

# شبیه‌سازی عددی مشخصات هیدرولیکی جریان در سرریزهای سیفونی

محمد رضانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

عبدالرضا کبیری سامانی\* (دانشیار)

کیاچهر بهفرنیا (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)  
دربی ۲، شماره ۲/۲، ص. ۲۷-۳۵

سرریزهای سیفونی در شرایط وجود محدودیت فضا برای احداث انواع دیگر سرریزها و نیز برای عبور دبی زیاد در دامنه‌ی هد محدود استفاده می‌شوند. در نوشتار حاضر، به بررسی هیدرولیکی انواع رژیم‌های جریان، شامل: جریان زیر اتمسفر، جریان دوفازی و جریان با آب سیاه در سرریزهای سیفونی در شرایط غیردائمی پرداخته شده است. جهت صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، از نتایج آزمایشگاهی مطالعات پیشین استفاده شده است. جهت انجام شبیه‌سازی عددی از حل‌گر سیالاتی ANSYS-CFX که در زمینه‌ی شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی، توانایی‌های بیشتری نسبت به سایر نرم‌افزارها دارد، استفاده شده است. بررسی نتایج نشان داد که میزان نوسان‌های فشار در یک دبی مشخص در نقاط مختلف سرریز برای شرایطی که جریان داخل مجرای سرریز در حالت دوفازی است، به مراتب بیشتر از زمانی است که جریان زیر اتمسفر داخل سرریز برقرار است. بیشترین نوسان‌های فشار که می‌تواند باعث ارتعاش سازه‌ی سرریز شوند در قسمت‌های ورودی و گلوگاه سرریز ایجاد می‌شوند.

واژگان کلیدی: حل‌گر سیالاتی CFX، رژیم‌های جریان، سرریز سیفونی، شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار ANSYS.

mramezani217@gmail.com  
akabiri@iut.ac.ir  
kia@iut.ac.ir

## ۱. مقدمه

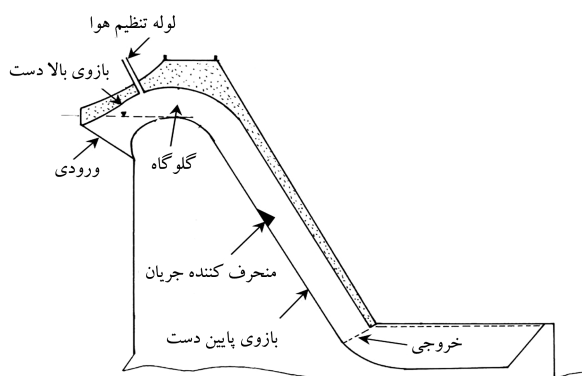
شواهد تاریخی نشان می‌دهند که ابتدا مصریان باستان و سپس یونانیان برای انتقال سیال بین محفظه‌ها از پدیده‌ی سیفونی شدن استفاده کرده‌اند.<sup>[۱]</sup> براساس مطالعات ایگرز و همکاران، سرریز سیفونی اولین بار در سال ۱۸۷۰ استفاده شده است.<sup>[۲]</sup> براساس اطلاعات موجود بزرگ‌ترین سیفون در نروژ و با دبی  $600 m^3/s$  ساخته شده است.<sup>[۳]</sup> با پیدایش و ارائه‌ی سرریزهای سیفونی با قابلیت تنظیم هوا، تحول بزرگی در زمینه‌ی طراحی بهینه‌ی آن‌ها صورت گرفت. هد (۱۹۷۵) با بررسی نحوه‌ی عملکرد سرریز سیفونی دریافت که ضریب دبی سرریز با افزایش هد تغییر محسوسی ندارد. وی پارامترهای مؤثر در ضریب دبی سرریز را ابعاد و محل قرارگیری منحرف‌کننده‌ی جریان و همچنین ابعاد و هندسه‌ی خروجی سرریز عنوان کرد.<sup>[۴]</sup> در پژوهش دیگری، اروین (۱۹۷۶)، سرریزهای سیفونی سد اسپلگاک<sup>۱</sup> و سیفون طراحی شده توسط هد،<sup>[۴]</sup> را با ساخت سه مدل آزمایشگاهی با مقیاس‌های متفاوت مطالعه کرد.<sup>[۴]</sup> علی و پیتمن (۱۹۸۰) با ساخت ۱۲ مدل آزمایشگاهی با مقیاس‌های متفاوت از سرریزهای سیفونی استفاده شده توسط هد و اروین، به بررسی اثر مقیاس پرداختند و دریافتند که مدل‌های با مقیاس کوچک‌تر از ۱:۳۰، به علت عدم قابلیت حفظ تناسب نیروهای لزجت و کشش سطحی در مدل اصلی و مدل آزمایشگاهی نباید برای پیش‌بینی عملکرد سرریز اصلی استفاده شوند.<sup>[۵]</sup> پژوهشگران در آزمایشگاه دانشگاه گلاسکو، به مطالعه‌ی منحنی‌های دبی - ارتفاع سرریزهای سیفونی سد

انتخاب سرریز مناسب برای تأمین اهداف موردنظر یک طرح سدسازی، اهمیت زیادی دارد. در شرایط وجود محدودیت مکانی برای احداث انواع دیگر سرریز و یا در شرایط لزوم تخلیه‌ی حجم زیاد آب با افزایش جزئی تراز سطح آب در مخزن سد، سرریز سیفونی به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب مدنظر قرار می‌گیرد. سرریز سیفونی از یک تونل خمیده به شکل U معکوس تشکیل شده است و ۵ بخش اصلی، شامل: ورودی، بازوی بالادست، گلوگاه، بازوی پایین دست و خروجی دارد (شکل ۱). معمولاً تاج سرریز در تراز نرمال قرار می‌گیرد. هنگامی که سطح آب در مخزن کمی بالاتر از عمق نرمال قرار گیرد، گلوگاه سرریز سیفونی، مانند یک سرریز لبه‌ی آبریز عمل می‌کند و آب را به پایین دست انتقال می‌دهد. عمل سیفونی شدن زمانی آغاز می‌شود که هوای روی تاج مجرا خارج شود. معمولاً برای جلوگیری از ادامه‌ی عمل تخلیه، هنگامی که سطح آب مخزن مجدداً به تراز نرمال می‌رسد، از یک مجرای هواده‌ی که عمل سیفون را متوقف می‌سازد، استفاده می‌شود. در غیر این صورت، سیفون آن قدر به عمل تخلیه ادامه خواهد داد تا ورود هوا به دهانه‌ی ورودی موجب قطع عملکرد سیفونی شود.<sup>[۱]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۷/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۱/۳۰، پذیرش ۱۳۹۷/۱۲/۲۶

DOI:10.24200/J30.2019.51942.2444



شکل ۱. سرریز سیفونی و اجزاء آن.

می‌تواند جهت محاسبه‌ی ضریب دبی سرریز سیفونی استفاده شود.<sup>[۱۲]</sup> پته‌چیه<sup>۶</sup> و فتوچی (۲۰۱۵) با ساخت مدل آزمایشگاهی سرریز سد بریک زربینو<sup>۷</sup> و قرار دادن سه عدد فشارسنج دیجیتالی در نقاط مختلف، تغییرات فشار را در طول سرریز بررسی کردند.<sup>[۱۳]</sup> همچنین پاک‌گرو و همکاران (۲۰۱۶)، اثر تغییر زاویه‌ی جام پرتابی قرار گرفته در خروجی سرریز، خصوصیات هیدرولیکی جریان را با ساخت مدل آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند که میانگین سرعت جریان در بازوی پایین دست سرریز هنگامی که زاویه‌ی جام پرتابی ۶۰ درجه باشد، نسبت به سایر زوایا در تمامی دبی‌ها بیشتر است. در زاویه‌ی جام پرتابی ۳۰ درجه، بیشترین مقدار استهلاک انرژی رخ داده است. آن‌ها در ادامه با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به شبیه‌سازی جریان داخل سرریز سیفونی در حالت پایدار پرداختند و به تطابق نسبتاً خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی خود و شبیه‌سازی عددی دست یافتند.<sup>[۱۴]</sup> پراسانا<sup>۸</sup> و کومار (۲۰۱۸) با ساخت مدل آزمایشگاهی مشابه با هد<sup>[۱]</sup>، به بررسی الگوی جریان در سرریز سیفونی و تراز آب در بالادست، روی تاج و پایین دست سرریز پرداختند و نتیجه گرفتند که نرم‌افزار فلوئنت، ابزار مناسبی برای بررسی خصوصیات جریان در غیاب مدل‌های آزمایشگاهی است.<sup>[۱۵]</sup>

