

# بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان فوق‌بحرانی در شیب‌شکن قائم با کانال دایره‌یی در بالادست

محمد فرشته‌پور\* (پسادکتری)

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

محمدرضا چمنی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)  
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۲/۴، ص. ۱۰۹-۱۰۱

در شبکه‌های زیرسطحی، مقطع کانال بالادست شیب‌شکن‌ها عموماً دایره‌یی و جریان فوق‌بحرانی است که خصوصیات جریان در آن با شیب‌شکن‌های معمول که مقطع بالادست و پایین‌دست آنها مستطیلی (شیب‌شکن قائم مستطیلی) و جریان زیربحرانی در آنها برقرار است، تفاوت عمده‌یی دارد. ترازف از این تحقیق مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی شیب‌شکن قائم با کانال دایره‌یی در بالادست و کانال مستطیلی در پایین‌دست است. برای دستیابی به این ترازف، مدل آزمایشگاهی با ارتفاع ۰/۳۴۵ متر ساخته شد. در مدل آزمایشگاهی، قطر داخلی لوله‌ی بالادست ۰/۱۹ متر و عرض کانال مستطیلی پایین‌دست ۰/۴ متر است. در لوله‌ی بالادست، از جعبه‌جت برای تغییر عدد فرود و توسعه‌یافتگی جریان استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM جریان نیز به صورت عددی شبیه‌سازی شد. عمق لبه‌ی شیب‌شکن، عمق گرداب، عمق پایین‌دست و میزان اتلاف انرژی در جریان فوق‌بحرانی با اعداد فرود ۱ تا ۳/۸ و آب‌دهی نسبی ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ بررسی شد. نتایج نشان داد عمق گرداب شیب‌شکن در مدل حاضر کمتر از عمق گرداب در شیب‌شکن قائم مستطیلی است. عمق گرداب و عمق پایین‌دست با افزایش آب‌دهی نسبی افزایش می‌یابند. بازدهی شیب‌شکن در اتلاف انرژی ورودی بین ۵۰ تا ۷۵ درصد برآورد شد که افت تراز انرژی نسبی آن حدود ۵۰ درصد بیشتر از شیب‌شکن قائم مستطیلی است. نتایج شبیه‌سازی عددی نیز تطابق خوبی با مشاهدات آزمایشگاهی داشت و می‌توان برای بهینه‌سازی طرح نهایی با اطمینان از آن استفاده کرد.

واژگان کلیدی: شیب‌شکن قائم، جریان فوق‌بحرانی، سازه‌ی خروجی لوله، افت تراز انرژی، نرم‌افزار OpenFOAM.

## ۱. مقدمه

در سیستم‌های زهکشی رواناب شهری، کانال‌های آب باید دارای شیب کمی باشند تا جریان با سرعتی محدود حرکت کند یا اصولاً جریان زیربحرانی باشد. به علت وجود عوارض طبیعی در مسیر کانال، ممکن است شیب طبیعی زمین در قسمت‌هایی از مسیر، زیاد و تندتر از شیب مجاز کانال باشد که باعث افزایش مخارج خاک‌برداری و خاک‌ریزی می‌شود. در این مواقع از شیب‌شکن<sup>۱</sup> قائم استفاده می‌کنند. به‌طور کلی، شیب‌شکن، ساده‌ترین نوع از سازه‌های هیدرولیکی است که برای اتلاف انرژی جریان در شبکه‌های آبیاری، آبراهه‌های فرسایش‌پذیر، سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه‌ی آب

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۹/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۲/۱۱، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۲۱

DOI:10.24200/J30.2020.54820.2678

fereshtehpour@um.ac.ir  
mchamani@cc.iut.ac.ir

کانال پایین دست قابل فرسایش باشد، دچار آب شستگی نشود.<sup>[۴۳]</sup> در سازه های خروجی لوله گاهی از دیواره ی آویزان برای استهلاک بیشتر انرژی استفاده می شود.<sup>[۵]</sup> بیشتر تحقیقات گذشته درباره ی شیب شکن معطوف به جریان زیر بحرانی در بالادست بوده است و مطالعات کمی در زمینه ی جریان فوق بحرانی بالادست صورت پذیرفته است. در این مطالعات عمدتاً به شیب شکن هایی با مقطع مستطیلی در پایین دست و بالادست (شیب شکن قائم مستطیلی) پرداخته شده است. چانسون و تامیز (۱۹۹۸) با بررسی آزمایشگاهی جریان فوق بحرانی بر روی شیب شکن های قائم مستطیلی، الگوی جریان آب و هوا در پایین دست را ارزیابی کردند.<sup>[۶]</sup> آنها آزمایش ها را در کانالی با عرض ۰/۵ متر و ارتفاع شیب شکن ۰/۱۳۱ متر که در فاصله ی ۲/۴ متری از نازل جت قرار داشت، انجام دادند و مشا ترازه کردند که برخورد جت ریزی به کف کانال پایین دست، باعث پخش شدن قابل توجه آب و تغییر شکل جت می شود. این تغییر خطوط جریان باعث انتشار امواج شوک<sup>۳</sup> مورب می شود که در پایین دست به هم برخورد می کنند. آنها با برازش داده های آزمایشگاهی مربوط به طول شیب شکن، محل ارتفاع بیشینه ی امواج ایستا و محل برخورد امواج شوک مورب، روابطی بر پایه ی عدد فرود پایین دست ارائه کردند. چمنی و بیرامی (۲۰۰۲) با ارائه ی روشی تحلیلی، سعی در بیان خصوصیات شیب شکن قائم مستطیلی در جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی کردند.<sup>[۷]</sup> آنها آزمایش ها را در کانالی به عرض ۰/۴ متر، طول ۹ متر و ارتفاع ۰/۷ متر و با دو ارتفاع شیب شکن ۰/۲ و ۰/۴ متر انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند، عمق نسبی گرداب در جریان فوق بحرانی با افزایش آب دهی افزایش و تلفات انرژی در جریان فوق بحرانی با افزایش عدد فرود کاهش می یابد. نتایج آزمایشگاهی مقادیر بیشتری نسبت به نتایج تحلیلی نشان می دتاز که به دلیل ورود هوا به جریان آب است. توکیای و ایلدیز<sup>۴</sup> (۲۰۰۷) مشخصات جریان فوق بحرانی بر روی شیب شکن قائم مستطیلی را بررسی کردند. این محققان به بررسی جزئیاتی از جریان پایین دست همچون ارتفاع موج ایستا پشت جت، طول جت، عمق و طول پاشیدگی<sup>۵</sup> پرداختند. آنها رابطه یی برای نسبت عمق لبه به عمق بالادست برحسب عدد فرود ارائه کردند.<sup>[۸]</sup> لیو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۴) مشخصات جریان بر روی شیب شکن مستطیلی را که در آن، کانال بالادست شیب دار است، بررسی و روابطی بعدی برای عمق لبه، محل و زاویه ی برخورد جت به کف کانال پایین دست، عمق حوضچه و عمق پایین دست ارائه کردند.<sup>[۹]</sup> نتایج آنها بیانگر کاهش عمق لبه در صورت افزایش عدد فرود و شیب بالادست بود. آنها هم چنین نشان دادند که عمق حوضچه و عمق پایین دست مستقیماً تحت تأثیر عدد شیب شکن است و با شیب بالادست، رابطه ی عکس دارد. دانش فراز و همکاران (۲۰۱۹) اثر تغییرات عدد فرود و عمق بحرانی نسبی را در هیدرولیک شیب شکن قائم مستطیلی با جریان فوق بحرانی بررسی کردند.<sup>[۱۰]</sup> نتایج آنها بیانگر این نکته بود که با ثابت نگه داشتن عمق بحرانی و افزایش عدد فرود، افت انرژی نسبی افزایش و عمق حوضچه کاهش می یابد. عکس این مسئله نیز زمانی رخ می دتاز که عدد فرود ثابت و عمق بحرانی نسبی افزایش یابد. تحقیقات اندک در مورد جریان فوق بحرانی در بالادست و مقطع دایروی فقط محدود به مشخصات جت سقوطی می شود که از جمله می توان به تحقیقات کلاس نیتزو و هگر (۱۹۹۷) اشاره کرد.<sup>[۱۱]</sup> آنها مواردی چون عمق لبه ی شیب شکن، افت سطح آزاد جریان در لوله و خط سیر لبه ی بالایی و پایینی جت سقوطی را بررسی کردند. آزمایش ها در لوله یی افقی به قطر ۰/۲۴ متر و ارتفاع شیب شکن انجام دادند. جریان ورودی با نسبت پرشدگی<sup>۷</sup>  $y/D^{10}$  برابر ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد و عدد فرود ۱ الی ۸ مدل شد که در آن  $y$  عمق جریان در لوله ی بالادست و  $D$  قطر لوله است. امواج شوک جریان در لوله ی بالادست با استفاده از مستقیم کننده های جریان<sup>۸</sup> گرفته شد که نتیجه ی آن عبور جریانی بدون

