

## بررسی عددی الگو و مشخصات آبی جریان بر روی سرریز همگرا دارای پرتابه ی جامی شکل (مطالعه ی نمونه ای: سرریز سد گاوشان)

محمد مناف پور<sup>۱\*</sup>، حمزه ابراهیم نژادیان<sup>۲</sup>، وحید بابازاده<sup>۳</sup>

### چکیده

سرریز به عنوان یکی از مهم ترین سازه های آبی وابسته سدها، جریان سیلاب ورودی به مخزن سد را در مواقع تکمیل ظرفیت آن، با ایمنی کافی به پایین دست انتقال می دهد. برای کاهش هزینه های ساخت سرریزهای نسبتاً طولانی و همچنین رفع اثرات نامطلوب ناشی از پستی و بلندی زمین، دیواره ها را بخصوص در تندابها به صورت همگرا اجرا می کنند. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Flow-3D و شبیه آشفستگی RNG K-ε، به شبیه سازی جریان بر روی سرریز سد گاوشان شامل کانال تقرب، تاج منحنی پیوندی، تنداب تنگ شونده و پرتابه ی جامی شکل پرداخته شده و مشخصه های آبی جریان مانند نحوه توزیع سرعت، فشار و تغییرات عمق جریان در سرریز بررسی گردیده است. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی جریان با نتایج نظیر آزمایشگاهی مشاهده شد که تفاوت چندانی بین آنها وجود ندارد. سرعت جریان بر روی انحنای تاج سرریز افزایش سریع و ناگهانی داشته و در طول تنداب این روند افزایشی به آرامی دنبال می شود تا جایی که بیشترین میزان سرعت در انتهای تنداب (ابتدای پرتابه ی جامی شکل)، در بده ی ۱۳۵۰ مترمکعب بر ثانیه، معادل ۳۰ متر بر ثانیه است. در این مطالعه، زاویه ی همگرایی بهینه دیواره های تنداب برای کاستن از احتمال تشکیل امواج عرضی و افزایش ارتفاع دیواره های سرریز معادل ۲/۰۷ درجه ی بدست آمد.

**کلمات کلیدی:** الگوی جریان، شبیه سازی عددی، سرریز همگرا، سد گاوشان، جریان آشفته، شبیه آشفستگی RNG K-ε

<sup>۱</sup> استادیار گروه عمران آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده ی فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه،

Email: m.manafpour@urmia.ac.ir تلفن: ۰۹۱۴۳۴۳۸۷۶۲

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری عمران آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده ی فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه،

<sup>۳</sup> فارغ التحصیل گروه عمران آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده ی فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه

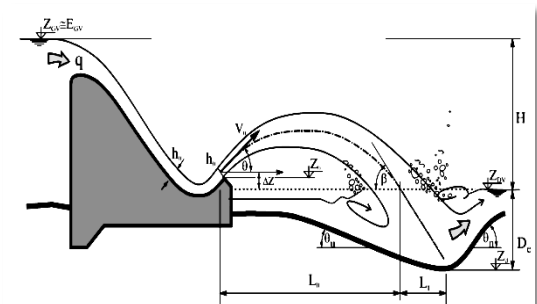
## مقدمه

سدسازی به عنوان یکی از بارزترین فعالیت‌های مهندسی و اقتصادی در جهان مطرح است. سرریزها یکی از اصلی‌ترین تأسیسات وابسته سدها به شمار می‌روند که نقش مهمی را در ایمنی آن‌ها دارا هستند. این تأسیسات در هنگام سیل، یا مواقعی که تراز سطح آب پشت بدنه سد از حد بهنجار تجاوز می‌نماید، شروع به کار کرده و آب اضافی ورودی به مخزن سد را به خارج از دریاچه ی سد انتقال می‌دهد. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از هزینه ی سد، بالأخص در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای را سرریزها تشکیل می‌دهند، تحقیقات بیشتری برای مشخصه‌های جریان سرریزها ضروری است. الزامات افزایش جریان محدودیت‌ها و قیود شهرسازی، هندسه ی دره‌ها و پستی و بلندی حاکم بر منطقه طرح، و همچنین اقتصاد آن، منجر به افزایش استفاده از سرریزهای همگرا گردیده و این مطلب لزوم مطالعات جامع‌تری را برای این سرریزها جهت شناخت مشخصه‌های جریان واقع بر روی آن‌ها پیش‌نمایش می‌کند. گرچه مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته ولی هنوز دستورالعمل مشخص و جامعی برای طراحی سرریزهای همگرا وجود ندارد. در این راستا گام نخست طراحی ایمن این سرریزها نیاز به یک شناخت جامع از الگو و مشخصه‌های جریان واقع بر روی این سرریزها را می‌طلبد.

