ریچاردسون^۱ آن‌ها به داده‌های درستی آزمایی بررسی شده است [14]. شکل (۲) همگرایی داده‌های فشار با ریزتر شدن شبکه را نشان می‌دهد.

شکل ۲. همگرایی داده‌های فشار با ریزتر شدن شبکه

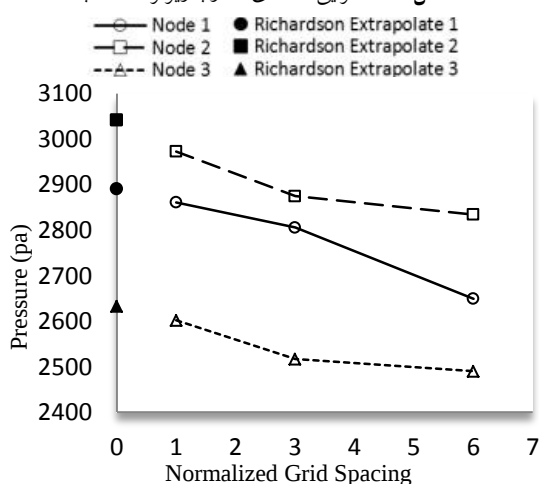


Fig. 2. Convergence of pressure data with smaller grid

پایین دست هدایت شده و در انتها بعد از عبور از آبیایه از طریق یک تندآب به سازه پراکنش انرژی رسیده و از طریق کانال پایاب وارد بستر طبیعی رودخانه می‌شود.

بنابراین بررسی عددی این پدیده نسبتاً پیچیده می‌تواند درک خوبی از فیزیک حاکم بر الگوی جریان در سرریزهای سه‌جانبی ارائه کند. در این مطالعه چهار دبی ۱۱، ۵۶، ۱۱۳ و ۱۷۷ لیتر بر ثانیه استفاده شده است. دبی طراحی در مدل ۱۷۷ لیتر بر ثانیه است.

۳-۲- مدل سازی و شبکه بندی

برای تهیه هندسه مرزهای جامد از نرم افزار AutoCAD استفاده شده است. Flow3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه بندی برخورد نسبتاً متفاوتی با سایر بسته های دینامیک سیالاتی محاسباتی دارد. ایجاد مرزهای جامد مناسب در شبکه بندی مدل عددی، به ویژه در مدل هایی با هندسه پیچیده (مانند مدل در دست بررسی)، بزرگترین محدودیت است و انتخاب مناسب آن می تواند دقت محاسبات را بیافزاید [9]. برای انفصال میدان از دو بلوک محاسباتی با شبکه غیریکنواخت استفاده شده است، که در مجموع شامل حدود یک میلیون و دویست هزار حجم محاسباتی می شود. در نواحی ای که تغییرات شدید پارامترهای جریان وجود دارد، از شبکه ریزتر (با ابعاد کمینه ۰/۵ mm) و در سایر نواحی از شبکه درشت تر (در حدود ۴۰ mm) استفاده شد. شکل (۱) مرزهای جامد و شبکه بندی مدل عددی سرریز سد جره را نشان می دهد.

برای بررسی دقت حل مدل عددی و نیز حساسیت سنجی آن نسبت به شبکه مورد استفاده، برای هر مدل آشفتگی با توجه به نیاز پروژه مبنی بر رسیدن به توزیع فشار نزدیک به داده های آزمایشگاهی، در نواحی نزدیک کف کانال از شبکه بندی های مختلفی استفاده شده است، و در نهایت شبکه بندی بهینه از لحاظ دقت و زمان لازم برای حل مدل مزبور انتخاب شده است. برای کنترل کیفی شبکه انتخاب شده، مقاله اسلاتر مورد استفاده قرار گرفته است [14]. به این صورت که با تعریف پارامترهایی همگرایی شبکه های انتخاب شده به داده های درستی آزمایی را کنترل می کند. متغیر مورد بررسی را فشار در نظر گرفته و محاسبات انجام می گیرد.

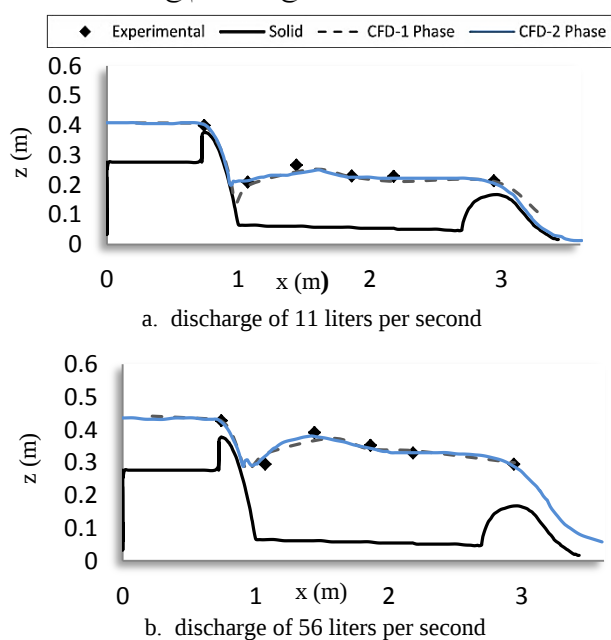
1 Richardson extrapolation

۳-۳- شرایط مرزی

آمده است. با توجه به شکل، جریان پس از عبور از روی تاج سرریز وارد کانال جانبی می‌شود و در اثر تداخل با جریان‌های جانبی سبب شکل‌گیری گرده‌ماهی در این ناحیه می‌شوند (ناحیه بین نقاط ۲ و ۳ در شکل ۳). از آنجائی‌که افزایش عمق جریان در کانال جانبی مهم‌ترین عامل در کاهش نوسانات فشار و بهبود جریان است [7,9]، در دبی‌های پائین‌تر با توجه به عمق کم آب در کانال خطای بیشتری مشاهده شد. بیشترین خطا در دبی ۵۶ لیتر بر ثانیه به مقدار حدودی ۱۲ درصد در محل تشکیل گرده‌ماهی مشاهده شده است. لازم به ذکر است که در کلیه جداول و شکل‌ها منظور از CFD-1 Phase حل عددی مدل تک فاز و منظور از CFD-2 Phase حل عددی مدل دوفاز است.