همان‌طور که اشاره شد، از مزایای قابل توجه سرریزهای سیفونی می‌توان به قابلیت گذردهی دبی طرح با افزایش جزئی سطح آب بالادست و عملکرد مناسب بدون نیاز به استفاده از تأسیسات خاص و ابزار مکانیکی اشاره کرد. در اثر ایجاد رژیم‌های مختلف جریان در سرریز سیفونی، نوسان‌های فشار در قسمت‌های مختلف سرریز و به‌طور خاص در بازوی بالادست، گلوگاه و بازوی پایین دست آن قابل توجه است. لذا مطالعه‌ی بیشتر در زمینه‌ی اشاره شده، جهت دست‌یابی به درک بهتر از رفتار سازه‌ی سرریز سیفونی تحت رژیم‌های مختلف جریان جهت برخورداری از یک طرح ایمن و اقتصادی ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر، به بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان و رژیم‌های جریان تشکیل شده درون مجرای سرریز سیفونی در شرایط مختلف پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر برای اولین بار جریان در سرریز سیفونی در حالت ناپایا، به روش عددی بررسی و در مطالعات پیشین، شبیه‌سازی‌های عددی به صورت حل پایا مطالعه شده است.

## ۲. مبانی تئوری و روش حل عددی

فرایند شبیه‌سازی در ۴ مرحله‌ی: ایجاد هندسه و شبکه، تعریف فیزیک مدل، حل مسئله، و نمایش نتایج انجام می‌شود. اجرای فرایند شبیه‌سازی ناحیه‌ی محاسباتی مربوط سیال در پژوهش حاضر به این صورت بوده است. جهت ایجاد هندسه‌ی سرریز سیفونی، کانال بالادست و پایین دست، از نرم‌افزار اتوکد<sup>۹</sup> استفاده شد. در شکل ۲، هندسه‌ی مدل‌ها برای نواحی محاسباتی نشان داده شده است. در گام بعدی، کلیه‌ی تنظیم‌های مربوط به نوع حل (دائم یا غیردائم بودن)، مواد و مصالح استفاده شده، نوع جریان (آرام یا آشفته بودن)، شرایط مرزی، شرایط اولیه، شرط مرزی تماس سیال و جامد و خروجی‌های حل‌گر تعیین شده است. سیال‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، آب با دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و چگالی  $997 \text{ kg/m}^3$  و هوا با چگالی  $1.185 \text{ kg/m}^3$  بوده است. از آنجایی که نوع جریان در داخل و خارج سرریز به صورت دوفازی است، آثار نیروی شناوری باید در نظر گرفته شود. در پژوهش حاضر، از رویکرد اوپیری - اوپیری<sup>۱۰</sup> جهت شبیه‌سازی جریان دوفازی استفاده شده است. در جریان‌های دوفازی، دو فاز می‌توانند رفتاری همگن یا غیرهمگن داشته باشند. از دیگر موارد مهمی که در زمان حل یک مسئله‌ی سیالاتی به روش

آبیروک<sup>۲</sup> پرداختند و بیان کردند که یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در پایداری عملکرد سرریزهای سیفونی، طراحی مناسب هندسه‌ی ورودی و خروجی است.<sup>[۶]</sup> پرتی‌جونز<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۸۹)، آزمایش‌هایی با قرار دادن دو عدد لوله‌ی هواده در بدنه‌ی سرریز انجام دادند. یکی از لوله‌ها، مجرای برای ورود هوا به تاج سرریز و دیگری مجرای به‌منظور ورود هوا به قسمت فوقانی سرریز بود. به این ترتیب، امکان ورود و پخش هوا به داخل سرریز به خوبی برقرار می‌شد. آن‌ها دریافتند که با این کار با اعمال تغییرات جزئی در هد بالادست سرریز، دامنه‌ی وسیعی از دبی داخل سرریز برقرار می‌شود و عملکرد آن بسیار پایدارتر است.<sup>[۷]</sup>

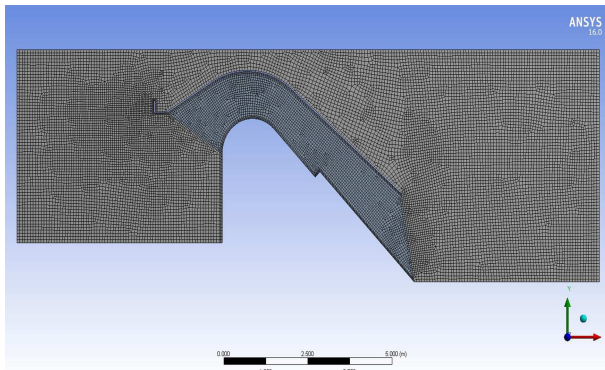
برخی پژوهشگران (۲۰۰۲) نیز ضمن مشاهده‌ی عملکرد سرریز سیفونی مخزن برنت<sup>۴</sup> در کشور انگلستان در زمان وقوع سیلاب دریافتند که سرریز مذکور کارایی مناسبی ندارد. از جمله مهم‌ترین معایب آن، این بود که با افزایش تراز آب مخزن و خروج ناگهانی هوای قرار گرفته در مجرا، امواج بزرگ در پایین دست سازه ایجاد و باعث قطع و وصل شدن جریان و به‌طور کلی عملکرد ناپایدار سرریز می‌شد. در نهایت مشخص شد که قرار دادن یک روزنه‌ی هوا در قسمت کلاهدک سرریز، علاوه بر ایجاد جریان پایدارتر و متحنی دبی - ارتفاع بپسینه، دبی بیشینه‌ی سرریز را نیز افزایش می‌دهد.<sup>[۸]</sup> هوئیچی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۶) با ساخت مدل‌های آزمایشگاهی، به بررسی تأثیر افزایش نسبت عرض به ارتفاع گلوگاه در ضریب دبی جریان پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت ذکر شده، ضریب دبی در ابتدا تغییرات قابل توجهی دارد. آن‌ها همچنین رابطه‌ی برای تعیین ضریب دبی براساس عدد فرود و نسبت هد آب مخزن از تاج سرریز به ارتفاع گلوگاه سرریز ارائه کردند.<sup>[۹]</sup> ایشان همچنین در ادامه‌ی مطالعات قبلی خود (۲۰۰۹)، به مقایسه‌ی دبی سرریز سیفونی و سرریز آزاد با پروفیل طولی یکسان پرداختند و نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد تا زمانی که نسبت تراز آب مخزن از تاج سرریز به ارتفاع گلوگاه کمتر از ۳/۵ باشد، دبی سرریز سیفونی به مراتب بیشتر از سرریز آزاد است. در نهایت، با دراختیارداشتن داده‌های آزمایشگاهی، یک رابطه‌ی غیرخطی برای تخمین دبی سرریز سیفونی با مشخص بودن دبی سرریز آزاد ارائه کردند.<sup>[۱۰]</sup> غفوریان و همکاران (۲۰۱۲) با قرار دادن ۱۰ عدد پیرومتر در طول مجرای مدل سرریز سیفونی، فشارهای ایجاد شده بر روی ران تختانی سرریز را اندازه‌گیری کردند و در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به شبیه‌سازی جریان برای حالت‌های مختلف، مطابق با نمونه‌های آزمایشگاهی پرداختند و دریافتند که در شرایط استقراری خروجی سرریز، عمل سیفونی شدن در تراز پایین‌تری نسبت به خروجی آزاد شروع می‌شود و سرریز عملکرد بهتری دارد.<sup>[۱۱]</sup> تدین و همکارش (۲۰۱۳) نیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی هد<sup>[۱]</sup>، مدل عددی سرریز سیفونی مذکور را بررسی کردند و دریافتند که شبیه‌سازی عددی به خوبی

جدول ۱. تنظیمات به کار رفته در نرم افزار انیسس.