به منظور مطالعه و تحلیل جریان عبوری از روی سرریز، از نمونه های آزمایشگاهی یا ریاضی استفاده می‌شود. کاربرد نمونه های آزمایشگاهی هزینه‌بر و زمان‌بر خواهد بود، در حالی که استفاده از شبیه‌های ریاضی و حل رایانه ای بسیار مقرون به صرفه است. البته بهره‌گیری از شبیه‌های ریاضی نیز مشکلات خاص خود را از قبیل واسنجی، شبیه‌سازی مناسب الگوی جریان، معادلات استفاده شده و غیره داراست. نمایی از چگونگی عبور جریان سیلاب از روی سرریز منحنی پیوند آزاد و سازه‌ی پایانه آن و پرتابه ی جامی شکل، در شکل (۱) ارائه شده است.

استفاده از شبیه عددی در جریان‌های عبوری از سرریزها، اولین بار به وسیله ی کسیدی (۱۹۶۵) برای تعیین فشار روی تاج سرریز بر اساس فرضیه ی جریان توانی به صورت دوبعدی صورت گرفت. نتیجه این تحقیق حاکی از همخوانی مناسب نتایج عددی با آزمایشگاهی،

ناچیز بودن تأثیر لزجت در تعیین سطح آزاد جریان، و وابستگی فشار کمینه به ازای بارآبی معین به شرایط مرزی است.



شکل ۱- مدل شماتیک از سرریز و پرتابه جامی شکل

یوهانسون و ساویچ (۲۰۰۶)، عملکرد دو شبیه فیزیکی و عددی را در مطالعه ی جریان روی سرریز با وجود پایاب مقایسه کردند. در شبیه عددی از نرم‌افزار Flow-3D و روش حجم محدود استفاده گردید. نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی داشته اند. در شبیه عددی نیمرخ سطح آزاد آب محاسبه شده به کمک روش حجم سیال با مقدار نظیر شبیه فیزیکی تطابق مناسبی را دارد. بروس و همکاران (۲۰۰۱)، جریان عبوری از روی سرریز منحنی پیوند معیار را به صورت فیزیکی و عددی شبیه‌سازی نمودند. نتایج حاصل از تحلیل عددی دوبعدی قائم جریان آشفته با استفاده از معادلات K-ε معیار، که با کاربرد روش حجم محدود و به وسیله ی نرم‌افزار Flow-3D صورت گرفته، به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. پائول و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از پویایی سیالات محاسباتی به ارزیابی عملکرد شبیه عددی سرریز سه سد مختلف پرداختند. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار Flow-3D و شبیه آشفتگی RNG K-ε استفاده گردید. با مقایسه نتایج شبیه عددی و شبیه‌های فیزیکی نتیجه گرفتند که دقت این نرم‌افزار به مقدار بده ی عبوری بستگی دارد و با افزایش بده و ریزتر شدن واحدها مقدار این دقت افزایش می‌یابد. سلطانی و همکاران (۱۳۹۰)، به تأثیر شبیه‌های آشفتگی K-ε معیار و RNG K-ε در بررسی خصوصیات جریان روی سرریز منحنی پیوند به ازای سه بده ی (کم، متوسط و زیاد) پرداختند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان از نرم‌افزار FLUENT و برای تشکیل سطح آزاد جریان از روش حجم محدود (VOF) استفاده شد. نتایج نشان دادند که برای هر سه جریان ورودی،

امتداد دیواره‌های سرریز در زاویه ی ۵۲ درجه، در ایستگاهی خاص ۲/۵ برابر عمق جریان در امتداد دیواره‌های سرریز در زاویه ی همگرایی ۱۵ درجه هستند. همچنین، رفتار جریان در دو جناح سرریز یکسان می‌باشد. سوامی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی ضریب آبگذری جریان سرریز های مورب پرداخته و رابطه ی جدیدی را برای محاسبه ی ضریب بده در این نوع سرریزها ارائه دادند که تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی داشت. بابا زاده و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی عددی اثر همگرایی دیواره‌های سرریز برای مشخصه‌های آبی جریان پرداخته و نتیجه گرفتند که بر اثر تنگ‌شدگی، یک سری موج‌های ضربدری در طول سرریز ایجاد می‌شوند که باعث افزایش نیمرخ سطح آب در اطراف در نزدیکی دیواره‌ها می‌گردند.