از تحلیل نتایج فوق، با توجه به جدول (۱) بیشترین خطا (متوسط ۷/۴٪) در ناحیه به‌وجود آمدن گرده‌ماهی مشاهده شده است، که دلیل آن می‌تواند به علت نوسانات بالای فشار در این ناحیه، آشفتگی شدید جریان و محدودیت مدل‌های آشفتگی در پیش‌بینی جریان در این ناحیه پرتلاطم باشد. با توجه به جدول (۱) اگر از بالادست سرریز به سمت پایین بایستیم سمت راست و چپ در سرریز مشخص خواهد شد.

شکل ۴. مقایسه پروفیل سطح آب در نیم‌رخ مرکزی



در ورودی میدان از شرط مرزی دبی معین استفاده شده است. برای آن که پروفیل سرعت ورودی کاملاً توسعه یافته باشد و شرایط جریان در ابتدا هموار باشد، شرط مرزی ورودی به اندازه کافی از سرریز فاصله گرفته است. برای مرز خروجی میدان یعنی بعد از آبپایه از شرط مرزی فشار استفاده شده است که در مقایسه با حالت Outflow از شرایط حل بهتری برخوردار بود. برای شرط مرزی بالا یا Z_{max} نیز از شرط مرزی فشار استفاده شد، که در این حالت نیز در مقایسه با حالت قابل قبول شرط مرزی تقارن^۱ از شرایط حل بهتری برخوردار است. برای سایر سطوح شرط مرزی دیوار صاف در نظر گرفته شد.

۴- تحلیل نتایج

قابل ذکر است که هر اجرا روی یک کامپیوتر با سی پی یو ۳/۲ گیگاهرتز و حافظه دسترسی ۸ گیگابایت حدود ۱۸ ساعت بطول انجامیده است.

۴-۱- پروفیل سطح آب

مقایسه پروفیل سطح آب بدست آمده توسط حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در دسترس حاکی از دقت حل بالای روش عددی و پیش‌بینی درست عمق آب و الگوی جریان است.

شکل ۳. شبیه‌سازی عددی جریان در دبی ۵۶ لیتر بر ثانیه و مقاطع برداشت

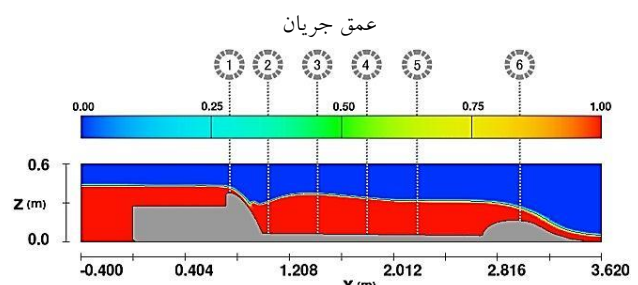


Fig. 3. Flow numerical simulation in a discharge of 56 liters per second and locations of depth measurements

شکل (۳) پروفیل سطح آب در دبی ۵۶ لیتر بر ثانیه را بعد از رسیدن به یک حالت پایدار نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده در دبی‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با مقادیر آزمایشگاهی در شکل (۴)

جدول ۱. مقادیر عمق جریان در مقاطع عرضی بر حسب سانتی متر

a. Q=11 (lit/s)									
Type	Experimental			CFD-2 Phase			Error %		
Section	Right	Center	Left	Right	Center	Left	Right	Center	Left
2	15	14.5	15	14.95	14.99	15.03	0.33	3.36	0.19
3	17	20.5	16.8	16.31	19.30	16.53	4.06	5.84	1.59
4	18.1	17.3	18	16.94	16.99	16.93	6.39	1.79	5.94
5	19.3	17.5	19	17.10	17.12	17.13	11.41	2.14	9.86
b. Q=56 (lit/s)									
Type	Experimental			CFD-2 Phase			Error %		
Section	Right	Center	Left	Right	Center	Left	Right	Center	Left
2	23.4	23	23.5	24.35	25.76	24.01	4.06	12.01	2.17
3	26	33	26.5	29.66	31.03	29.30	14.08	5.97	10.56
4	28.1	29.5	28.5	27.03	27.88	26.84	3.82	5.49	5.82
5	27.5	27.5	27.5	26.30	26.68	26.50	4.35	2.96	3.64
c. Q=113 (lit/s)									
Type	Experimental			CFD-2 Phase			Error %		
Section	Right	Center	Left	Right	Center	Left	Right	Center	Left
2	30.8	30.5	30.7	29.42	32.52	29.28	4.46	6.61	4.63
3	33	39.6	32.8	37.14	38.65	37.18	12.53	2.39	13.34
4	33.4	36.5	33.5	33.47	34.24	33.58	0.20	6.19	0.24
5	34.7	34.5	34.8	32.61	33.25	32.58	6.01	3.62	6.38
d. Q=177 (lit/s)									
Type	Experimental			CFD-2 Phase			Error %		
Section	Right	Center	Left	Right	Center	Left	Right	Center	Left
2	41.6	42	42	38.46	38.84	38.46	7.55	7.52	8.43
3	42.4	42.2	42.6	40.22	41.72	40.11	5.15	1.13	5.84
4	40.9	41.7	40.8	39.05	39.32	39.22	4.51	5.70	3.87
5	41.2	41	41.2	38.53	39.39	38.63	6.48	3.92	6.24

Table 1. Cross sectional flow depths (cm) for different discharges

۴-۲- توزیع فشار کف کانال جانبی

از بررسی نتایج به دست آمده مشاهده می شود که توزیع فشار در حالت دوفازی با توجه به در نظر گرفتن ورود هوا و تغییرات جرم مخصوص جریان بهبود یافته و تا حد قابل قبولی، به ویژه در دبی های بالاتر رسیده است.