غیردائم	نوع حل
آشفته	نوع جریان
$k - \epsilon$	مدل آشفتگی
اویلری - اویلری	رویکرد حل جریان دو فازی
همگن	نوع رفتار جریان دو فازی
اویلر پس رو مرتبه دوم	روش گسسته سازی ترم غیردائم
طرح مرتبه اول	روش گسسته سازی ترم جابه جایی
طرح دقت بالا	روش گسسته سازی ترم غیر دائم

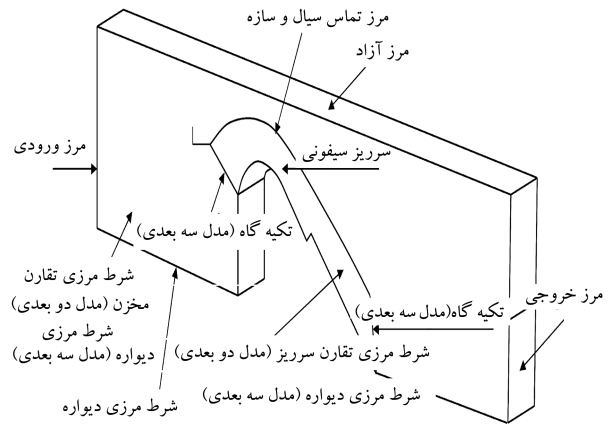
جدول ۲. تعداد المان‌های شش وجهی به کار رفته در هر یک از مدل‌های دو بُعدی.

حالت	۱	۲	۳	۴	۵
تعداد المان	۹۹۵۹	۱۱۶۴۶	۱۲۸۸۹	۱۴۴۹۸	۱۶۵۹۹



شکل ۳. شبکه بندی ناحیه محاسباتی در محیط CFX.

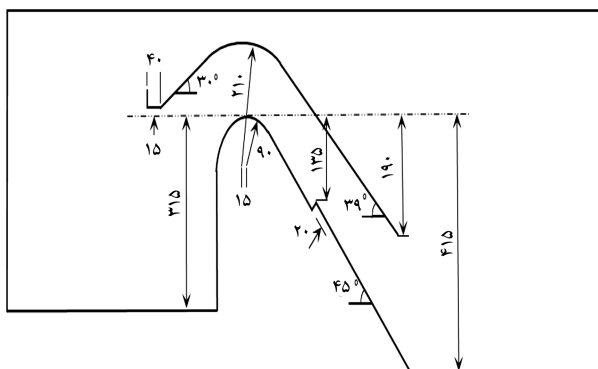
انیسس<sup>۱۵</sup> ارائه شده است. به عنوان آخرین گام از شبیه سازی سیال، باید خروجی های حل گر تعیین شوند. در پژوهش حاضر، از نتایج آزمایشگاهی برخی مراجع [۱۶، ۱۷] جهت صحت سنجی نتایج شبیه سازی عددی استفاده شده است. جهت اطمینان از نتایج به دست آمده، در این مرحله از پژوهش، سرعت ها و فشارهای حاصل در برخی از نقاط سرریز با مدل های آزمایشگاهی بررسی و مقایسه شدند. با توجه به اطلاعات موجود در زمینه ویژگی های جریان در سرریزهای سیفونی، انتظار می رفت که بیشترین تغییرات در محل هایی همچون ورودی و خروجی سرریز، ناحیه داخلی سرریز و همچنین منحرف کننده ی جریان رخ دهد. بنابراین تراکم المان ها در این مناطق افزایش داده شد. علاوه بر این، کیفیت شبکه بندی در نزدیکی دیواره ها با توجه به وجود لایه ی مرزی<sup>۱۶</sup> نیز حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، ۵ شبکه بندی مختلف در حالت دو بُعدی برای دست یابی به استقلال از شبکه استفاده شد. معیار صحت سنجی نتایج مدل عددی، مقایسه فشارهای ایجاد شده در تاج و سقف مجرای سرریز سیفونی با نتایج مدل سازی های آزمایشگاهی ارائه شده در برخی مراجع [۱۶، ۱۷] بوده است. در جدول ۲، تعداد المان های به کار رفته در هر یک از شبکه بندی های انجام شده ارائه شده است. بعد المان های استفاده شده برای شبکه بندی ها، در بیشترین حالت به طور میانگین برابر با ۱۰ میلی متر و در کمترین حالت برابر با ۵/۵ میلی متر بوده است. در شکل ۳، نمونه ی شبکه بندی ناحیه محاسباتی سیال در محیط CFX با ۱۴۴۹۸ المان مشاهده می شود که مطابق آن، تراکم المان ها در قسمت های ورودی و خروجی سرریز و همچنین داخل مجرای سرریز برای افزایش دقت حل عددی افزایش داده شده است.



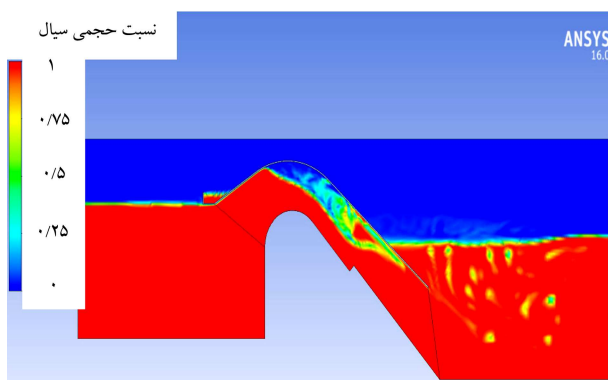
شکل ۲. هندسه و شرایط مرزی مربوط به ناحیه محاسباتی سیال و سازه در حالت های دو بُعدی و سه بُعدی.

عددی حائز اهمیت است، انتخاب مدل آشفتگی مناسب است. در پژوهش حاضر، با توجه به نتایج مطالعات پیشین، [۱۶، ۱۷] مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  استفاده شد. لازم به ذکر است که در برخی مراجع، [۱۵، ۱۷] سرریز سیفونی مورد مطالعه عیناً مشابه پژوهش حاضر بوده است. پس از مرحله ی اخیر، شرایط مرزی و اولیه تعیین شدند. در مرز ورودی، مرز آزاد، خروجی، تقارن و دیواره های مربوط به ناحیه محاسباتی سیال در مدل های دو بُعدی و سه بُعدی به ترتیب از شرایط مرزی از نوع دبی جرمی، بازو، تقارن و دیواره استفاده شده است. براساس نتایج برخی مراجع دیگر، [۱۷، ۱۸] تغییرات فشار در عرض سرریز سیفونی قابل ملاحظه نیست. بر این اساس جهت کاهش حجم محاسبات می توان مسئله را دو بُعدی فرض کرد و محاسبات سیال را در این حالت انجام داد. به عبارت دیگر، برای صفحات جلویی و پشتی در شبیه سازی عددی، می توان از شرط مرزی تقارن<sup>۱۱</sup> استفاده کرد. برای اطمینان از فرض مذکور، یک مدل سه بُعدی تهیه و نتایج آن با حل دو بُعدی مقایسه شد. تفاوت اصلی شبیه سازی های دو بُعدی و سه بُعدی در پژوهش حاضر، تعیین شرط مرزی برای صفحات جلویی و پشتی در مخزن و سرریز است. به طوری که اگر شرط مرزی برای صفحات اخیر از نوع تقارن باشد، شبیه سازی عددی دو بُعدی می شود و در این حالت، در راستای عمود بر صفحه فقط یک عدد المان قرار دارد. اما اگر در صفحات مذکور از شرط مرزی دیواره استفاده شود، شبیه سازی عددی از نوع سه بُعدی خواهد بود. در این حالت نرم افزار باید گرادیان های سرعت و فشار در راستای عمود بر صفحه را نیز محاسبه کند. لذا در این راستا باید بیش از یک المان استفاده شود، که این امر افزایش قابل ملاحظه ی تعداد المان ها و هزینه ی محاسباتی را در پی خواهد داشت. در شبیه سازی سه بُعدی، معادلات برش برای دیواره های کناری نیز حل می شود و در عرض مقطع جریان، تغییراتی در مقادیر سرعت و فشار رخ می دهد. ولی این تفاوت براساس نتایج مدل سازی آزمایشگاهی قابل توجه نیست. لذا می توان گفت دو بُعدی فرض کردن جریان در شبیه سازی ها، فرض نزدیک به واقعیت است. در ادامه، این موضوع در یک مقطع از تاج سرریز در شبیه سازی های دو بُعدی و سه بُعدی به تفصیل بررسی و نتایج آن ها ارائه شده است.