تاکنون شبیه‌های آبی مختلفی در کشورمان از سرریزهای تنداب همگرا، همچون شبیه‌های سرریز سدهای آغ چای، دوستی، سهند ساخته و مطالعه شده‌اند. از آن جمله می‌توان به بررسی ویژگی‌های جریان در تنداب با دیواره‌های غیر موازی به روش احجام محدود که به وسیله ی صباغ یزدی (۱۳۸۳) انجام شده است، اشاره کرد. نامبرده همچنین در سال ۱۳۸۴ به محاسبه متغییر های جریان فوق بحرانی در تنداب‌های با دیواره همگرا با استفاده از شار انتقالی جهت مند در مرزهای احجام محدود بی ساختار پرداختند. شبیه پیشنهادی مذکور برای شبیه‌سازی جریان از روی سرریز سد تبارک آباد استفاده شد (بارانی و عباسی، ۱۳۸۴؛ سلطانی و اکبری، ۱۳۹۰؛ یاوری و فتحی مقدم، ۱۳۸۷).

کاکش پور و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی با مطالعه بر روی شبیه فیزیکی سرریز سد بالارود به شبیه سازی عددی آن در نرم افزار FLOW3D پرداختند. نتایج مقایسه بین شبیه عددی و آزمایشگاهی نشان داد که شبیه عددی دارای خطایی معادل ۱۵ درصد است. در پژوهش حاضر با شبیه سازی پرتاب کننده ی جامی دایره ای و دو نوع پرتاب کننده ی جامی مثلثی شکل به ازای ۵ بده ی عبوری از آن، پارامترهای آبی نظیر عمق، سرعت، عدد فرود و عدد کویتاسیون با یکدیگر مقایسه شده اند. بررسی رفتار آبی سه نوع پرتاب کننده نشان می دهد که پرتاب کننده ی جامی دایره ای یک نوع رفتار بینابینی در بررسی در مقایسه با دو نوع پرتاب کننده جامی مثلثی A و B مورد بررسی، در پارامترهای عمق، سرعت، عدد فرود از خود

انحراف از نتایج تجربی برای شبیه K-ε RNG قابل قبول است، درحالی که شبیه K-ε معیار توزیع فشار را روی سرریز به خوبی نمایش نمی‌دهد.

جان و هگر (۲۰۰۰)، پرتابه ی جامی شکل را به صورت یک نهر منشوری مستطیلی شکل، و همچنین به صورت جام دارای یک منحرف کننده ی جریان جانبی، ارزیابی کردند. در این تحقیق اثرات مقیاس در شبیه‌های آبی، توزیع فشار در جام، مسیر پرتابه ی جریان، و شرایط ایجاد امواج ضربه ای در جام‌ها بررسی گردید. نتایج حاکی از تطبیق خوب شبیه عددی با شبیه فیزیکی داشت. هلر و همکاران (۲۰۰۵)، نحوه ی توزیع فشار را روی جام، زاویه ی افشانه پرتابه، خصوصیات موج‌های نوسانی ایجاد شده برای جریان و استهلاك کارمایه این سازه‌ها را بر مبنای شبیه‌های آزمایشگاهی مطالعه کردند، نتایج تحقیق نشان دادند که تأثیر عدد فرود جریان بر انحنای جریان و زاویه ی پرتاب آن در پرتابه ی جامی شکل نسبت به سایر عوامل از اهمیت بالایی برخوردار است. کریمی و همکاران (۱۳۹۱)، با بررسی معادلات حاکم بر انواع شبیه‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار FLUENT به شبیه‌سازی جریان آشفته سه‌بعدی در سازه ی پرتابه ی جامی شکل سرریز پرداخته و نتیجه گرفتند که نتایج به‌دست آمده از شبیه آشفتگی K-ε RNG دارای بهترین تطابق با نتایج آزمایشگاهی هستند.

مهری و فتحی مقدم (۱۳۸۷) شبیه فیزیکی سرریز سد بالا رود را، که از نوع منحنی پیوند دریچه دار با تنداب و پرتابه ی جامی شکل است با استفاده از پلکسی گلاس در مقیاس ۱:۱۱۰ ساخته و به ازاء ۱۴ بده مختلف و متناسب با شرایط واقعی عملکرد آبی پرتابه ی جامی شکل، هندسه ی جام پرتابی، میدان فشار آب پویایی در جام و توان آبشستگی در محل برخورد افشانه پرتابی با پایاب را مطالعه کردند و نتایج نشان دادند که در انتهای جام، به علت تأثیر امواج بالادست و اصطکاک دیواره‌های کناری در مقابل جریان، در بده ی بیشینه سیلاب محتمل، شاهد پس‌زدگی جریان آب از روی دیواره‌های کناری هستیم.