تلاطم از لبه ی شیب شکن بود که اندازه گیری عمق لبه با دقت میلی متر را ممکن می ساخت. آنها با استفاده از معادله ی اندازه حرکت و فرضیات ساده کننده، رابطه یی برای تخمین عمق لبه ی شیب شکن در جریان فوق بحرانی ارائه دادند. پیش از این، سوبرامانیا (۱۹۸۶) روشی بر پایه ی معادله ی انرژی برای تخمین این عمق برای انواع کانال ها با مقاطع مختلف ارائه داد.<sup>[۱۲]</sup> بیرامی و همکاران (۲۰۰۶) نیز با نوشتن معادله ی اندازه حرکت بین دو مقطع بالادست و لبه ی شیب شکن و تعیین ضریب توزیع فشار در لبه ی شیب شکن، رابطه یی را برای عمق لبه در انواع کانال ها ارائه کردند.<sup>[۱۳]</sup> آفرین و همکاران (۲۰۱۷) به صورت عددی جریان ریزی آزاد در هنگام خروج از لوله های تحت فشار را بررسی کردند.<sup>[۱۴]</sup> جریان خروجی در چنین حالتی به صورت سطح آزاد عمل می کند. آن ها برای این جریان دو رژیم، بسته به فاصله ی جدایش جریان از بالای لوله تا لبه ی آن معرفی کردند. در صورتی که فاصله ی مذکور زیاد باشد، جریان حفره یی شکل می گیرد که سطح آب در آن به حالت افقی نیز می رسد. در این حالت، نتایج آنها نشان داد که نسبت عمق لبه به عمق بحرانی ۰/۷۵ است. این مطالعه صرفاً جزئیاتی از شکل جریان در لوله بالادست را بررسی کرده و از هیدرولیک جریان در پایین دست سخنی به میان نیامده است.

در مورد شیب شکن هایی با لوله ی دایره یی بالادست تحقیقات بیشتر معطوف به چاهک های آدم رو<sup>۹</sup> و دراپ شفت ها<sup>۱۰</sup> بوده است.<sup>[۱۵-۱۹]</sup> در داخل کشور نیز تحقیقات عددی اندکی بر روی چنین سازه های صورت گرفته است. مسیبی برزی (۲۰۰۸) به شبیه سازی جریان در چاهک آدم رو توسط کد تجاری FLUENT پرداخت.<sup>[۲۰]</sup> در خروجی چاهک آدم رو، از سرریز پلکانی به عنوان هسته ی مستهلک کننده ی انرژی جریان استفاده شد. پس از شبیه سازی های گسترده، رابطه یی برای تخمین بازده سازه ی آدم رو ارائه شد. بهنام طلب و همکاران (۲۰۱۹) میدان جریان درون سازه خروجی لوله نوع پنچ (USBR VI) را با استفاده از نرم افزار Flow3D مدل کردند.<sup>[۲۱]</sup> جریان ورودی به صورت تحت فشار در لوله هایی با سه قطر متفاوت استفاده شد و ارتفاع شیب شکن نیز بسیار کم و در حد قطر لوله ی ورودی در نظر گرفته شد. در هر دو مطالعه ی اخیر، از دیواره ی آویزان در سازه ی خروجی لوله یک پله در انتهای حوضچه استفاده شده است که فرایند اتلاف انرژی را کاملاً تحت تأثیر قرار می دتاز.

در تحقیق حاضر، خصوصیات هیدرولیکی جریان عبوری از سازه ی شیب شکن با کانال دایره یی در بالادست و کانال مستطیلی در پایین دست بررسی می شود. برای دستیابی به این ترازف، نمونه ی آزمایشگاهی سازه ی هیدرولیکی در آزمایشگاه ساخته و الگوهای پایه ی جریان و سطح اتلاف انرژی بررسی می شود. هم زمان، با استفاده از نرم افزار OpenFOAM جریان در چنین سازه های به صورت عددی شبیه سازی خواتراز شد که پس از صحت سنجی نتایج آن با مدل های آزمایشگاهی می تواند به عنوان ابزاری برای بهینه سازی مدنظر قرار گیرد. در ادامه، ابتدا روش شناسی تحقیق در دو بخش آزمایشگاهی و عددی بیان خواتراز شد و سپس، نتایج به دست آمده تحلیل و بررسی می شوند.

## ۲. روش شناسی

### ۲.۱. مدل آزمایشگاهی

سازه ی هیدرولیکی پیشنهادی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده ی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان ساخته شد (شکل ۱). برای ایجاد جریان در بالادست

است. در این مطالعه، آب‌دهی جریان از ۱۰ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه تغییر می‌کرد. در ابتدای ورودی کانال آزمایشگاه، آب‌دهی سنجی توریبی نصب شده است که صحت عملکرد آن در ابتدای آزمایش توسط لوله‌ی پیتوت تأیید شد. دقت این آب‌دهی سنج در حدود ۰.۲٪ است. برای جریان ورودی از صفحات با بازشدگی‌های ۵۰ و ۸۰ درصد استفاده شد. باتوجه به این بازشدگی‌ها و میزان آب‌دهی، جریانی با عدد فرود بالادست متغیر بین ۱ تا ۳/۸ ایجاد شد. گستره‌ی عدد فرود در پایین دست بین ۳/۶ تا ۴ بود. برای برآورد عمق گرداب<sup>۱۲</sup> در پایین دست شیب‌شکن، از چهار خطکش مدرج که بر روی جدارها نصب شده بود، استفاده شد. مقدار این عمق در مجاورت دیواره‌ی شیب‌شکن بیشینه است و با نزدیک شدن به محل برخورد جت ریزشی<sup>۱۳</sup>، عمق گرداب کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری عمق گرداب به دلیل تلاطم زیاد گرداب پشت جت، همواره با خطاهایی روبروست. اگرچه برای اندازه‌گیری عمق گرداب از خطکش‌هایی با دقت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. اما خطای اندازه‌گیری در حدود ۰.۳٪ است. برای اندازه‌گیری عمق جریان در لوله‌ی بالادست از یک پیرومتر در فاصله‌ی ۷۰ سانتی‌متری از لبه‌ی شیب‌شکن با دقت ۱ میلی‌متر استفاده شد.

برای محاسبه‌ی عمق جریان فوق‌بحرانی و انرژی در کانال پایین دست، توزیع سرعت توسط لوله‌ی پیتوت به دست آمد. از آن‌جا که ورود هوا به جریان در کانال پایین دست هنگام برخورد جت ریزشی به کف کاملاً قطعی است، برای جلوگیری از ورود هوا به لوله‌ی پیتوت، از لوله‌ی با قطر کم (قطر خارجی ۱/۹ میلی‌متر) استفاده شده است. به علت فوق‌بحرانی بودن و به تبع آن کاهش عمق جریان، تعداد نقاط انتخاب شده برای اندازه‌گیری سرعت جریان در جهت قائم متناسب با عمق انتخاب شده است. چهار پروفیل سرعت در عرض کانال در فاصله‌های ۰/۸، ۰/۱۶، ۰/۲۴ و ۰/۳۲ متری از یک طرف کانال برداشت شد. عمق جریان در پایین دست به دلیل فوق‌بحرانی بودن آن کم است و اندازه‌گیری آن به علت ورود هوا میسر نیست. به همین علت، از توزیع سرعت برای به دست آوردن عمق استفاده شد. به این صورت که با داشتن آب‌دهی برای هر مقطع و به دست آوردن سرعت متوسط از توزیع سرعت، عمق متوسط جریان در هر مقطع قابل محاسبه است. میانگین وزنی عمق در زیرمقاطع<sup>۱۴</sup> مورد بررسی، به‌عنوان عمق مقطع پایین دست در نظر گرفته شد.