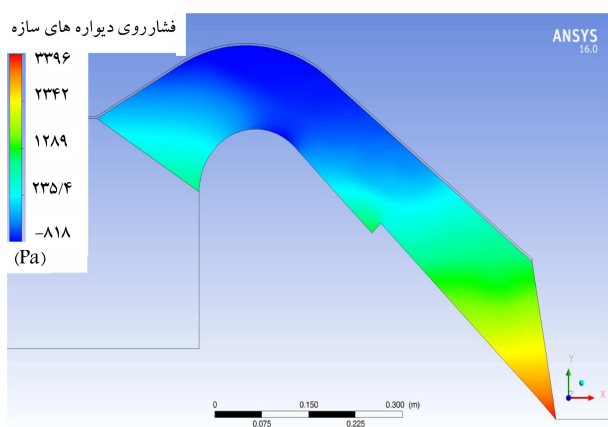
در پژوهش حاضر، به ترتیب از روش اویلر پس رو مرتبه دوم<sup>۱۲</sup>، طرح مرتبه اول<sup>۱۳</sup> و طرح دقت بالا<sup>۱۴</sup> برای گسسته سازی ترم های غیردائم، جابه جایی و نفوذ در معادلات بقاء استفاده شده است. در جدول ۱، تنظیمات انجام شده در نرم افزار



شکل ۴. ابعاد سرریز سیفونی در مدل آزمایشگاهی (ابعاد به میلی‌متر). [۵]



شکل ۵. تراز آب در فلوم آزمایشگاهی و داخل سرریز برای دبی  $9.671/s$  شبیه‌سازی عددی.



شکل ۶. کانتور فشار داخل سرریز سیفونی برای دبی  $9.671/s$  در شبیه‌سازی عددی.

سازه هستند. اما در داخل مجرای سرریز به خوبی می‌توان تغییرات فشار ناشی از ایجاد مکش، به‌خصوص در نواحی قبل و بعد از تاج و سقف سرریز را مشاهده کرد. نکته‌ی قابل توجه این است که در قسمت‌های نزدیک به تاج سرریز، تغییرات فشار بسیار زیاد است، به این معنی که در دو نقطه با فاصله‌ی حتی خیلی کم، مقادیر فشار منفی نسبت به یکدیگر تفاوت محسوسی دارند. این مطلب در مورد نقاط سقف سرریز و اطراف آن، به مراتب کمتر مشاهده می‌شود. جریان در سرریز سیفونی با توجه به مکش هوا در ورودی سرریز در بیشتر شرایط، ناپایدار است. لذا فشارهای ایجاد شده در داخل آن حتی در یک دبی ثابت در نقطه‌ی مشخص با زمان نوسان‌هایی دارد. باید توجه داشت که در مطالعات آزمایشگاهی با توجه به

همان‌طور که اشاره شد، تراکم‌المان‌ها در نزدیکی دیواره‌ها بیشتر است. طبق اصل عدم لغزش<sup>۱۷</sup> و پذیرش اینکه هر سیالی، لزجت مخصوص به خود (هر چند خیلی کم) را دارد، می‌توان گفت که در نزدیکی مرزهای جامد، تنش برشی و در نتیجه نیروی برشی وجود دارد. لذا در نزدیکی مرزهای صلب، ناحیه‌ی وجود خواهد داشت که در آن گرادبان سرعت قابل توجه است. وجود چنین لایه‌ی با خصوصیات ذکر شده می‌تواند پروفیل سرعت جریان را تحت تأثیر قرار دهد. لذا باید در حل مسائل تغییرات و گرادبان‌ها در ناحیه‌ی مذکور به‌درستی محاسبه شود. در پژوهش حاضر همان‌طور که اشاره شد، از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استفاده شده است. در نرم‌افزار CFX به این مطلب اشاره شده است که در صورت استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ، مقدار  $y^+$  باید بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد تا بتوان گفت حل‌گر به درستی لایه‌ی مرزی و گرادبان‌های موجود در آن را شناسایی و محاسبه کرده است. دست‌یابی به این شرط در سرریز سیفونی با توجه به تفاوت مقادیر سرعت در قسمت‌های مختلف، با در نظر داشتن متفاوت بودن سرعت جریان در دبی‌ها و رژیم‌های مختلف جریان در قسمت‌های مختلف سرریز سیفونی کار دشواری است. برای دست‌یابی به این مطلوب لازم بود تا در نزدیکی مرزهای جداره در نواحی داخلی سرریز، ورودی و خروجی از سایز مش مناسب استفاده شود، تا مقادیر  $y^+$  موردنظر در خروجی‌های حل‌گر ملاحظه شوند که این کار نیازمند انجام سعی و خطاهای بسیار بود. در مورد طریقه‌ی انتخاب تعداد مش لازم جهت انجام شبیه‌سازی در بخش‌های بعدی بحث شده است.

### ۳. نتایج و بحث

برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی در پژوهش حاضر از اطلاعات آزمایشگاهی برخی مراجع<sup>[۱۶,۱۷]</sup> استفاده شده است. در بخش حاضر، در مدل عددی دبی  $9.671/s$  به‌عنوان شرط مرزی در ورودی اعمال و فرایند شبیه‌سازی جریان در سرریز سیفونی انجام شده است. در نهایت پس از گذشت مدت زمان لازم، شرایط جریان با توجه به ثابت بودن شرایط در مرزهای ورودی و خروجی به پایداری موردنظر رسید. منظور از شرایط پایدار، عدم تغییر تراز آب در مخزن بالادست، داخل سرریز، فشارهای ایجاد شده در طول سازه، و سایر است. در شکل ۴، هندسه‌ی سرریز سیفونی شبیه‌سازی‌های عددی مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۵ و ۶ نیز به ترتیب تراز آب در مخزن و فشارهای ایجاد شده در داخل سرریز سیفونی پس از رسیدن به پایداری نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مدت زمان لازم برای رسیدن شرایط پایدار هیدرولیکی اشاره شده، تقریباً ۴۰ ثانیه بوده است. منظور از شرایط پایدار هیدرولیکی، برقراری ثبات نسبی در تراز آب بالادست و پایین‌دست سرریز و همچنین دبی ورودی به سرریز و خروجی از آن و به تبع آن‌ها سایر موارد از جمله فشارها و سرعت‌هاست. مقادیر باقیمانده برای معادله‌های سرعت و فشار نیز بیشینه‌ی  $10^{-4}$  بوده است. مسئله‌ی ذکر شده به نوبه‌ی خود برای هر یک از شبکه‌بندی‌های موردنظر بسته به تعداد المان‌های استفاده شده در مدل عددی نیازمند حدود ۲۰ تا ۳۰ ساعت زمان محاسبات توسط رایانه بوده است.