همان گونه که گفته شد در دبی های پایین تر به علت وجود آشفتگی شدید و محدودیت مدل های آشفتگی خطای بیشتری مشاهده شده است، در حالی که به دلیل پر شدن سرریز در

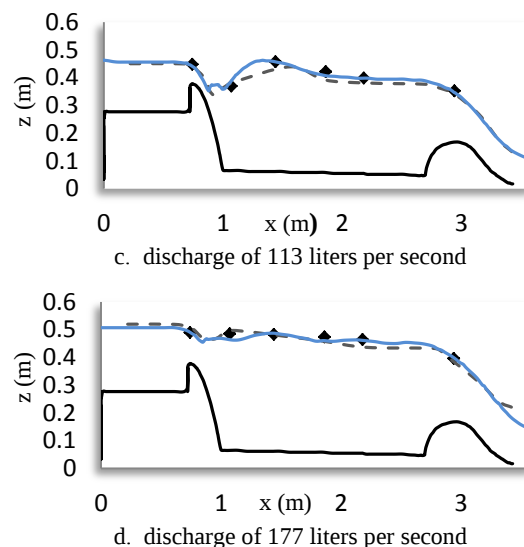


Fig. 4. Comparison of water surface profiles in the center line

از آنجایی که روش VOF به کار گرفته شده در این نرم افزار، حتی در حالت تک فازی نیز با در نظر گرفتن اثر ورود هوا، در تعیین سطح آزاد بخوبی عمل می کند، با توجه به شکل (۴) و جدول (۱) با مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی مدل در دو حالت تک فازی و دوفازی در کلیه نقاط حوزه حل، مشاهده می شود که در ناحیه ریزش جریان به داخل حوضچه آرامش، یعنی ناحیه ای که بیشترین هوای ورودی به جریان را دارد، اندکی اختلاف (به طور متوسط ۴ درصد) در پیش بینی سطح آب وجود دارد که نشان از عملکرد بهتر مدل دوفازی در این ناحیه دارد و از نظر کمی به طور میانگین در کلیه نقاط نیم رخ مرکزی کانال مدل دوفازه ۲/۵ درصد نتایج مدل تک فاز را بهبود بخشیده است. با توجه به سه بعدی بودن مسئله مورد بحث، مقادیر عمق آب در نقاط مختلفی در راستای عرضی نیز برداشت شد.

با توجه به جدول (۱) از مقایسه مقادیر عمق جریان داده های آزمایشگاهی در ابتدای کانال مشاهده می شود که مقادیر عمق آب در کناره ها کمتر از نیم رخ مرکزی کانال می باشد (گرده ماهی) و رفته رفته به سمت انتهای کانال در یک تراز قرار می گیرند. همانطور که در مدل عددی نیز مشاهده شد برخورد جریان های ریزشی و تشکیل گرده ماهی دلیل این امر می باشد، و این مسئله نشان دهنده شبیه سازی مورد قبول مدل عددی در پیش بینی الگوی جریان است.

دبی‌های بیشتر و در نتیجه آشفته‌گی کمتر، مدل عددی از دقت خوبی برخوردار است.

از جهت تحلیل هیدرودینامیکی، با توجه به شکل (۶) بردارهای سرعت جریان در ناحیه تشکیل گرده‌ماهی بر اثر تداخل جریان‌ها از طرفین و برخورد به یکدیگر رو به بالا می‌باشد، که این مسئله موجب به‌وجود آمدن حالت مکش در این ناحیه از جریان می‌شود، بنابراین فشار وارد بر کف در این ناحیه افت خواهد کرد.

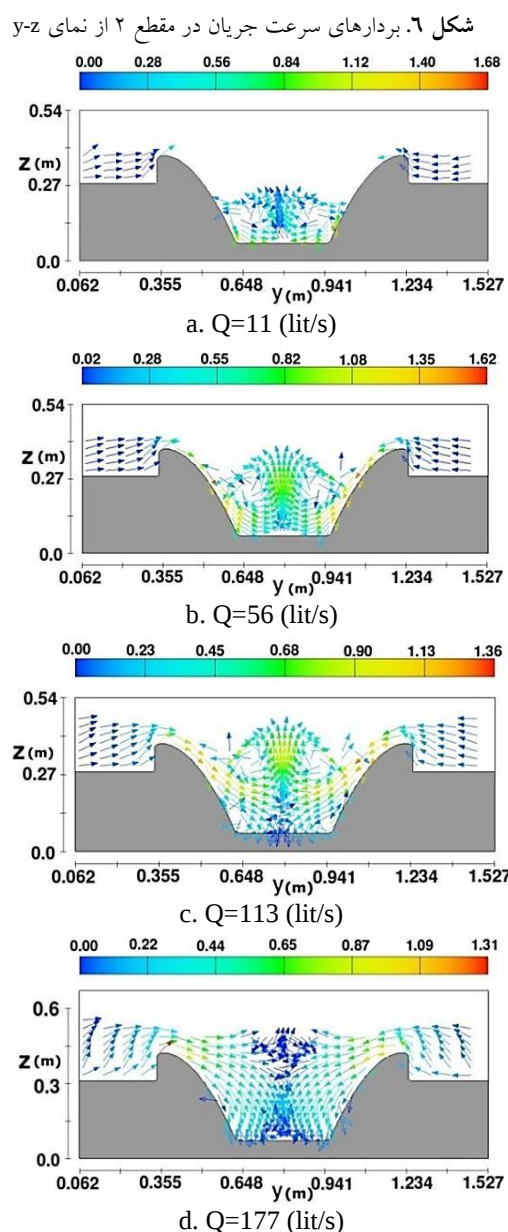


Fig. 6. Flow velocity vectors in section 2 of the y-z view

مقادیر خطای متوسط و بیشینه فشار در دبی‌های مختلف در جدول (۲) آمده است. همانطور که ذکر شد بیشترین خطا در ناحیه