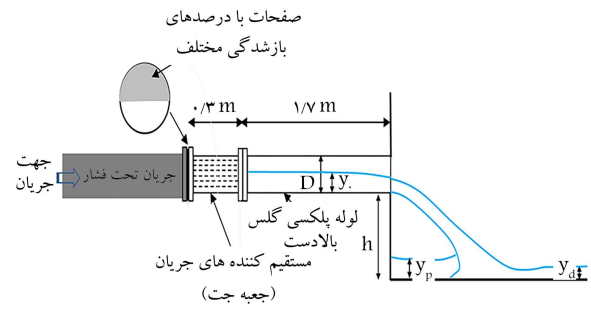
در آزمایشگاه برای ایجاد جریان ورودی با اعداد فرود متنوع، از جعبه‌جت استفاده شد. در مدل عددی این کار به راحتی و با تغییر ارتفاع ورودی جریان صورت پذیرفت. دو مشخصه‌ی جریان‌های فوق‌بحرانی، آب‌دهی نسبی  $(y_c/h)$  و عدد فرود  $(Fr)$  است. در این مطالعه، آب‌دهی نسبی در بازه‌ی ۰/۲۵ تا ۰/۵ و عدد فرود نیز در بازه‌ی ۱ تا ۳/۸<sup>۱۵</sup> در نظر گرفته شد که علاوه بر جریان‌های فوق‌بحرانی، بخشی از جریان‌های زیربحرانی را نیز پوشش می‌دهد. عمق نسبی جریان ورودی  $(y_0/D)$  در لوله‌ی بالادست نیز در بازه‌ی ۴۵ تا ۸۰ درصد در نظر گرفته شد. مجموعاً ۲۳ آزمایش انجام گرفت. جدول ۱ گستره‌ی مورد بررسی پارامترها را در این مطالعه نشان می‌دهد.

برای برآورد استهلاک انرژی نسبی  $(\eta)$  از رابطه‌ی زیر استفاده شد:

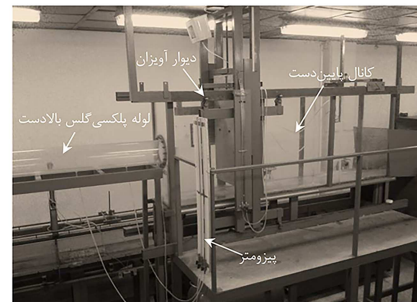
$$\eta = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_d}{E_0} \quad (1)$$

که در آن  $E_0$  و  $E_d$  به ترتیب تراز انرژی در بالادست و پایین دست شیب‌شکن نسبت به کف آن است. تراز انرژی در لوله‌ی بالادست، توسط رابطه‌ی زیر به دست آمد:

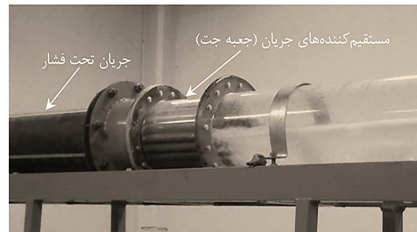
$$E_0 = y_0 + \frac{Q^2}{2gA^3} + h \quad (2)$$



الف) شکل شماتیک؛



ب) مدل ساخته شده در آزمایشگاه؛



ج) جعبه جت جهت تبدیل جریان تحت فشار به جریان سطح آزاد در بالادست لوله ورودی.

شکل ۱. نمایی از مدل آزمایشگاهی چاهک آدم‌رو با دیواره‌ی آویزان (لازم به ذکر است در شکل ب، دیوار آویزان نمایش داده شده که در این تحقیق مورد استفاده واقع نشده است).

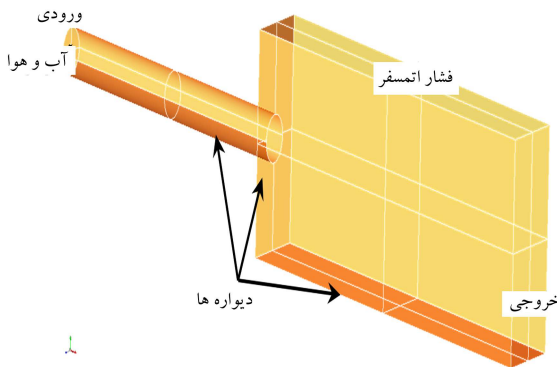
چاهک آدم‌رو از دستگاهی به نام جعبه‌جت<sup>۱۱</sup> استفاده شد.<sup>[۲۲]</sup> در صورت استفاده از این دستگاه نیاز به تغییر شیب برطرف می‌شود و می‌توان به راحتی ارتفاع سطح آزاد جریان را تغییر داد و با عوض کردن آب‌دهی، به اعداد فرود مختلف رسید. به دلیل وجود مستقیم‌کننده‌های جریان در پایین دست دستگاه، مشکل رسیدن به توسعه‌یافتگی حل می‌شود و این طول به حداقل ممکن کاهش می‌یابد. در ابتدای جعبه‌جت، صفحه‌ی فلزی دارای بازشدگی با ارتفاع‌های مختلف قرار دارد که جریان تحت فشار در لوله را به جریان سطح آزاد در پایین دست تبدیل می‌کند.<sup>[۲۳]</sup>

در پایین دست جعبه‌جت از مستقیم‌کننده‌های جریان استفاده می‌شود. این مستقیم‌کننده‌های جریان از یک سری لوله به قطر تقریباً ۰/۸ برابر قطر لوله‌ی اصلی تشکیل شده است و به صورت فشرده در کنار هم، درون لوله‌ی به طولی برابر با قطر لوله‌ی بالادست، قرار گرفته‌اند.

در مدل آزمایشگاهی، لوله‌ی بالادست از جنس پلکسی‌گلس با قطر داخلی ۰/۱۹ متر و طول ۱/۷ متر ساخته شده است. بعد از این لوله، کانالی مستطیلی با دیواره‌هایی از جنس پلکسی‌گلس به طول ۲/۵ متر، عرض ۰/۴ متر و ارتفاع ۱ متر به صورت افقی قرار گرفته است. ارتفاع کف کانال مستطیلی از کف لوله ۰/۳۴۵ متر است. در پایین دست کانال هیچ‌گونه تغییر مقطعی یا کنترل جریان صورت نگرفته

جدول ۱. گستره‌ی مورد بررسی پارامترها در آزمایشگاه.

پارامتر	بیان ریاضی	کمینه	بیشینه
آب‌دهی جریان (لیتر بر ثانیه)	$Q$	۱۰	۴۰
عمق بالادست (متر)	$y_0$	۰٫۰۹	۰٫۱۵
عمق پایین‌دست (متر)	$y_d$	۰٫۰۲	۰٫۰۴
عمق گرداب (متر)	$y_p$	۰٫۰۳	۰٫۱۲
آب‌دهی نسبی	$y_c/h$	۰٫۲۵	۰٫۵
عدد فرود بالادست	$F_r$	۱	۳٫۸۰



شکل ۲. شرایط مرزی در مدل عددی.