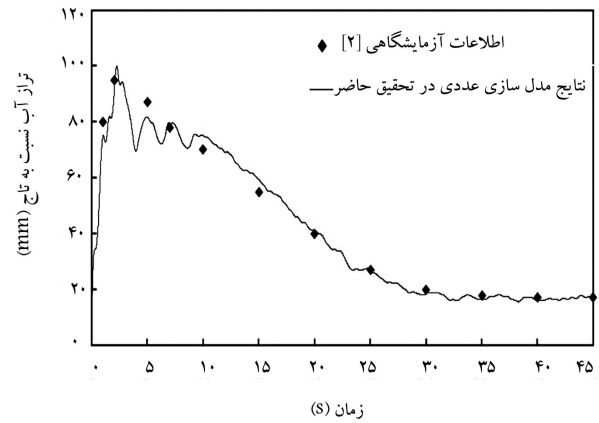
مطابق شکل ۵، پس از برقراری شرایط تقریباً پایدار هیدرولیکی، تراز آب به لبه‌ی ورودی مجرا رسیده است. با نگاهی جزئی‌تر، مکش هوا در قسمت لبه‌ی ورودی و تخلیه‌ی هوا در قسمت پایین‌دست سرریز نیز قابل مشاهده است که این امر در واقع نشانگر برقراری جریان با آب سفید (جریان کف‌آلود شامل آب و هوا) است. در قسمت‌های ورودی و خروجی، فشارهای ایجاد شده داخل سرریز به علت حضور فشار استاتیکی آب، بیشتر تحت تأثیر تراز آب در بالادست و پایین‌دست

دبی ورودی به داخل مخزن تطبیق می‌دهد و تراز سطح آب رفته‌رفته به تراز لبه‌ی ورودی یا در واقع ویژگی بارز سرریز سیفونی، یعنی عبور دبی طرح با افزایش جزئی تراز سطح آب در مخزن می‌رسد.

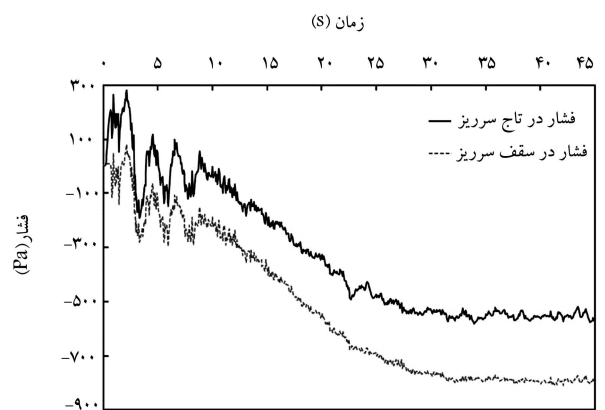
در سرریز سیفونی مدل شده، یک فاصله‌ی ۱۵ میلی‌متری بین تاج سرریز و لبه‌ی ورودی در ران فوقانی وجود دارد. وجود همین فاصله‌ی کم در طراحی‌ها به دلیل ایجاد امکان ورود هوای کافی و عدم قطع و وصل شدن جریان در اثر افت تراز آب به تراز کمی کمتر از تراز تاج، بسیار مهم است. در نوشتارهای مختلف، [۶] توصیه‌هایی برای تعیین فاصله‌ی مناسب بین تاج سرریز و لبه‌ی ورودی ارائه شده است. لازم به ذکر است که با ایجاد شرایط هوادهی سرریز، فشارهای ایجاد شده در داخل مجرا همچنان ممکن است، منفی شوند؛ با این تفاوت که از افت ناگهانی و شدید فشار در داخل مجرا که می‌تواند منجر به قطع و وصل عمل سیفونی شود، جلوگیری می‌شود. با شروع شبیه‌سازی، تراز آب به سرعت افزایش می‌یابد و پس از گذشت مدت زمان کمی، تراز سطح آب رو به کاهش می‌رود. در محدوده‌ی زمانی ۵ تا ۱۰ ثانیه، تراز آب در فلوم نوسان‌هایی دارد که به علت موج برگشتی حاصل از برخورد آب ورودی به فلوم با ران فوقانی هستند که با گذشت زمان موج مذکور به سرعت مستهلک می‌شود و تراز آب مجدداً شروع به کاهش می‌کند. تراز آب در اثر فشارهای منفی ایجادشده در داخل مجرای سیفون همچنان کاهش خواهد یافت، تا زمانی که تراز آب به لبه‌ی ورودی سرریز برسد. پس از آن طبق شکل ۷، تراز آب با دامنه‌ی نوسانی محدود حول یک حد ثابت نوسان می‌کند. در این حالت دو اتفاق در حال وقوع است: ۱. از یک سو، در قسمت لبه‌ی ورودی، هوا به همراه جریان آب به داخل سرریز مکیده می‌شود. ۲. از سوی دیگر، در خروجی سرریز، بسته‌هایی از هوا به سمت پایین دست سازه انتقال می‌یابند. در این وضعیت تقریباً یک شرایط هیدرولیکی پایدار برقرار خواهد شد. مطابق با شکل ۸، فشارهای ایجاد شده در سقف سرریز همواره کمتر از تاج سرریز است، هر چند این حالت همواره برقرار نیست و با افزایش دبی در مرز ورودی، روند اخیر برعکس خواهد شد.

پیش از بیان ادامه‌ی روند مطالعه‌ی حاضر، به چگونگی انتخاب تعداد مش مناسب جهت شبیه‌سازی عددی پرداخته شده است. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، از ۵ مش بندی مختلف جهت شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است که همگی قادر بودند جریان در داخل سرریز را شبیه‌سازی کنند و با دقت قابل قبولی شرایط جریان در سرریز سیفونی و علی‌الخصوص فشارهای ایجاد شده در قسمت‌های مختلف آن از جمله تاج را ارائه کنند. به‌عنوان مثال، در زمان برقراری دبی  $9/671/s$  در داخل سرریز، متوسط فشار ایجاد شده در مدل آزمایشگاهی برابر با ۵۶۵ پاسکال است. در شکل ۹، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در ثانیه‌های پایانی شبیه‌سازی عددی، که در واقع شرایط پایدار هیدرولیکی برقرار شده، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کلیه‌ی مش‌بندی‌های در نظر گرفته شده قادر بوده‌اند فشار ایجاد شده در تاج سرریز را به خوبی تخمین بزنند. لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن کمیته‌ی تعداد مش گفته شده، مواردی از جمله تراز آب در مخزن، داخل سرریز، پایاب و سایر قابل شناسایی نخواهد بود و برای کمتر از تعداد مش مذکور، حل عددی واگرا می‌شود. از سوی دیگر، شبیه‌سازی با تعداد مش بیشتر از  $14000$  عدد، هزینه‌ی محاسباتی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. لذا از تعداد مش ۱۲۸۸۹ جهت انجام سایر شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

در بخش کنونی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای ۴ دبی  $9/67, 5/61, 13/5$  و  $19/77$  لیتر بر ثانیه ارائه شده است. دلیل انتخاب دبی‌های مذکور این است که فشارهای ارائه شده در تاج و سقف سرریز در مرجع [۱۲]، مربوط به آن‌هاست تا بتوان نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی را با دبی‌ها مقایسه کرد. همانند بخش

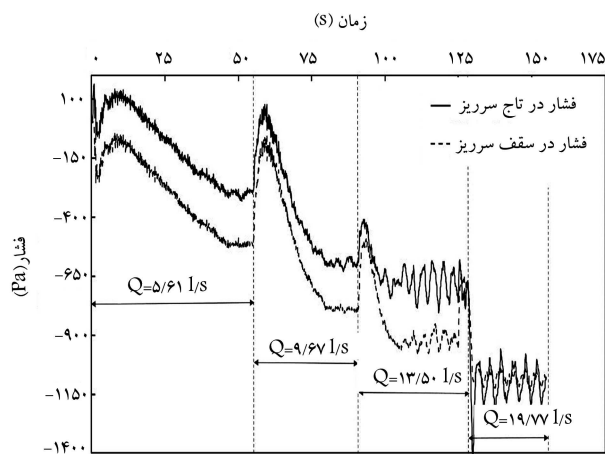


شکل ۷. تغییرات تراز آب در فلوم آزمایشگاهی نسبت به تاج سرریز سیفونی برای دبی  $9/671/s$  در شبیه‌سازی عددی.



شکل ۸. تغییرات فشار در تاج و سقف سرریز سیفونی برای دبی  $9/671/s$  در شبیه‌سازی عددی.