شکل ۵. توزیع فشار در نیم‌رخ کانال جانبی

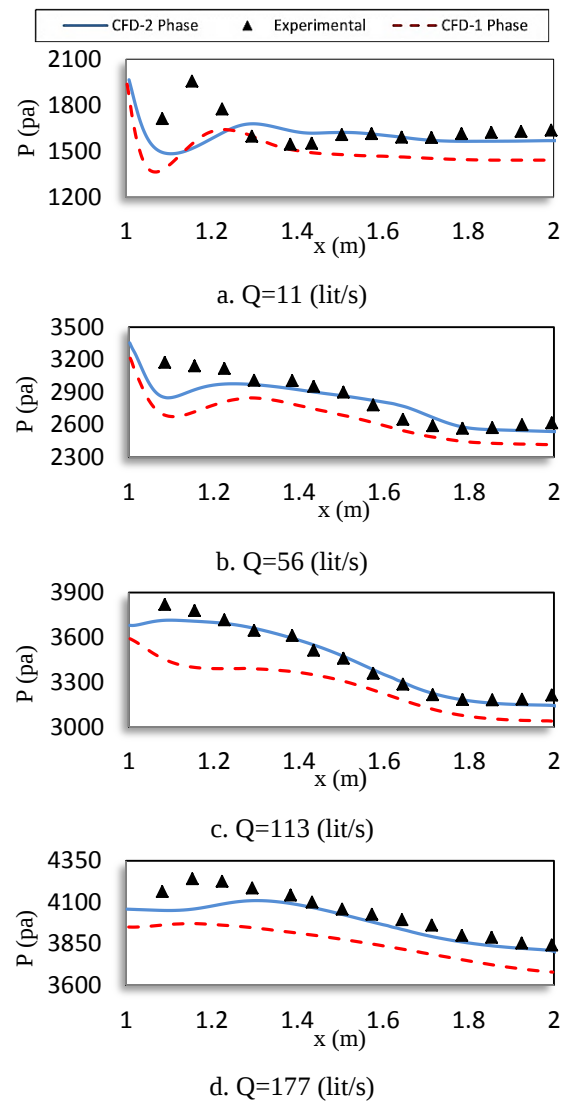


Fig. 5. Pressure distribution in the centerline

با توجه به شکل (۵) بیشینه خطا در ابتدای کانال جانبی و در محل تشکیل گرده‌ماهی رخ داده است، که این مسئله از چند منظر قابل بررسی است. اول آنکه اندازه‌گیری فشار در آزمایشگاه به وسیله نصب پیزومترهایی در محل‌های از پیش تعیین شده انجام گرفته است، که در این حالت در محل برخورد جریان به کف با توجه به قطر پیزومتر، سرعت اندکی عمود بر کف به داخل پیزومتر وجود دارد که این مسئله باعث بالا رفتن مقدار در داده‌های آزمایشگاهی است، در حالی که در مدل عددی سرعت عمود بر کف تقریباً صفر

۱:۵۰ بوده است، بنابراین تمامی پارامترها مانند ابعاد سرریز و سلول شبکه انتخاب شده، به مقیاس یک به یک تبدیل شده‌اند. اجرای مدل عددی برای مدل با مقیاس واقعی در سه دبی ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۱۴۰ مترمکعب بر ثانیه که معادل دبی‌های ۵۶، ۱۱۳ و ۱۷۷ لیتر بر ثانیه برای مدل کوچک مقیاس می‌باشند، انجام گرفت. برای مقایسه مقادیر بررسی شده بین دو مدل آزمایشگاهی و مدل با ابعاد واقعی، نتایج با تبدیل خروجی‌های به‌دست آمده از مدل واقعی به مقیاس آزمایشگاهی رسم شده‌اند.

۵-۱- پروفیل سطح آب

با توجه به شکل (۷) سطح آب بدست آمده برای نمونه اصلی با مقادیر بدست آمده برای مدل متفاوت بوده، که این اختلاف عمق جریان در مقیاس ۱:۵۰ به عنوان نمونه در دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه در تبدیل به مقیاس ۱:۱ اندازه‌ای برابر با بیشینه ۲/۵ متر خواهد داشت که مقدار قابل ملاحظه‌ای خواهد بود.