شکل ۲ نمایی از مدل عددی را نشان می‌دهد. مرز بالادست در مقطع لوله به دو قسمت آب و هوا تقسیم‌بندی و شرط سرعت ورودی ثابت به قسمت ورودی آب اعمال شد. در این مرز، فشار دینامیکی برابر با گرادیان صفر در نظر گرفته شد. از آنجا که فشار دینامیکی تابعی از بردار سرعت است، گرادیان فشار عمود بر جهت ورود آب صفر است. در قسمت ورودی آب و هوا، کسر حجمی به صورت ثابت و به ترتیب برابر یک و صفر در نظر گرفته شد. در مورد بستر و دیواره‌ها شرط مرزی غیرلغزشی<sup>۱۹</sup> استفاده شد. فشار دینامیکی در این مرزها نیز به صورت گرادیان صفر اعمال شد. در مرز بالای فضای شبیه‌سازی، شرط مرزی فشار اتمسفر در نظر گرفته شد و فشار برابر مقدار ثابت صفر و سرعت به صورت گرادیان صفر اعمال شد. برای مرز پایین‌دست نیز شرط مرزی گرادیان صفر به تمام پارامترها اعمال شد (جدول ۲). برای مطالعه‌ی بیشتر در مورد انواع شرایط مرزی در OpenFOAM به راهنمای کاربری آن<sup>[۲۵]</sup> مراجعه شود.

برای یافتن عمق جریان در طول سازه، روش‌های گوناگونی وجود دارد که همه‌ی آنها از پارامتر کسر حجمی استفاده می‌کنند. سطح آزاد را سطحی تعریف می‌کنند که در آن کسر حجمی برابر ۰٫۵ باشد. با این تعریف تمام سلول‌هایی که نیمی از آن آب و نیمی از آن هواست، به عنوان سطح آزاد در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این‌که در بخش شبیه‌سازی عددی، پارامترهای زیادی محاسبه می‌شود، برنامه‌ی در محیط Octave که یک نرم‌افزار برنامه‌نویسی تحت لینوکس است،<sup>[۲۷]</sup> نوشته شد تا مقادیر متوسط زمانی هر پارامتر و دیگر عملیات ریاضی بر روی آنها به دست آید. گستره‌ی عدد فرود در شبیه‌سازی عددی از ۱ تا ۳٫۸۴ در نظر گرفته شد. آب‌دهی نسبی این مدل‌ها از ۰٫۲۴ تا ۰٫۴۷ بود و مجموعاً ۱۸ مدل مورد بررسی قرار گرفت.

در شبیه‌سازی عددی، یکی از امور ضروری آزمون حساسیت شبکه است. معمولاً انواع شبکه‌بندی را برای یافتن مدل بهینه بررسی می‌کنند. این کار با کاهش اندازه‌ی شبکه‌ها تا جایی که در جواب تفاوت چندانی نکند، انجام می‌گیرد. در مدل حاضر، پس از شبیه‌سازی مشخص شد مدل‌های عددی با کمتر از ۲۰۰۰۰۰ سلول در شبکه‌بندی مثالی قادر به مدل‌سازی صحیح جریان در لوله‌ی بالادست نیستند. دو مدل با شبکه‌ی مثالی و تعداد ۲۶۴۰۰۰ و ۳۸۷۰۰۰ سلول و یک مدل با شبکه‌بندی مستطیلی با تعداد ۲۸۰۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد. برای تمام این مدل‌ها، آب‌دهی نسبی برابر ۰٫۴۳۸ و عدد فرود جریان به طور متوسط برابر ۰٫۹ بود. شکل ۳ تغییرات عمق حوضچه را نسبت به زمان برای هر سه نوع شبکه‌بندی نشان می‌دهد. در تراز نمودارها مربوط به حالتی هستند که جریان به حالت تقریباً ماندگار رسیده است.

که در آن  $Q$  آب‌دهی جریان،  $A$  سطح مقطع جریان و  $h$  ارتفاع شیب‌شکن است. با توجه به وجود موج در کانال پایین‌دست و تفاوت آب‌دهی در مقاطع ذکر شده، تراز انرژی در مقطع پایین‌دست با استفاده از توزیع سرعت محاسبه شد. تراز انرژی در مقطع پایین‌دست با در نظر گرفتن ضریب تصحیح تراز انرژی جنبشی با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست آمد:

$$E_d = \sum_{i=1}^n \left( y_i + \frac{\sum_{j=1}^m V_{ij}^2 \Delta A_{ij}}{2g V_i \Delta A_i} \right) \frac{V_i \Delta A_i}{Q} \quad (3)$$

همان‌طور که در رابطه‌ی ۳ ملاحظه می‌شود، مجموع کل انرژی به صورت میانگین وزنی به دست آمده است. شماره‌ی  $i$  نشان‌دهنده‌ی تقسیمات مقطع به ۴ سطح است و شماره‌ی  $j$  نیز نشان‌دهنده‌ی تعداد نقاط برداشت سرعت در راستای عمود بر جریان برای رسم توزیع آن است.<sup>[۲۴]</sup>

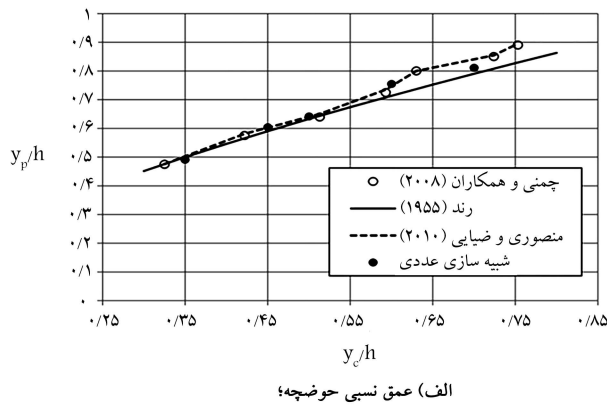
## ۲.۲. نرم‌افزار OpenFOAM

OpenFOAM یک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی است که توسط شرکت تجاری OpenCFD تولید شد. این نرم‌افزار از سال ۲۰۰۴ به بعد به صورت متن‌باز و تحت مجوز عمومی گنو GNU منتشر شد. این فوم به زبان ++C و به صورت شی‌گرا<sup>۱۵</sup> برنامه‌نویسی شده است.<sup>[۲۵]</sup> در برنامه‌نویسی شی‌گرا بدون تغییر ساختار کل برنامه، می‌توان در قسمت‌های دلخواه تغییرات لازم را ایجاد کرد. وجود این مشخصه به توسعه‌ی سریع‌تر یک نرم‌افزار کمک شایانی می‌کند. نرم‌افزار OpenFOAM از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی فضای دامنه و تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری استفاده می‌کند. از آنجا که ورود هوا به جریان در سازه‌های هیدرولیکی بر الگوی جریان بسیار تأثیرگذار است، باید از حل‌گرهای جریان دوفازی استفاده کرد. حلگر اینترفوم<sup>۱۶</sup> بدین منظور به کار می‌رود. این حل‌گر یک الگوریتم دوفازی بر پایه‌ی روش حجم سیال<sup>۱۷</sup> است. برای هر دو فاز یک مجموعه معادله‌ی اندازه‌ی حرکت تعریف و کسر حجمی هر سیال در هر سلول محاسباتی به دست می‌آید و بر پایه‌ی این مقدار، دیگر خواص فیزیکی به صورت متوسط وزنی حساب می‌شوند.<sup>[۲۶]</sup> در این تحقیق، از مدل‌های بهبود یافته‌ی  $k - \epsilon$  هم چون مدل آشفتگی realizable  $k - \epsilon$  برای شبیه‌سازی استفاده شد. پس از بررسی‌های اولیه، مشخص شد که در مقایسه با مدل معروف و بهبود یافته‌ی  $k - \epsilon$  RNG، مدل realizable  $k - \epsilon$  هم‌گرایی بهتری ایجاد می‌کند. برای ساخت مدل و شبکه‌بندی از نرم‌افزار رایگان و متن‌باز سالوم<sup>۱۸</sup> استفاده شد.