محدودیت‌های وسایل اندازه‌گیری، امکان قرائت فشار برای چنین جریان‌هایی وجود ندارد. در شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب نمودارهای تغییرات تراز آب در فلوم آزمایشگاهی نسبت به تاج سرریز و نوسان‌های فشار در تاج و سقف مجرای سیفون از ابتدای ورود دبی  $9/671/s$  به مخزن تا زمان رسیدن به شرایط تقریباً پایدار هیدرولیکی نشان داده شده است. نوسان‌های فشار از دو منظر قابل بررسی هستند و تغییرات آن را می‌توان ناشی از دو عامل دانست: عامل اول و مهم‌تر شکل‌گیری جریان دوفازی درون مجرا و مکانیزم پیچیده‌ی جریان در داخل سرریز سیفونی است، که حتی زمانی که شرایط پایدار هیدرولیکی در داخل سرریز برقرار است، همچنان نوسان‌های فشار در نقاط مختلف سرریز در بازه‌ی مشخص قابل مشاهده هستند. عامل دوم که بیشترین تأثیر را در ثانیه‌های ابتدایی شبیه‌سازی نشان می‌دهد، حل عددی مسئله به روش ناپایدار است. با توجه به اینکه تاکنون در بررسی‌های آزمایشگاهی، فشارهای ایجاد شده در نقاط مختلف سرریز با زمان بررسی نشده‌اند و مقادیر فشار فقط در زمان برقراری شرایط پایدار هیدرولیکی اندازه‌گیری و ارائه شده است، نمی‌توان به صورت مجزا، سهم هر یک از عوامل مذکور را در شبیه‌سازی عددی تعیین کرد. مطابق با شکل ۷، در ابتدای شبیه‌سازی، نوسان‌های تراز سطح آب در مخزن زیاد است. علت آن است که در شروع شبیه‌سازی، یک تراز اولیه برای مخزن در نظر گرفته شده است و هنگامی که شبیه‌سازی شروع می‌شود، دبی قابل توجهی به داخل مخزن وارد می‌شود و تراز آب مخزن به‌طور قابل توجهی بالا می‌رود. با گذشت زمان، سرریز سیفونی خود را با



شکل ۱۱. نوسان‌های فشار در تاج و سقف سرریز در دبی‌های مختلف در شبیه‌سازی عددی برای مدل آزمایشگاهی [۱۶].

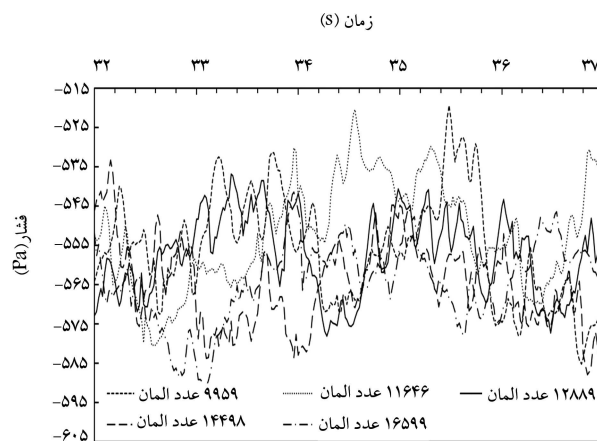
جدول ۳. مقایسه‌ی فشارهای ایجاد شده در مدل آزمایشگاهی [۱۶] و شبیه‌سازی پژوهش حاضر برای تاج سرریز.

دبی (l/s)	کمینه	بیشینه	میانگین حل عددی	مدل آزمایشگاهی
۵٫۶۱	-۳۳۳	-۲۶۹	-۲۹۹	-۳۰۲
۹٫۶۷	-۶۳۲	-۵۶۳	-۵۹۳	-۵۷۵
۱۳٫۵	-۸۰۵	-۵۷۲	-۶۸۳	-۷۱۴
۱۹٫۷۷	-۱۱۸۸	-۹۶۸	-۱۰۹۳	-۱۲۲۰

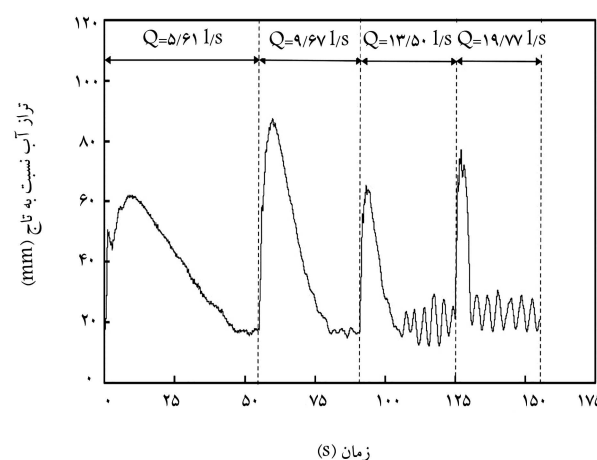
دبی‌های ۱۳٫۵ و ۱۹٫۷۷ لیتر بر ثانیه، نوسان‌های فشار بیشتر از سایر دبی‌هاست. نکته‌ی قابل توجه این است که در ۳ دبی اول، مقادیر فشار در سقف مجرای سرریز همواره کمتر از فشار در تاج سرریز بوده است. اما در دبی ۱۹٫۷۷ l/s، روند ذکر شده تغییر یافته است. به عبارت دیگر، زمانی که هوای محبوس شده در سقف مجرا تخلیه می‌شود، مقادیر فشار در تاج سرریز به مراتب کمتر از سقف سرریز خواهد بود. مشاهده می‌شود که نوسان‌های فشار پس از ایجاد پایداری در شرایط هیدرولیکی همچنان وجود دارند و لذا به خوبی نمی‌توان از بین آن‌ها یک عدد را انتخاب و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرد. علت این امر را می‌توان عدم تعیین مقدار صحیح تراز آب در پایین‌دست سرریز عنوان کرد. در جدول ۳، مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فشارها در تاج و سقف سرریز در شبیه‌سازی عددی و همچنین مقادیر به‌دست آمده در مدل آزمایشگاهی مرجع [۱۶] ارائه شده است. در مراجع مورد استفاده، به استغراق پایین‌دست اشاره شده است، ولی میزان دقیق آن مشخص نیست. این مطلب می‌تواند در مقادیر فشار در تاج سرریز تأثیرگذار باشد. [۱۱۵]

به نحوی که با افزایش عمق استغراق در پایین‌دست سازه، فشارها در طول تاج تعدیل می‌شوند. به این معنی که با افزایش عمق استغراق کانال پایین‌دست، از افزایش بیش از حد فشارهای منفی داخل سرریز جلوگیری می‌شود. این مطلب به نوبه‌ی خود باعث کاهش احتمال وقوع پدیده‌ی کاویتاسیون در تاج سرریز و ایجاد شرایط پایدارتری برای سرریز سیفونی می‌شود. اما از سوی دیگر، افزایش عمق استغراق موجب کاهش دبی بیشینه‌ی سرریز می‌شود. [۱۱۵]

جهت ایجاد مدل عددی در حالت سه‌بعدی، شرط مرزی برای دیواره‌های جلویی و پشتی در فلووم و سرریز به دیواره تغییر یافت (شکل ۲). در این حالت، حل‌گر سیالاتی‌گردان‌ها را در راستای عمق جریان در نظر می‌گیرد و امکان مقایسه‌ی خصوصیات جریان در راستای عمق وجود خواهد داشت. در این شرایط باید در



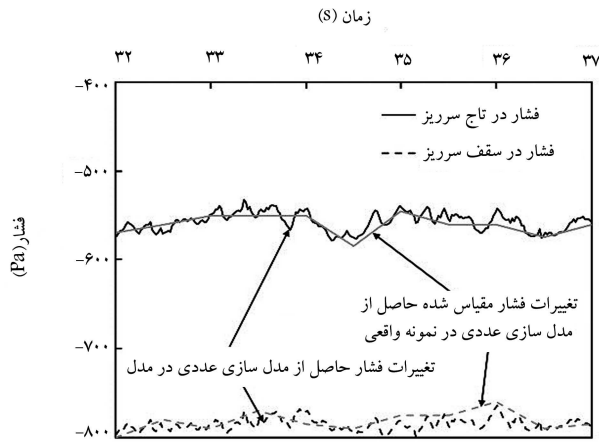
شکل ۹. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در ثانیه‌های پایانی برای مش‌بندی‌های مختلف.