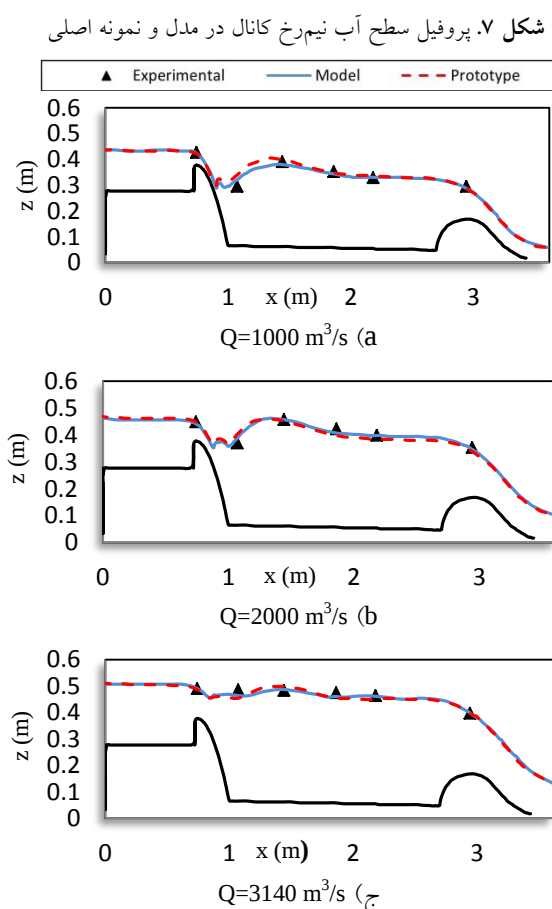


Fig. 7. Water profile in C.L. for model and prototype

ابتدائی تشکیل گرده‌ماهی مشاهده می‌شود و به تدریج با افزایش دبی از مقدار بیشینه خطا در این ناحیه کاسته می‌شود. میانگین خطای محاسبه شده نشان می‌دهد که با افزایش میزان دبی توزیع فشار در کف کانال جانبی به داده‌های بدست آمده در آزمایشگاه نزدیک‌تر می‌شود. لازم به ذکر است که فشار بدست آمده میانگین فشارهای ۵ ثانیه انتهایی بعد از رسیدن به حالت پایدار است.

جدول ۲ خطای فشار در کف

Q (lit/s)	Avg. Error%	Max. Error%	Location of max Error
11	6.56	22.29	x=1.16
56	2.93	10.1	x=1.08
113	0.98	2.87	x=1.08
177	1.70	4.24	x=1.17

Table 2. Pressure error on the floor

با توجه به اینکه مدل ساخته شده در آزمایشگاه با ابعادی ۵۰ برابر کوچکتر از مدل اصلی ساخته شده، و در آن ارتفاع سرریز از کف کانال به مقداری در حدود ۳۰ سانتی‌متر رسیده است، بنابراین نمی‌توان انتظار داشت تا حجم هوای ورودی به جریان مقدار واقعی خود را نشان دهد. در ادامه به بررسی مدل در اندازه واقعی و مقایسه آن با نتایج مدل شده‌ی آزمایشگاهی پرداخته خواهد شد.

۵- بررسی تأثیر مقیاس بر هیدرودینامیک سرریز سه‌جانبی

برای بررسی دقیق رفتار سازه‌های هیدرولیکی در بسیاری مواقع مدل‌های فیزیکی از سازه مورد نظر ساخته شده و آن را مورد آزمایش قرار می‌دهند که این خود متحمل هزینه‌های اقتصادی و زمانی قابل توجهی است. ضمن اینکه اثر مقیاس روی نتایج خود از جمله مشکلاتی است که گریبان‌گیر مدل‌های فیزیکی است. به‌علاوه این مدل‌ها بر اساس تشابه عدد فرود است و رفتار جریان در مدل با مقیاس کوچک همان رفتاری نیست که در نمونه واقعی اتفاق می‌افتد. به همین علت در این قسمت به بررسی درستی و تأثیر مقیاس انتخاب شده برای نمونه اصلی، پرداخته خواهد شد. با توجه به آن که نسبت تشابه انتخاب شده برای ساخت مدل فیزیکی برابر با

با بررسی شکل (۷) و جدول (۳) بیشترین اختلاف در پایین سرریز و در محل شکل‌گیری گرده‌ماهی مشاهده می‌شود. که دلیل آن با توجه به شکل (۸) ناشی از ورود هوای بیشتر در نمونه اصلی نسبت به مدل می‌باشد، که باعث می‌شود عمق آب در این قسمت بیشتر محاسبه شود. با توجه به شکل (۸) هوای ورودی به جریان در مدل با ابعاد واقعی تا انتهای کانال نیز ادامه دارد.

شکل ۸. مقایسه هوای ورودی به کانال بین مدل و نمونه اصلی

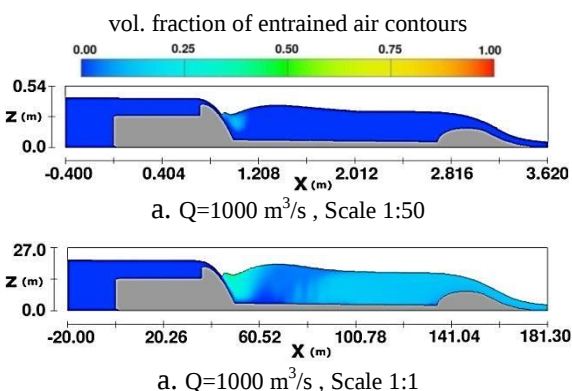


Fig. 8. Comparison between air entrance in model and prototype

نتایج نشان می‌دهد ورود هوا در مدل ۱:۱ نسبت به مدل ۱:۵۰ تابع نسبت تشابه آن نیست. این نتیجه هماهنگ با یافته‌های چنسن و همکاران است [15,16,17]. ایشان با بررسی پدیده پرش هیدرولیکی دریافتند که هوای ورودی به جریان را نمی‌توان بدون در نظر گرفتن آثار مقیاس برحسب نسبت اندازه حباب‌ها، آشفستگی و توزیع زمانی حباب‌های هوا، به نمونه اصلی تعمیم داد. همچنین نشان دادند که تشابه دینامیکی جریان دوفازی در پرش هیدرولیکی را نمی‌توان با استفاده از تشابه فرودی ارضاء کرد، مگر اینکه با سازه با ابعاد واقعی کار کرد.