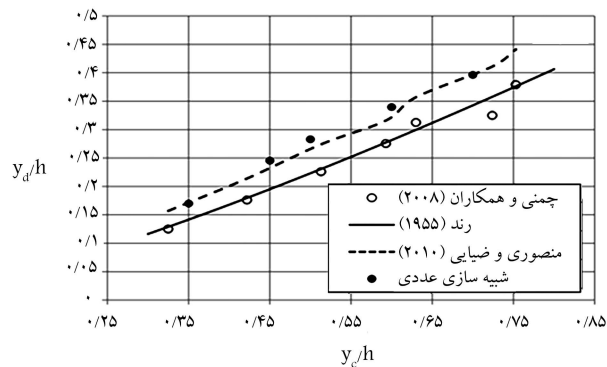
شرایط مرزی و اولیه برای پارامترهای سرعت، فشار دینامیکی، انرژی جنبشی آشفتگی، نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی، و کسر حجمی آب و هوا تعیین می‌شود.

جدول ۲. شروط مرزی اعمال شده برای سه مؤلفه‌ی کسر حجمی، فشار و سرعت.

مرز	نام گروه	alpha1	p-rgh	U
ورودی هوا	a-inlet	fixed Value of 0	zeroGradient	fixed value of (0 0 0)
ورودی آب	w-inlet	fixed Value of \	zeroGradient	fixed value of (Ux 0 0)
خروجی	outlet	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
اتمسفر	atmosphere	inteloutlet	totalPressure	pressureInletOutletVelocity of 0
دیواره‌ها	walls	zeroGradient	buoyantPessure	fixedValue of (0 0 0)



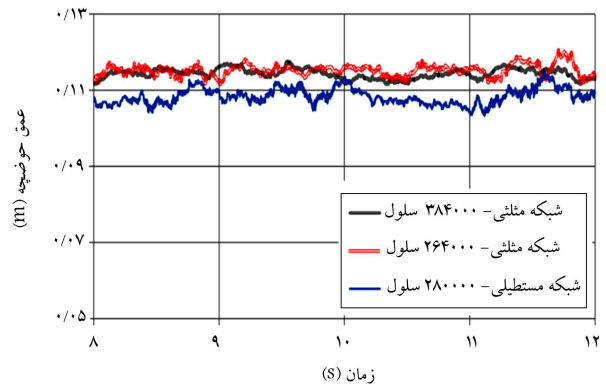
الف) عمق نسبی حوضچه؛



ب) عمق نسبی پایین دست.

شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی.

جت جریان ریزشی با مقاطع دایروی ضمن سقوط افزایش می‌یابد، درحالی که این ضخامت در کانال مستطیلی کاهش می‌یابد.<sup>[۱۱]</sup> این مسئله در تحقیق حاضر نیز مشاترازه شد. دانستن این ضخامت می‌تواند در بررسی نیروهای دینامیکی وارد بر کف مفید باشد.<sup>[۷]</sup> در شیب‌شکن قائم مستطیلی با برخورد جت آب به کف کانال پایین دست، مقداری از جریان به سمت پایین دست و باقی‌مانده به سمت بالادست نقطه‌ی برخورد انتقال می‌یابد. در این حالت گردابی در صفحه‌ی قائم در فضای بین بالادست جت ریزشی و دیواره‌ی شیب‌شکن با سطح آزاد تشکیل می‌شود. در حالتی که در بالادست شیب‌شکن از تبدیل همگرا استفاده شود، علاوه بر گرداب در صفحه‌ی قائم، دو نوع گرداب در صفحه‌ی افقی نیز مشاترازه می‌شود.<sup>[۱۱]</sup> شکل ۵ جریان گردابی در ۳ نوع شیب‌شکن را نشان می‌دهد. اگر کانال بالادست شیب‌شکن دایره‌ی باشد، جریان گردابی تقریباً مشابه حالتی است که در بالادست از تبدیل استفاده شده باشد. الگوی جریان کاملاً حالت سه‌بعدی پیدا می‌کند و جریان گردابی در تمام جهات جت ریزشی قابل مشاترازه است. علت اصلی این مسئله تغییر



شکل ۳. تأثیر انواع شبکه‌بندی بر نتایج عمق حوضچه و عمق پایین دست.

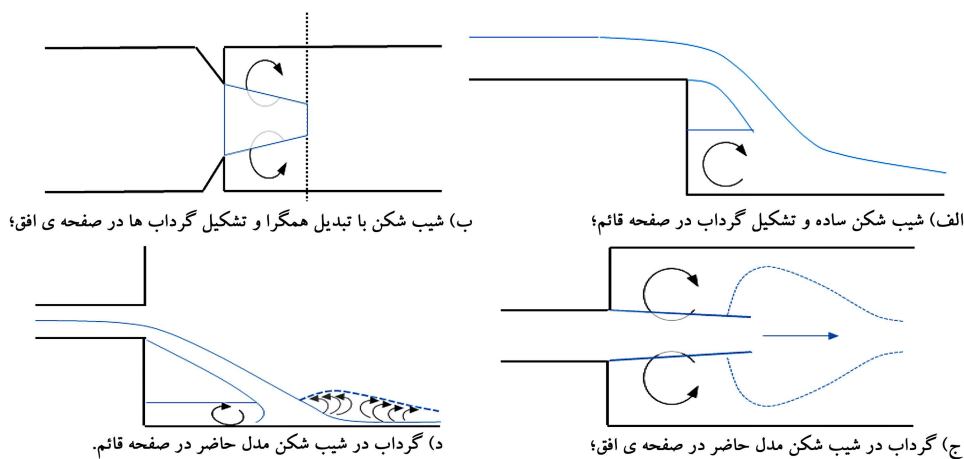
همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، نتایج حاصل از دو شبکه‌ی مثلثی نسبتاً بر یکدیگر منطبق هستند. در نتیجه می‌توان با دقت قابل قبولی از شبکه‌ی مثلثی درشت‌تر استفاده کرد. اختلاف نتایج حاصل از شبکه‌ی مثلثی و مستطیلی کمتر از ۵ درصد است که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و دقت شبکه‌ی مستطیلی را نیز قابل قبول دانست.

در مراحل اولیه‌ی تحقیق، برای صحت‌سنجی مدل عددی، شیب‌شکن قائم مستطیلی مدل‌سازی شد. در شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی چمنی و همکاران<sup>[۲۸]</sup> (۲۰۰۸)، رابطه‌های تجربی رند<sup>[۲۹]</sup> (۱۹۹۵) و نتایج مدل عددی نرم‌افزار Fluent منصور و ضیایی<sup>[۳۰]</sup> (۲۰۰۹) مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ الف مشخص است، عمق نسبی حوضچه‌ی برآورد شده تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت دارد. در شکل ۴ ب نیز نتایج عمق نسبی در پایین دست شیب‌شکن ارائه شده است. نتایج تحقیق کنونی با رابطه‌ی تجربی رند و داده‌های آزمایشگاهی چمنی و همکاران تفاوت دارد. علت این امر را می‌توان به ریز نبودن شبکه‌بندی در محدوده‌ی کف یا اتلاف انرژی زیادی که در مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  نسبت به واقعیت رخ می‌دهد، مربوط دانست.

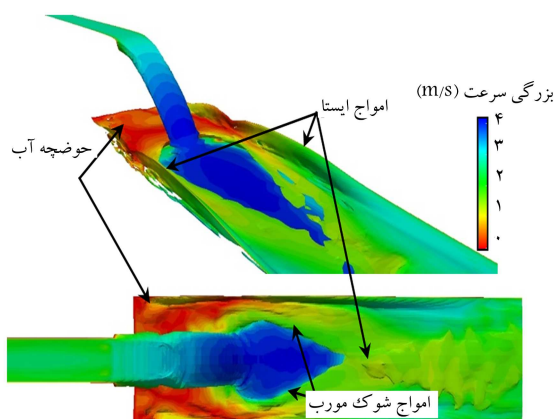
### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. مشاترازات الگوی جریان

جریان در شیب‌شکن مورد بررسی را می‌توان مشابه جریان بر روی شیب‌شکن‌های قائم با تبدیل همگرا در بالادست فرض کرد، با این تفاوت که شکل مقطع جت جریان در بالادست به جای مستطیلی، به صورت دایره‌ی است و لوله‌ی بالادست نیز هم عرض کانال پایین دست نیست. کلاس نیزر و هگر بیان می‌کنند ضخامت



شکل ۵. جریان گردابی در کانال پایین دست.