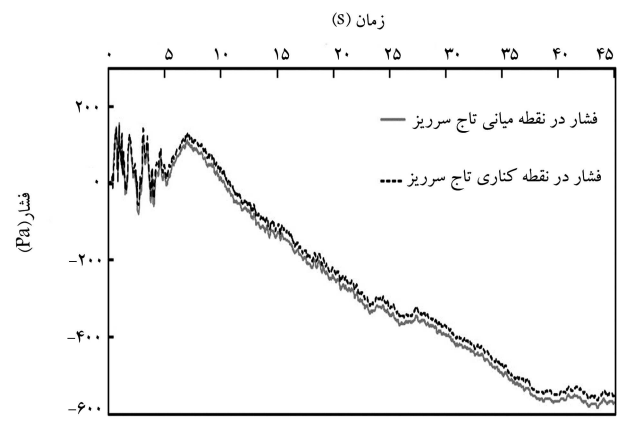
شکل ۱۰. تغییرات تراز آب در فلووم آزمایشگاهی نسبت به تاج سرریز برای دبی‌های مختلف در شبیه‌سازی عددی.

قبل، در هر مرحله، شبیه‌سازی نیازمند مدت زمان کافی برای برقراری شرایط پایدار هیدرولیکی اعم از رسیدن تراز آب در مخزن به نزدیکی تراز تاج و ثبات نسبی در فشارهای ایجاد شده در طول سرریز و سایر است. در شکل ۱۰، نمودار تغییر تراز آب در هر یک از دبی‌های ذکر شده ارائه شده است. در هر گام با افزایش دبی در مرز ورودی، تراز آب افزایش می‌یابد و پس از گذشت مدت زمان کافی، که در واقع مدت زمانی است که سرریز سیفونی لازم دارد تا بتواند عملکرد خود را با شرایط در مرز ورودی و خروجی هماهنگ کند، تراز آب به تراز نزدیک لبه‌ی ورودی باز می‌گردد. این موضوع در واقع یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد سرریز سیفونی است که می‌تواند در یک دامنه‌ی هد محدود، دامنه‌ی وسیعی از دبی‌های مختلف را از خود عبور دهد. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در دبی‌های ۱۳٫۵ و ۱۹٫۷۷ لیتر بر ثانیه، نسبت به دبی‌های ۵٫۶۱ و ۹٫۶۷ لیتر بر ثانیه، کمی نوسان‌های تراز آب پس از رسیدن به تعادل نسبی، بیشتر است. علت این امر می‌تواند ناشی از عدم هواگیری کافی سرریز در ورودی باشد. برای رفع مشکل اخیر می‌توان چند روزه‌ی هوا در قسمت کلاهدک سرریز تعبیه کرد و یا طول قسمت لبه‌ی ورودی را افزایش داد.

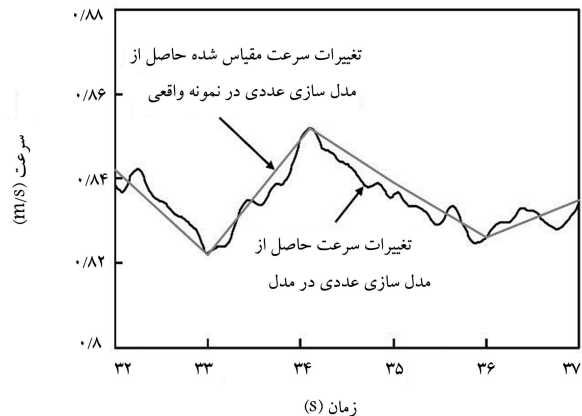
در شکل ۱۱، نوسان‌های فشار در تاج و سقف سرریز برای دبی‌های مورد بررسی با زمان نشان داده شده است. مشابه شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که در



شکل ۱۴. فشار در تاج و سقف سرریز در شبیه‌سازی عددی برای مدل آزمایشگاهی و نمونه‌ی واقعی در حالت مقیاس شده.



شکل ۱۲. فشار دو نقطه‌ی متفاوت در راستای عرض تاج سرریز در شبیه‌سازی عددی برای مدل آزمایشگاهی [۱۶].



شکل ۱۳. سرعت جریان در فاصله‌ی ۵۰ میلی‌متری از تاج سرریز در شبیه‌سازی عددی برای مدل آزمایشگاهی و در فاصله‌ی ۵۰ میلی‌متری از تاج سرریز در شبیه‌سازی عددی برای نمونه‌ی واقعی.

هیدرولیکی و همچنین مقادیر فشارها در مدل اصلی، به ترتیب  $\sqrt{10}$  و  $10$  برابر مقادیر مشابه در مدل آزمایشگاهی باشد. در شکل ۱۴، فشارهای ایجاد شده در تاج و سقف سرریز برای مدل‌های آزمایشگاهی و اصلی در شبیه‌سازی عددی مشاهده می‌شود که مطابق انتظار، فشارها در مدل اصلی تقریباً  $10$  برابر مدل آزمایشگاهی است [۱۶]. به همین ترتیب مدت زمان لازم برای شبیه‌سازی در سرریز واقعی برای رسیدن به شرایط طبیعی و برقراری شرایط پایدار هیدرولیکی، برابر مدت زمان مورد نیاز در مدل آزمایشگاهی است. با دقت در شکل‌ها این موضوع قابل تأمل است که مقادیر به دست آمده از حل عددی در مدل اصلی، دقیقاً بر مقادیر مشابه در مدل آزمایشگاهی منطبق نیستند. این امر ناشی از این است که در سرریز سیفونی با توجه به نوع جریان‌های ایجاد شده نمی‌توان گفت که یگانه عدد بی‌بعد مؤثر، عدد فرود است. زیرا اعداد بی‌بعد دیگری مانند عدد وبر و رینولدز نیز در این امر تأثیرگذار خواهند بود [۴]. لذا کاملاً طبیعی است که مقادیر به دست آمده در مدل اصلی (سرعت، فشار و سایر) براساس مقیاس‌های تشابه فرودی با مقادیر مشابه در مدل آزمایشگاهی هم‌خوانی کامل نداشته باشند.

همان‌طور که اشاره شد، جهت شبیه‌سازی جریان در سرریز سیفونی از مدل فرودی استفاده می‌شود. حال این سؤال مطرح است که در چه شرایطی می‌توان از مدل فرودی برای شبیه‌سازی سرریز سیفونی استفاده کرد و چه محدودیت‌هایی دارد. براساس مرجع [۴] از جمله سایر پارامترهای بی‌بعد تأثیرگذار در مدل‌سازی سرریز سیفونی، عدد رینولدز است. به نظر می‌رسد که پارامتر عدد رینولدز هنگامی که جریان در داخل سرریز به صورت پُر است، در مدل‌سازی تأثیرگذار خواهد بود. اما در مدل‌سازی آزمایشگاهی، همواره این امکان وجود ندارد تا بتوان به‌طور هم‌زمان از چند عدد بی‌بعد جهت مدل‌سازی استفاده کرد. هد (۱۹۷۵) [۴] در نوشتار خود بیان می‌کند که اگر عدد رینولدز جریان از مقداری برابر با حاصل ضرب ضریب دبی سرریز در مقدار  $2 \times 10^5$  بیشتر باشد، می‌توان از تأثیر عدد رینولدز در مدل‌سازی سرریز سیفونی صرف‌نظر کرد و مدل‌سازی را فقط براساس تشابه فرودی انجام داد. براساس نظر پژوهشگر، جهت محاسبه‌ی عدد رینولدز در سرریز سیفونی باید از مشخصات جریان در گلوگاه سرریز استفاده شود. به عبارت دیگر، عدد رینولدز مطابق رابطه‌ی ۱ خواهد بود:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

که در آن،  $V$ ،  $D$  و  $\nu$  به ترتیب سرعت میانگین سیال در گلوگاه، ارتفاع گلوگاه

راستای عمق، برخلاف مدل‌های دو‌بعدی، از چندین المان محاسباتی استفاده شود. انجام این کار به نوبه‌ی خود تعداد المان‌های شبکه‌ی محاسباتی و در نتیجه مدت زمان شبیه‌سازی را به شدت افزایش خواهد داد. سرریز سیفونی استفاده شده در مدل آزمایشگاهی، عرض  $152/5$  میلی‌متر در تمامی طول مجرا دارد. جهت بررسی تأثیر میزان تفاوت مقادیر فشار در راستای عرض سرریز، دو نقطه‌ی متفاوت در تاج سرریز در نظر گرفته شدند. نقطه‌ی اول، دقیقاً در مرکز مجرا و نقطه‌ی دوم، در فاصله‌ی  $10$  میلی‌متری از تاج سرریز قرار داشتند. نتایج حاصل از حل عددی در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مقادیر به دست آمده برای فشار در نقاط مذکور، تفاوت معناداری وجود ندارد. لذا می‌توان گفت فرض استفاده شده در بخش‌های پیشین (دو‌بعدی بودن جریان در سرریز سیفونی)، فرض درستی است و نتایج حاصل قابل اطمینان هستند.