از آنجائی‌که بیشتر سازه‌های هیدرولیکی، سیستم‌های کنترل سیلاب، تأسیسات تصفیه آب و غیره دارای عدد رینولدز 10^6 تا بیشتر از 10^8 هستند، پس این موضوع از اهمیت زیادی برخوردار است.

۵-۲- بررسی توزیع فشار کف کانال

از آنجائی‌که مقدار نسبی هوای وارد شده به جریان در مدل با

با توجه به آن‌که آشفستگی جریان در دبی‌های پایین‌تر بیشتر است، افزایش تراز سطح آب می‌تواند به علت ورود هوای بیشتر در نمونه اصلی در مقایسه با مدل باشد. با افزایش دبی جریان تراز سطح آب در هر دو مدل و نمونه اصلی نسبتاً یکسان می‌شود.

در جدول (۳) مقادیر متناظر عمق جریان سرریز با ابعاد واقعی در مقیاس ۱:۵۰ در مقاطع عرضی کانال و مقایسه آن‌ها با مقادیر آزمایشگاهی آمده است. نقاط مورد نظر همان نقاط مشخص شده در شکل (۳) است.

جدول ۳. مقادیر عمق جریان سرریز مدل واقعی در مقاطع عرضی

الف- دبی معادل $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$

Type	Experimental			CFD-2 Phase			Error %		
Section	Right	Center	Left	Right	Center	Left	Right	Center	Left
2	23.4	23	23.5	25.48	27.63	25.53	8.88	20.11	8.62
3	26	33	26.5	31.85	33.73	32.27	22.49	2.22	21.77
4	28.1	29.5	28.5	28.31	29.30	28.30	0.75	0.66	0.69
5	27.5	27.5	27.5	27.74	28.12	27.15	0.87	2.26	1.28

ب- دبی معادل $Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$

Type	Experimental			CFD-2 Phase			Error %		
Section	Right	Center	Left	Right	Center	Left	Right	Center	Left
2	30.8	30.5	30.7	32.02	34.02	32.02	3.96	11.54	4.30
3	33	39.6	32.8	37.55	39.23	37.65	13.79	0.93	14.79
4	33.4	36.5	33.5	33.96	34.27	33.97	1.68	6.10	1.41
5	34.7	34.5	34.8	33.41	33.12	33.17	3.71	4.04	4.69

ج- دبی معادل $Q=3140 \text{ m}^3/\text{s}$

Type	Experimental			CFD-2 Phase			Error %		
Section	Right	Center	Left	Right	Center	Left	Right	Center	Left
2	41.6	42	42	37.96	38.07	38.04	8.74	9.36	9.42
3	42.4	42.2	42.6	40.68	42.72	40.67	4.04	1.23	4.53
4	40.9	41.7	40.8	39.01	38.94	39.02	4.61	6.61	4.36
5	41.2	41	41.2	38.78	38.81	38.86	5.87	5.34	5.68

Table 3. Cross sectional flow depths (cm) in prototype for different discharges

با بررسی مقادیر خطا می‌توان پی برد که مقیاس انتخاب شده مطلوب بوده، که این مسئله در دبی‌های بالاتر که از اهمیت بیشتری نیز برخوردارند، مشهودتر است.

مدل آزمایشگاهی خواهد داشت. بعد از این مرحله که از مقدار هوای وارد شده کاسته می‌شود، باز هم به دلیل افزایش عمق جریان مقدار فشار بیشتری روی کف اعمال می‌شود که این مورد در دبی معادل ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به خوبی قابل مشاهده است.

از آنجایی که اگر هوای وارد شده به جریان دارای مقدار قابل توجهی باشد، می‌تواند بر جرم مخصوص مخلوط سیال تأثیر گذارد، پس می‌توان پی برد که مقدار فشار در نقاط مزبور با توجه به رقیق‌تر شدن سیال کاهش می‌یابد.

در ادامه یعنی در اواسط کانال علاوه بر افزایش جزئی عمق جریان، هوای وارد شده به جریان با توجه به شکل (۸)، مقدار بیشتری در نمونه اصلی نسبت به مدل دارد، که هم‌زمانی این دو مورد باعث می‌شود تا توزیع فشار در این نقاط بین مدل و نمونه اصلی تقریباً یکسان باشد. در انتها نیز باز هم به علت وجود هوا در جریان و رقیق‌تر شدن آن، مقدار فشار کمتری مشاهده می‌شود.

شکل ۱۰. جهت بردارهای سرعت در دبی معادل $3140 \text{ (m}^3/\text{s)}$

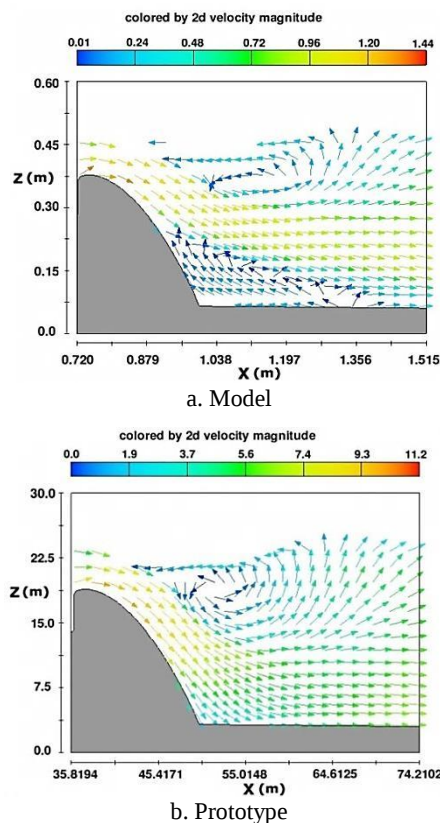


Fig. 10. Velocity vectors for equivalent discharge of $3140 \text{ (m}^3/\text{s)}$

ابعاد واقعی خیلی بیشتر است، پس انتظار می‌رود علاوه بر اینکه سطح آب در محل ورود هوا به جریان افزایش می‌یابد، مقدار فشار در این نقاط به علت سبکی حباب‌های هوا و اثر آن در جرم مخصوص مخلوط سیال، کاهش یابد.