شکل ۶. تشکیل امواج شوک مورب و امواج ایستا و هم چنین حوضچه ی آب پشت جت در شبیه سازی عددی جریان پایین دست شیب شکن قائم با آب دهی ۳۵ لیتر بر ثانیه.

پیدا می کند و کاهش عمق نسبت به آنچه در منحنی  $M_2$  در جریان زیر بحرانی رخ می دهد، بسیار کمتر است. نتایج نشان می دهد که در جریان فوق بحرانی با اعداد فرود نزدیک به یک، عمق لبه ی شیب شکن در حدود ۸۰ درصد عمق بالادست است و با افزایش عدد فرود، تفاوت این دو عمق کمتر می شود. در نتیجه، عمق لبه به عمق بالادست نزدیک می شود. برآورد عمق نسبی لبه ی شیب شکن برای تعدادی از نتایج شبیه سازی عددی کمی بیش از نتایج آزمایشگاهی است که می تواند به علت درشت بودن شبکه بندی در ناحیه ی برداشت این عمق باشد. در شکل ۷ مشاترازه می شود که روابط تحلیلی موجود به خوبی قادر به تخمین عمق لبه هستند و رابطه ی ساده ی ارائه شده توسط کلاس نیتزر و هگر با وجود فرضیات ساده کننده، به درستی عمق لبه را محاسبه می کند.

### ۲.۲.۳. عمق گرداب

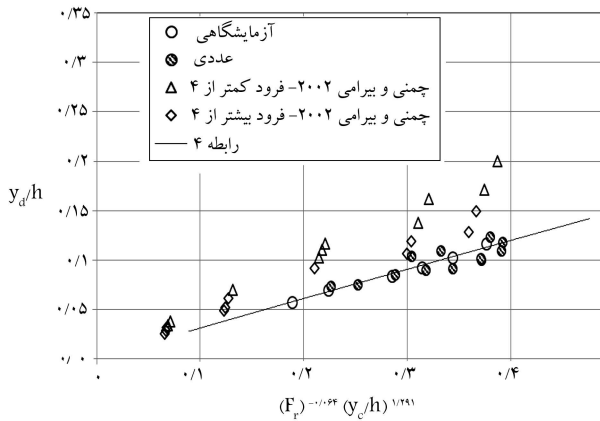
مشاترازات آزمایشگاهی نشان دادند که سطح آزاد گرداب در پایین دست شیب شکن دارای نوسان های زیادی است و عمق آن در مرکز کانال بیشتر از کناره های آن است. با افزایش آب دهی و متعاقب آن طول گرداب، از میزان این نوسان ها کاسته می شود. شکل ۸ نتایج آزمایشگاهی عمق گرداب برای دو نسبت پرشدگی اسمی در لوله ی بالادست را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، عمق گرداب در یک آب دهی نسبی ثابت با افزایش عدد فرود کاهش می یابد. این موضوع در جریان

ناگهانی سطح مقطع از دایره ی به سطح مقطع مستطیلی است. همان طور که در شکل ۵ ج و د مشخص است، دو نوع جریان گردابی در صفحات افق و قائم شناسایی شد. جریان گردابی در صفحه ی افق در طرفین جت و در حوضچه ی آب پشت جت تشکیل می شود. جریان گردابی در صفحه ی قائم نیز در دو محل مشاترازه شد. یکی در مرکز کانال و حوضچه ی آب پشت جت و دیگری بعد از جت و در کناره های کانال که از آن به موج های ایستا<sup>۲۰</sup> تغییر می شود. شکل ۶ نمایی از الگوی جریان به دست آمده از نتایج شبیه سازی عددی جریان در شیب شکن را نشان می دهد. محل تشکیل امواج ایستا و امواج شوک مورب در شکل ۶ مشخص شده است. ماهیت گرداب پایین دست شیب شکن در تحقیق حاضر متفاوت با گرداب شیب شکن معمولی است که در تحقیقات پیشین استفاده شده است. همان طور که در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است، نحوه ی هوادهی و تشکیل جریان چرخشی دو علت اساسی این اختلاف است. در تحقیقات قبلی، هوادهی شیب شکن به صورت مصنوعی (تعبیه ی روزنه یی در زیر جت ریزشی) صورت گرفته است. در تحقیق حاضر، این موضوع به علت تغییر عرض جت ریزشی انجام می شود. جریان چرخشی در شیب شکن معمولی به علت تشکیل جت ریزشی، برخورد آن به کف کانال پایین دست و برگشت جریان به سمت دیواره (به علت برقراری اصل اندازه حرکت) تشکیل می شود و عرض جت ریزشی در کانال های بالادست و پایین دست ثابت است. جت ریزشی در تحقیق حاضر در لبه ی شیب شکن از مقطع دایره یی سقوط می کند و پس از برخورد به کف، علاوه بر جریان چرخش عمودی، به سمت جداره ها در کانال پایین دست حرکت و چرخش افقی ایجاد می کند.

## ۲.۳. مشخصات هیدرولیکی جریان

### ۱.۲.۳. عمق لبه ی شیب شکن

تاکنون در مورد عمق لبه ی شیب شکن برای مقاطع دایره یی در جریان های زیر بحرانی تحقیقات زیادی شده است؛ چرا که رابطه ی منحصر به فرد آن با عمق بحرانی به تخمین آب دهی جریان می انجامد. اما برای تخمین آب دهی در جریان های فوق بحرانی، علاوه بر این عمق به عمق بالادست نیز نیاز است. برای مقایسه ی نتایج شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی از یک سری روابط تحلیلی بر پایه ی معادله ی انرژی و اندازه حرکت استفاده شده است. همان طور که در شکل ۷ مشخص است، نتایج آزمایشگاهی و عددی انطباق نسبتاً خوبی با یکدیگر دارند. با توجه به شکل ۷ می توان گفت با افزایش عدد فرود، در جریان بالادست شیب شکن منحنی جریان طول کمتری



شکل ۹. تغییرات عمق نسبی پایین دست در جریان فوق بحرانی.

مقایسه شده است که در آن، عدد فرود شبیه‌سازی عددی در بازه ۱ تا ۳٫۸۴ است. همان‌طور که مشخص است، در  $y_c/h$  کمتر از ۰٫۳، نتایج شبیه‌سازی مقادیر کمتری را نسبت به داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند. در آب‌دهی‌های نسبی بالاتر از ۰٫۴، عمق نسبی گرداب به دست آمده از شبیه‌سازی عددی مقادیر بیشتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی برآورد می‌کند. این مسئله به جریان دوفازی و وجود حباب‌های هوا در گرداب برمی‌گردد. در شبیه‌سازی معمولاً سطح آزاد را متناظر با سلول‌های دارای غلظت آب و هوای برابر (کسر حجمی  $\alpha_1 = ۰٫۵$ ) در نظر می‌گیرند. [۳۴] با توجه به غلظت زیاد هوای درون حوضچه، معیار ثبت سطح آزاد در مشاترات آزمایشگاهی لزوماً نمی‌تواند منطبق بر فرض کسر حجمی ۵۰ درصد در مدل عددی باشد. پس این مسئله باعث تفاوت‌هایی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌شود.

#### ۳.۲.۳. عمق نسبی جریان پایین دست

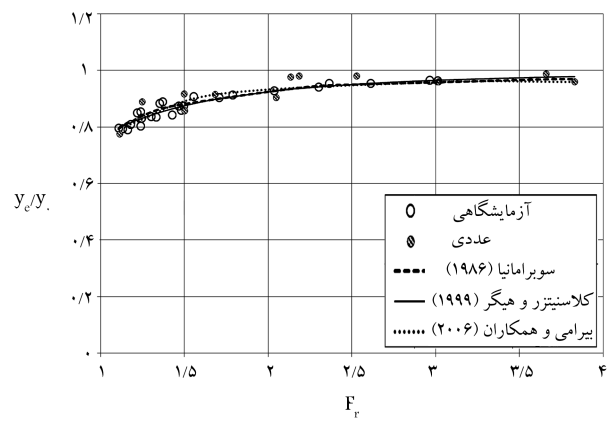
برای بررسی این متغیر، داده‌های آزمایشگاهی مربوط به عمق پایین دست به یک تابع دومتغیره برازش داده شد. با این کار، هم‌زمان اثر عدد فرود و آب‌دهی نسبی در تغییرات پارامتر دیده می‌شود. این تابع به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{y_d}{h} = ۰٫۳۰۲ (F_r)^{-۰٫۰۶۲} \left(\frac{y_c}{h}\right)^{۱٫۲۹۱} \quad R^2 = ۰٫۹۸۶ \quad (۴)$$

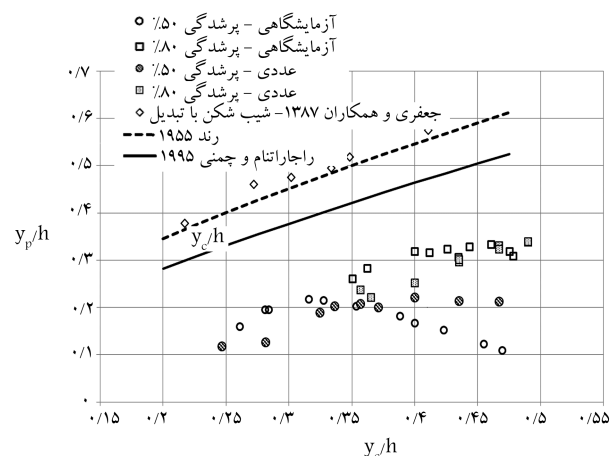
برای این رابطه مقادیر RMSE و NRMSE نیز محاسبه شد که به ترتیب برابر ۰٫۰۷ و ۰٫۱۱۴ به دست آمدند. این مقادیر بیانگر دقت بالای رابطه‌ی ارائه شده است. شکل ۹ نشان‌دهنده تغییرات عمق نسبی جریان در پایین دست است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، عمق نسبی جریان با افزایش آب‌دهی نسبی افزایش می‌یابد. عمق نسبی پایین دست در جریان فوق بحرانی با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. در رابطه‌ی برازش داده شده، توان منفی عدد فرود، بیانگر همین موضوع است. این مسئله در جریان فوق بحرانی بر روی شیب‌شکن‌های قائم مستطیلی نیز دیده شد. [۶] همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، عمق نسبی جریان پایین دست در چاهک آدمرو در بازه‌ی عدد فرود کمتر از ۴ به مراتب کمتر از جریان فوق بحرانی بر روی شیب‌شکن قائم مستطیلی است. عمق نسبی جریان در شیب‌شکن مستطیلی با افزایش عدد فرود به نتایج مدل خروجی لوله نزدیک می‌شود.

#### ۳.۲.۳. اتلاف انرژی

با بررسی‌های صورت گرفته پیرامون نحوه‌ی اتلاف انرژی مشخص شد که یکی از دلایل مهم افت انرژی در این مدل که باعث افزایش چشم‌گیر آن نسبت به شیب‌شکن قائم مستطیلی می‌شود، افت موضعی ناشی از انبساط مقطع چاهک آدمرو از دایره‌ی به مستطیلی است. عواملی چون برخورد جت ریزشی به کف چاهک آدمرو، جریان



شکل ۷. تغییرات عمق نسبی لبه‌ی شیب‌شکن برحسب عدد فرود در جریان فوق بحرانی.



شکل ۸. تغییرات عمق نسبی گرداب برحسب آب‌دهی نسبی در مقایسه با شیب‌شکن مستطیلی و شیب‌شکن مستطیلی با تبدیل.

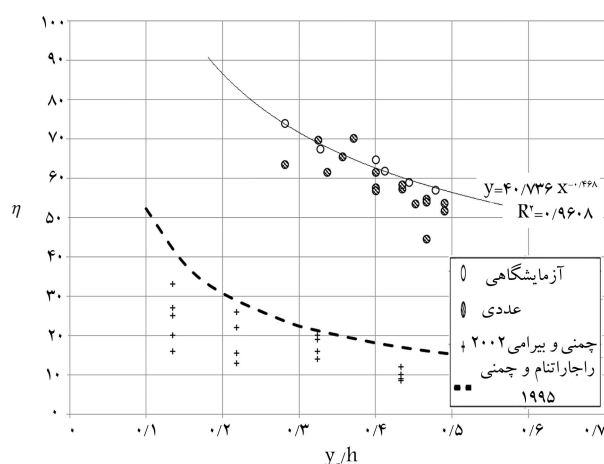
فوق بحرانی بر روی شیب‌شکن قائم مستطیلی نیز مشاترازه شده است. [۶] علت این مسئله را می‌توان به کاهش زاویه‌ی برخورد جت با کف کانال مربوط دانست. با افزایش عدد فرود، سرعت جریان نیز افزایش می‌یابد و جت پرتابی با زاویه‌ی کوچکتری نسبت به افق به کف کانال برخورد می‌کند. با کاهش زاویه‌ی برخورد به کف، جریان کمتری به سمت دیوار شیب‌شکن برمی‌گردد (طبق اصل اندازه حرکت) و در نتیجه، عمق گرداب کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی داده‌های به دست آمده و نتایج آزمایشگاهی شیب‌شکن‌های قائم مستطیلی بیانگر این است که به دلیل تغییر ناگهانی مقطع از دایره‌ی به مستطیلی و انبساط جریان، عمق گرداب در مدل حاضر به مراتب کمتر است. با بررسی نتایج آزمایشگاهی مربوط به پرشدگی ۸۰٪ (که عدد فرود در محدوده‌ی ۱ تا ۱٫۴۷ است و تغییرات عدد فرود کمتر است)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش آب‌دهی، عمق نسبی گرداب افزایش می‌یابد. همان‌طور که از شکل ۸ پیداست، احتمال بالا آمدن عمق گرداب تا ارتفاع کامل شیب‌شکن وجود ندارد. عمق نسبی گرداب برای شیب‌شکن‌های قائم مستطیلی (رند ۱۹۵۵، [۲۹]، راجاراتام و چمنی [۳۲]، ۱۹۹۵، جعفری و همکاران [۳۳]، ۲۰۰۸)، به مراتب بیشتر از مدل حاضر است. همان‌طور که در بخش (۳-۱) بیان شد، گسترش جت در جهت عرضی و چرخش افقی که در شیب‌شکن‌های معمولی وجود ندارد، باعث می‌شود که عمق حوضچه در تحقیق حاضر کمتر از تحقیقات پیشین شود.

نتایج شبیه‌سازی عددی عمق گرداب با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۸

مقابل آب‌دهی نسبی نشان می‌دهد. با بررسی‌های صورت‌گرفته مشخص شد که با افزایش آب‌دهی نسبی در همه‌ی مدل‌ها، افت تراز انرژی نسبی انرژی به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. افت تراز نسبی انرژی شیب‌شکن بین ۵° تا ۷۵ درصد است. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، بازده این شیب‌شکن نسبت به شیب‌شکن قائم مستطیلی حدود ۵۰ درصد بیشتر است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

شیب‌شکن قائم با کانال دایره‌یی در بالادست و کانال مستطیلی در پایین‌دست در آزمایشگاه ساخته و خصوصیات جریان در آن بررسی شد. در این تحقیق، از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM، برای شبیه‌سازی عددی جریان استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نتایج عمق نسبی لبه‌ی شیب‌شکن در جریان فوق‌بحرانی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی پیشین داشت. نتایج نشان داد که عمق نسبی گرداب در یک آب‌دهی ثابت با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. در یک عدد فرود ثابت، عمق نسبی گرداب در مدل حاضر نسبت به شیب‌شکن‌های معمولی به مراتب کمتر است و در این سیستم احتمال بالا آمدن آب تا لبه‌ی شیب‌شکن وجود ندارد. افت موضعی ناشی از انبساط جریان از دایره‌یی به مستطیلی عامل اصلی بیشتر بودن اتلاف انرژی نسبت به شیب‌شکن قائم مستطیلی است. افت انرژی حدود ۵۰ درصد بیشتر از شیب‌شکن مستطیلی است و با افزایش آب‌دهی، افت انرژی کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که مدل عددی قابلیت تخمین مناسب متغیرهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده را دارد و می‌توان از آن در زمان بهینه‌سازی طرح‌های اجرایی استفاده کرد.