در شکل ۱۳، سرعت جریان در فاصله‌های  $50$  و  $500$  میلی‌متری از تاج سرریز در مدل آزمایشگاهی و اصلی حاصل شبیه‌سازی عددی، پس از رسیدن به پایداری نسبی جریان نشان داده شده است. سرعت‌های به دست آمده در مدل اصلی با ضریب  $\sqrt{10}$  براساس معیاری فرودی مقیاس شده‌اند. مشاهده می‌شود که نتایج سازگاری قابل قبولی دارند.

براساس شبیه‌سازی فرودی انتظار می‌رود، زمان لازم جهت برقراری شرایط پایدار

دوفازی، و جریان با آب سیاه را شبیه‌سازی کرد. لذا در مطالعات آتی این امکان وجود خواهد داشت تا بتوان با ایجاد تغییر در هندسه و شرایط جریان از قبیل شرایط مرزی و شرایط اولیه، سایر خصوصیات جریان در سرریز سیفونی را مطالعه کرد. بررسی نتایج نشان داد که افزایش عمق استغراق پایین دست باعث کاهش بیشینه‌ی مقادیر فشارهای منفی ایجاد شده در مجرای سرریز می‌شود؛ و از سوی دیگر، دبی بیشینه‌ی سرریز کاهش پیدا می‌کند. میزان نوسان‌های فشار در یک دبی مشخص در نقاط مختلف سرریز برای زمانی که جریان داخل مجرای سرریز در حالت دوفازی است، به مراتب بیشتر از زمانی است که جریان زیر اتمسفر داخل سرریز برقرار است. تا زمانی که جریان زیر اتمسفر داخل سرریز برقرار است، فشارهای منفی ایجاد شده در سقف سرریز همواره بیشتر از تاج سرریز است. با افزایش دبی ورودی به داخل مخزن و تبدیل جریان از حالت زیر اتمسفر به جریان دوفازی، بیشینه‌ی فشارهای منفی داخل سرریز، در نواحی اطراف تاج سرریز رخ می‌دهند. بیشترین نوسان‌های فشار که می‌توانند باعث ارتعاش سازه‌ی سرریز شوند، در قسمت‌های بازوی بالادست و گلوگاه سرریز ایجاد می‌شوند. عموماً در شرایطی که در پایین دست سازه شرایط استغراق برقرار شود، فشارهای ایجاد شده در بالادست و پایین دست سازه در اثر تغییرات تراز سطح آب، تغییر می‌کنند. اما در داخل سازه‌ی سرریز و به طور خاص گلوگاه آن، نوسان‌های فشار ناشی از پدیده‌ی سیفونی شدن است و با تغییر دبی ورودی به سرریز به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

و لزجت سینماتیکی هستند. در سرریز سیفونی استفاده شده در پژوهش حاضر، ضریب دبی جریان تقریباً حدود  $0.78$  بوده است.<sup>[2]</sup> با ضرب این عدد در مقدار  $10^5 \times 2$ ، عدد  $156000$  به دست می‌آید. لذا باید در مدل آزمایشگاهی عدد رینولدز جریان بیش از این مقدار باشد تا بتوان گفت مدل آزمایشگاهی استفاده شده در پژوهش حاضر معتبر است. بر این اساس در شبیه‌سازی عددی حاضر، در شرایطی که جریان در داخل سرریز به صورت جریان لوله‌یی است و  $V_{min} = 1.54 \text{ m/s}$ ،  $D_{min} = 0.12 \text{ m}$ ،  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  عدد رینولدز دست کم برابر  $184800$  خواهد شد. مشاهده می‌شود که عدد رینولدز جریان در مدل آزمایشگاهی از مقدار ارائه شده توسط هد، بیشتر است.<sup>[2]</sup> بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام شده در پژوهش حاضر براساس معیار فرودی، مناسب بوده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که شبیه‌سازی عددی در پژوهش حاضر به خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان در سرریز سیفونی بوده است، به طوری که توسط آن می‌توان انواع رژیم‌های جریان در سرریز سیفونی، شامل: جریان زیر اتمسفر،

#### پانویس‌ها

1. Spelga dam
2. Eyebrook dam
3. Prettyjohns
4. Brent reservoir
5. Houichi
6. Petaccia
7. Bric Zerbino dam
8. Prasanna
9. Autocad
10. Eulerian-Eulerian
11. symmetry
12. second order backward euler
13. first order scheme
14. high resolution scheme
15. Ansis
16. boundary layer
17. No-slip condition

#### منابع (References)

1. Khatsuria, R.M. "Hydraulics of spillways and energy dissipators", CRC Press (2004).
2. Head, C.R. "Low-head air-regulated siphons", *Journal of the Hydraulic Division*, **101**(3), pp. 329-345 (1975).
3. Ackers, J.C., Binnie, B. and Veatch, "Early siphon spillways", *Proceedings of the Biennial Conference of the BDS*, pp. 54-63 (2000).
4. Irvine, D.A. "The design and modelling of air-regulated siphon spillway", *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, Part 2, **61**(2), pp. 383-400 (1976).
5. Ali, K.H.M. and Pateman, D. "Theoretical and experimental investigation of air-regulated siphons", *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, Part 2, **69**(4), pp. 111-138 (1980).
6. Irvine, D.A. and Oliver, G.C.S. "The full-scale behavior of air-regulated siphon spillway", *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, Part 2, **69**(3), pp 687-706 (1980).
7. Prettyjohns, R.C. and Markland, E. "Air-regulated siphon with novel arrangement for air admission", *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, Part 2, **87**(1), pp. 57-71 (1989).
8. Babaeyan-koopaei, k., Valentine, E.M. and Irvine, D.A. "Case study on Hydraulic performance of Brent reservoir siphon spillway", *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**(6), pp. 562-567 (2002).
9. Houichi, L., Ibrahim, G. and Achour, B. "Experiments for the discharge capacity of the siphon spillway having the creager-ofitserov profile", *International Journal of Fluid Mechanics Research*, **33**(5), pp.395-406 (2006).
10. Houichi, L., Ibrahim, G. and Achour, B. "Experimental comparative study of siphon spillway and over-flow spillway", *Courrier du Savoir*, **9**, pp. 95-100 (2009).



11. Ghafourian, A. and Adlan, M.N. "Discharge coefficient in siphon spillway with different cross sections", *World Applied Sciences Journal*, **17**(2), pp. 163-167 (2012).
12. Tadayon, R. and Ramamurthy, A.S. "Discharge coefficient of siphon spillway", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **139**(3), pp. 267-270 (2013).
13. Petaccia, G. and Fenocchi, A. "Experimental assessment of the stage-discharge relationship of the heyn siphons of bric zerbino dam", *Flow Measurement and Instrumentation*, **41**, pp. 36-40 (2015).
14. Prasanna, S.V.S.N.D.L. and Suresh, K.N. "Simulation of flows over an air-regulated siphon spillway", *Journal of Mechanical and Engineering*, **15**(4), Ver. V, pp. 19-25 (2018).
15. Pakgar, F., Daneshfaraz, R. and Rezazade Judi. A. "Numerical simulation of flow on a siphon spillway and investigation of the effect of a bottom/outlet angle on hydraulic parameters", *Sigma J. Eng. and Nat. Sci.*, **34**(2), pp. 279-290 (2016).
16. Ervine, D.A. "The design and modelling of air-regulated siphon spillways", *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, **63**(2), pp. 233-250 (1977).