با بررسی شکل (۹) می‌توان نتیجه گرفت که در دبی‌های کمتر اختلاف بین مقادیر بدست آمده برای مدل در مقایسه با نمونه اصلی بیشتر بوده، که دلیل آن وجود تلاطم بالای جریان و محدودیت مدل آشفتگی می‌باشد، ولی به تدریج با افزایش دبی از میزان این اختلاف کاسته می‌شود. مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف در توزیع فشار مربوط به ابتدا و انتهای بازه مورد نظر است.

شکل ۹. توزیع فشار کف نیم‌رخ کانال در مدل و نمونه اصلی

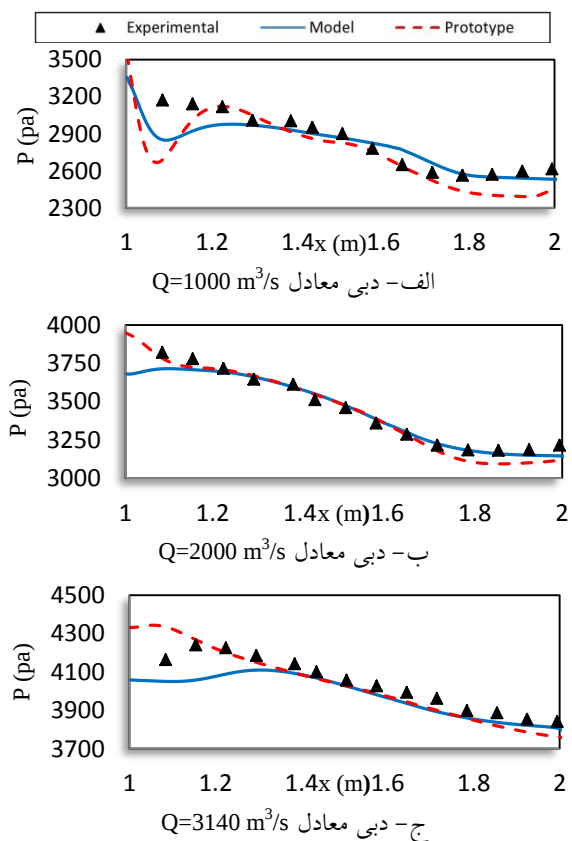


Fig. 9. Pressure distribution in C.L. for model and prototype

افزایش مقدار فشار در نقاط اولیه به دلیل افزایش عمق و همچنین افزایش نسبی سرعت ریزش جریان است. به علت بیشتر بودن انرژی ناشی از سرعت و همچنین افزایش میزان هواگیری جریان نمودار توزیع فشار افت بیشتری در مقایسه با

- بیشترین تغییرات در پروفیل سطح آب به دلیل ذکر شده در بالا، در ناحیه ورود هوا و تشکیل گرده‌ماهی مشاهده می‌شود، که به تدریج با حرکت به سمت پایین‌دست و همچنین با افزایش دبی از میزان این اختلاف کاسته خواهد شد.
- توزیع فشار در کف کانال جانبی باز هم در ناحیه ورود هوا به جریان دارای تفاوت با نمونه آزمایشگاهی آن می‌باشد. در دبی‌های بیشتر خطای کمتری مشاهده می‌شود.

در دبی معادل ۳۱۴۰ مترمکعب بر ثانیه اختلاف زیادی در توزیع فشار ابتدای کانال جانبی مشاهده می‌شود، که این پدیده ناشی از تفاوت در پیش‌بینی جهت بردارهای سرعت در نزدیکی کف در این دبی می‌باشد. با مشاهده شکل (۱۰) می‌توان دریافت که جهت بردارهای سرعت در مدل به سمت بالا بوده و یک جریان گردابه‌ای در این قسمت ملاحظه می‌شود، در صورتی که در مدل با ابعاد واقعی چنین پدیده‌ای مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان این گونه نتیجه گرفت که دلیل افزایش مقدار فشار در نمونه اصلی جهت جریان رو به پایین آن در این ناحیه می‌باشد.

۷- مراجع

- References**
- [1] Afshar A. & Niksefat Gh. 1988 *Design of Hydraulic Structures of Small Dams*, Iran University of Science and Technology Publication. (In Persian)
 - [2] Babb A. F. & Aus H. C. 1981 *Measurement of air in flowing water*, Journal of the Hydraulics Division, **107**(12), 1615-1630.
 - [3] Montazar A. & Salehi-Neyshabouri S.A.A. 2006 *Impact of some parameters affecting the hydraulic performance of U-shaped side spillway*, Canadian Journal of Civil Engineering, **33**, 552-560.
 - [4] Water Research Institute, 1996 *Final report of the hydraulic model of Jare Dam Spillway*, Journal No. 268. (In Persian)
 - [5] Knight A. 1989 *Design of efficient side channel spillway*, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, **115**(9), 1275-1289.
 - [6] Farney H. S. & Markus A. 1962 *Side channel spillway design*, J. Hydr. Engrng. ASCE; Vol. 88, No. 3, 131-154.
 - [7] Montazer-Kalate A.A. 1996 *A study on some major parameters affecting the hydraulic behavior of three-sided channel spillways*, M.Sc. thesis, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran. (In Persian)
 - [8] Daneshbod Y. & Taleb-Beydokhti N. 2009 *Simulation of flow on Sivand spillway with Fluent*, 08th Iranian Hydraulic Conference, Faculty of Engineering, Tehran University, Iran. (In Persian)
 - [9] Taghizadeh H. 2010 *Improving Hydraulic Performance of U-Shaped Spillways Using Numerical Modeling*, M.Sc. thesis, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)
 - [10] Patankar S. V. 1980 *Numerical heat transfer and fluid flow*, Taylor & Francis Group.
 - [11] Brethour J. M. & Hirt C. W. 2009 *Flow-3D user's manual*, Flow Science Inc.
 - [12] Hirt C. W. & Nichols B. D. 1981 *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*, Journal of Computational Physics; **39**(1), 201-225.