شکل ۱۰. تغییرات بازده اتلاف انرژی شیب‌شکن در مقابل آب‌دهی نسبی.

گردابی و اختلاط ناشی از آن، برخورد جریان به دیواره‌های چاهک آدم‌رو (در هنگام تشکیل موج ایستا) و در نهایت برخورد امواج شوک مورب به یکدیگر و سپس انتقال آنها به دیواره‌های کانال پایین‌دست باعث اتلاف انرژی می‌شوند. به‌دلیل انبساط مقطع، بخشی از جریان به سمت دیواره‌های کانال حرکت می‌کنند و امواج ایستا را تشکیل می‌دهند. در ادامه نیز به‌دلیل تغییر جهت خطوط جریان، امواج مورب به‌وجود می‌آیند که در پایین‌دست به یکدیگر برخورد و باعث اتلاف انرژی بیشتری می‌شود.

شکل ۱۰، بازده اتلاف انرژی در این مدل شیب‌شکن (خروجی لوله) را در

#### پانویس‌ها

1. drop structure
2. pipe outlet structures
3. oblique shock wave
4. Tokyay and Yildiz
5. splashing
6. Liu
7. filling ratio
8. flow straightners
9. manhole
10. dropshafts
11. Jet-box
12. pool depth
13. plunging jet
14. subsections
15. object oriented
16. Interfoam
17. volume of fluid
18. Salome
19. No-slip
20. standing wave

#### منابع (References)

1. Moradi Sabz Koochi, A., Kashefipour, S. S.M. and Bina, M. "Experimental comparison of energy dissipation on drop Structures", *Journal of Water and Soil Science*, **15.56**, pp. 209-223, (in Persian) (2011).
2. Fereshtehpour, M. and Chamani, M. R. "Flow characteristics of a drop manhole with an internal hanging baffle wall in a storm drainage system: numerical and experimental modeling", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **146**(8), pp.04020022-1 to 04020022-9 (2020). doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001490.
3. Verma, D. and Goel, A. "Development of efficient stilling basins for pipe outlets", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **129.3**, pp. 194-200 (2003).
4. Tiwari, H.L., Goel, A. and Gahlot, V.K. "Experimental study of effect of end sill on stilling basin performance", *International Journal of Engineering Science and Technology*, **3.4**, pp. 3134-3140, (2011).



5. Bradley, J.N. and Peterka, A.J. "Hydraulic design of stilling basins", United States Department of the Interior, Monograph, 25, 1401-1406 (1957).
6. Chanson, H. and Toombes, L. "Supercritical flow at an abrupt drop: Flow patterns and aeration", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **25**, pp. 956-966 (1998).
7. Chamani, M.R. and Beirami, M. "Flow Characteristics at Drops", *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**, pp. 788-791 (2002).
8. Tokyay, N. D. and Yildiz, D. "Characteristics of free overfall for supercritical flows", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **34.2**, pp. 162-169 (2007).
9. Liu, S.I., Chen, J.Y., Hong, Y.M. and et al. "Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope", *Journal of Marine Science and Technology*, **22.4**, pp. 476-486, (2014).
10. Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Hasannia, V. "Experimental investigating effect of froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2019). doi:10.22060/ceej.2019.15655.5985
11. Clausnitzer, H. and Hager, W., "Outflow Characteristics from Circular Pipe", *Journal of Hydraulic Engineering*, **123**, pp. 914-917 (1997).
12. Subramanya, K. "Measurement of discharge in an exponential channel by the end depth method", *In Proc., International Conference on Measuring Techniques*, pp. 313-324 (1986).
13. Beirami, M. K., Nabavi, S.V. and Chamani, M.R. "Free overfall Iranian in channels with different cross sections and sub-critical flow", *Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, **30.B1**, pp. 97-105 (2006).
14. Afrin, T., Kaye, N.B., Khan, A.A. and et al. "Numerical investigation of free overfall from a circular pipe flowing full upstream", *Journal of Hydraulic Engineering*, **143.6**, pp.04017004-1 to 04017004-11, (2017).
15. Sousa, V., Bombardelli, F. and Chanson, H. "Numerical simulation of rectangular dropshafts using a volume-of-fluid (VoF) technique". 3rd IAHR Congress (IAHR), Vancouver (August 9-14 2009).
16. Camino, G., Zhu, D. and Rajaratnam, N. "Hydraulics of stacked drop manholes", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **137.8**, pp. 537-552 (2011).
17. Beg, M.N.A., Carvalho, R.F. and Leandro, J. "Comparison of flow hydraulics in different manhole types". In *Managing Water for Sustainable Development: Learning from the past for the future. Proceedings of the 37th IAHR World Congress*, 6865, pp. 4212-4221 (2019).
18. Helmi, A.M., Essawy, H.T. and Wagdy, A. "Three-dimensional numerical study of stacked drop manholes", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **145.9**, pp. 04019017-1 to 04019017-12 (2019).
19. Qi, Y., Wang, Y. and Zhang, J. "Three-dimensional turbulence numerical simulation of flow in a stepped dropshaft", *Water*, **11.1**, p. 30 (2019).
20. Mosaibi Barzi, M. "Numerical modeling of flow over stepped spillway in runoff drainage networks", Msc Thesis, Isfahan University of Technology, (in Persian) (2008).
21. Behnamtalab, E., Ghodsian, M., Zarrati, A.R. and et al. "Geometry modification of stilling basin USBR VI with numerical simulation", *Journal of Hydraulics*, **13.4**, pp. 1-15 (in Persian) (2019).
22. Camino, G.A., Zhu, D.Z., and Rajaratnam, N. "Hydraulic study of a stacked drop manholes", 3rd IAHR Congress, Vancouver, Canada, August 9-14, (2009).
23. Gargano, R. and Hager, W.H. "Supercritical flow across sewer manholes", *Journal of Hydraulic Engineering*, **128.11**, pp. 1014-1017 (2002).
24. Moore, W.L. "Energy Loss at the base of free overfall". *Transaction, ASCE*, **108**, pp. 1343-1360 (1943).
25. Greenshields, C.J. "Openfoam user guide", OpenFOAM Foundation Ltd, version, 3.1, e2888 (2015).
26. Suraj, S.D., Lakshman, A. and Mario, F.T. "Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam", *Computational Science and Discovery*, **5.1**, pp.1-36 (2012).
27. Eaton, J.W., Bateman, D., Hauberg, S. and et al. "GNU Octave version 3.8.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations", CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN 1441413006 (2014).
28. Chamani, M.R., Rajaratnam, N. and Beirami, M. "Turbulent jet energy dissipation at vertical drops", *Journal of Hydraulic Engineering*, **134**, pp. 1532-1535 (2008).
28. Rand, W., "Flow geometry at straight drop spillway", *Hydraulic Division ASCE*, **81**, pp. 1-13 (1955).
29. Mansouri, R. and Ziaei, A.N. "Two-dimensional numerical simulation of flow pattern in a vertical drop considering different boundary conditions and meshing", 6th National Civil Engineering Congress, Semnan, (in Persian) (2010).
30. Jannati, M.H. "Vertical drop with convergent conversion and subcritical upstream flow", Msc Thesis, Isfahan University of Technology, (in Persian) (2008).
31. Rajaratnam, N. and Chamani, M.R. "Energy loss at drops", *Journal of Hydraulic Research*, **33.3**, pp. 373-384 (1995).
32. Jafari, A., Bina, M. and Ghomshi, M. "Experimental investigation of the effect of two types of aeration on plunging flow hydraulic", 4th National Civil Engineering Congress, Tehran (2008).
33. Yazdi, J. and Zarrati, A.R. "An algorithm for calculating air demand in gated tunnels using a 3D numerical model", *Journal of Hydro-environment Research*, **5**, pp. 3-13 (2011).