۶- نتیجه‌گیری

- با توجه به اهمیت ورود هوا به جریان در سازه‌های هیدرولیکی به شبیه‌سازی جریان دوفازی و بررسی عملکرد نرم‌افزار در موضوع تحقیق حاضر پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد مدل آشفتگی RNG گزینه مناسبی برای پیش‌بینی الگوی جریان در این نوع سرریزها می‌باشد.
- با بررسی میزان دبی ورودی، بیشترین خطا در تخمین پروفیل سطح آب و فشار کف کانال در دبی‌های پایین رخ داده است. همچنین بیشترین خطای عددی در محاسبات، در ناحیه تشکیل گرده‌ماهی مشاهده شد.
 - شبیه‌سازی دوفازی جریان منجر به بهبود نتایج به‌دست آمده، بخصوص برای توزیع فشار کف کانال شده است.
 - در دبی‌های پایین‌تر با توجه به آشفتگی بیشتر جریان اثر مقیاس نمود بیشتری خواهد داشت، در حالی که به تدریج با افزایش دبی از اثر آن کاسته خواهد شد.
 - جریان دو فازی تأثیرپذیری نسبتاً قابل توجهی از عامل مقیاس داشته، بنابراین نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی را نمی‌توان مستقیماً و بدون اعمال ضرائب تصحیح، برای نمونه‌های واقعی به‌کار برد.
 - هوای ورودی به جریان در مقیاس واقعی تفاوت عمده‌ای با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد.

- [16] Chanson H. 2007 *Air bubble entrainment in hydraulic jumps: Physical modeling and scale effects*, 32nd IAHR Biennial Congress, Vol. 2. IAHR.
- [17] Pfister M. & Chanson H. 2013 *Scale effects in modeling two-phase air-water flows*, Proceedings of the 35th IAHR World Congress, No. EPFL-CONF-188570. TPU.
- [13] Sabbagh- Yazdi SR. & Rezaei-Manizani H. 2012 *Using Depth Average Flow Solver of NASIR Finite Volume Software for Modeling Air Entrainment from Water Surface in Chute Flow*, Modares Civil Engineering Journal, Iran. 12(1), 39-54 (In Persian)
- [14] Slater J. W. 2006 *Examining spatial (grid) convergence*, Public tutorial on CFD verification and validation, NASA Glenn Research Centre, MS 86.
- [15] Chachereau Y. & Chanson H. 2011 *Air entrainment and scale effects in hydraulic jumps with small Froude numbers*, Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 3rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering, Engineers Australia.

Two-Phase Numerical Simulation of Flow Pattern in Three-sided Spillways, Considering Scale Effect

A. Farhoudi Mahdiar¹, B. Salehi Neyshabouri Seyed Ali Akbar^{2*}, C. Safarzade Akbar³

1- M.Sc. of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Associate Prof., Hydraulic Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

3- Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

*salehi@modares.ac.ir

Abstract:

Three-sided spillways attract crucial attention of designers due to their characteristics in significant reduction of costs and operating problems, in comparison with the other kinds of spillways. Three-side spillways are type of outlet works at dams that are from the best options in storage dams with specific topographical conditions - despite their hydraulic limitations and construction problems. This kind of spillways are applicable in locations with limited available space for overall width of spillway and in locations where excess volume for flood overload. On the other side, where modification and capacity increase are to be necessary in existing spillways, this kind of structure is recommended. However, inappropriate conditions in water channel - such as flow turbulence and impact of water on bed and lateral walls of the channel- result in poor performance of these structures. In the present study, flow pattern of a U-shaped spillway, the channel and the end sill are evaluated using computational fluid dynamics software (FLOW-3D). RNG k- ϵ model is implemented for simulation of turbulence. Comparison of numerical results with experimental data shows the ability of this model to predict three dimensional flow patterns over this kind of spillways. Hydraulic performance with reducing the pressure fluctuations in side channel is an important issue in the design procedure of these spillways. Regarding important effect of air entrance in hydraulic structures, two-phase analysis is performed in this study. Numerical results show that two-phase analyses have a better performance in comparison with one-phase simulations. Studies show that changing the inlet flow rate results in maximum error for estimating the water level and pressure profiles at bottom of the channel at low discharges. In addition, the maximum numerical error is observed in the area where bulge exists. By considering the actual dimensions of the model, scale effects are studied on physical model scales. The findings have some major implications of civil, environmental and sanitary engineering, because most hydraulic structures, storm water systems and water treatment facilities operate with Reynolds numbers within ranging from 10^6 to over 10^8 . In a physical model, the flow conditions are said to be similar to those in the prototype flow conditions; if the model displays similarity of form, similarity of motion and similarity of forces. The present results quantitatively demonstrate that the dynamic similarity of two-phase flows cannot be achieved with a Froude similarity unless working at full-scale. So that physical models are not good in predicting air entrainment and the amount of air entering depends on Reynolds number and does not follow Froude similarity. The largest amount of free surface profile variation due to aforementioned reason is observed in air entrance and bulge formation zones. This variation decreases as flow moves toward downstream or as discharge value increases.

Keywords: Numerical simulation, Three-sided spillway, Two-phase flow, Scale effect, Flow 3D