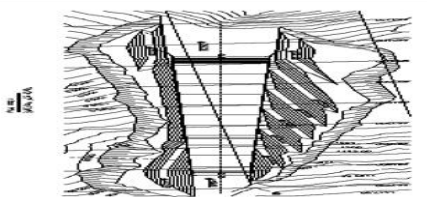
هانت و همکاران (۲۰۰۸) مطالعه‌ای را با کاربرد شبیه فیزیکی سرریز پلکانی همگرایی تحت تأثیر تغییر زاویه ی همگرایی دیواره‌های سرریز، برای محاسبه ی کمینه ارتفاع لازم برای دیواره‌ها انجام دادند. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، به ازای بده ی معین، عمق جریان در

توانند جریان را بر روی پرتاب کننده جامی شبیه سازی نمایند.

هدف از تحقیق حاضر بررسی مشخصه های جریان بر روی سرریز سد گاوشان جهت درک بهتر رفتار و الگوی جریان بر روی سرریزها، و دستیابی به مؤلفه ها و مشخصه های دقیق جریان برای طراحی ایمن این سرریزها است. لذا، در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Flow3D میدان جریان سه بعدی بر روی سرریز همگرای سد گاوشان به صورت عددی، و با استفاده از شبیه آشفنگی - RNG K-ε معیار، شبیه سازی و بررسی شده است.

### مشخصات هندسی و آبی سرریز سد گاوشان

سد مخزنی گاوشان با عنوان طرح ملی گاوشان از نوع سنگریزه ای با هسته ی قائم رسی است که بر روی رودخانه گاو رود، در غرب ایران و در ۲۰ کیلومتری شهرستان کامیاران (۷۵ کیلومتری کرمانشاه) قرار دارد. این سد به منظور آبیاری حدود ۳۱۰۰۰ هکتار از زمین های دشت های بیلهور و میان دربند به وسیله ی شرکت توسعه ی منابع آب اجرا شده است. سرریز سد با دیواره های همگرا به طول کل تاج ۵۰ متر بوده که وجه بالادست آن سطح شیب دار ۱:۱ و وجه پایین دست آن قوسی از یک دایره به شعاع ۱۲ متر و زاویه مرکزی ۲۵/۰۳ درجه تشکیل شده است. عرض تنداب ابتدا ۴۹/۳۵ متر و انتها ۳۱/۲ متر تحت زاویه ۲/۰۷ از دو طرف کاهش عرض می یابد؛ و طول آن ۲۵۱ متر است که به پرتابه ی جامی شکل با شعاع ۲۰ متر که عرض ابتدای آن ۳۱/۲ و عرض انتهای آن ۳۰ متر است، منتهی می شود. در این تحقیق برای واسنجی و صحت سنجی شبیه عددی از داده های نمونه ی آزمایشگاهی سرریز سد گاوشان با مقیاس ۱:۴۰ تهیه شده به وسیله ی موسسه ی تحقیقات آب استفاده گردید. نمایی از عکس های هوایی سد گاوشان و سرریز این سد نیز در شکل شماره (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- نمایی از عکس های هوایی مربوط به سد و

سرریز گاوشان در محل مخزن و تاج سد

نشان می دهد. همچنین رفتار عمق جریان در این سه نوع پرتاب کننده جامی دقیقاً عکس رفتار سرعت و عدد فرود است. در مورد سه پارامتر سرعت و عدد فرود و عمق باید گفت که رفتار قسمت انتهایی تنداب نیز نسبت به جام کاملاً برعکس است.

کریمی پاشاکی و همکاران (۱۳۹۱) با در نظر گرفتن هندسه های متفاوت جام، شامل مقادیر مختلف شعاع انحنای، زاویه ی انحراف جریان و ارتفاع جریان و نیز اعمال شرایط مختلف جریان نظیر مقادیر مختلف عمق، سرعت و عدد فرود ورودی، شبیه سازی عددی جریان آشفته با استفاده از شبیه FLUENT که یکی از نرم افزارهای توانمند در زمینه پویایی سیال محاسباتی می باشد را انجام دادند. این شبیه عددی برای حل جریان آشفته از انواع مختلف شبیه های آشفنگی، اعم از شبیه های یک معادله ای، دو معادله ای، شبیه تنش رینولدزی و شبیه سازی گردابه های بزرگ، استفاده می نماید. در این تحقیق با شبیه سازی جریان آشفته در جا به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن تداخل آب و هوا (دو حالتی) و محاسبه بیشینه بارایی فشار پویایی، مشاهده گردید که شبیه آشفنگی k-ε معیار، بیشترین انطباق را با نتایج حاصل از شبیه آزمایشگاهی نشان می دهد. بر این اساس، محل وقوع بیشینه فشار در جام، به هندسه ی پرتاب کننده ی جامی بستگی دارد و مقدار آن نیز وابسته به عدد فرود جریان ورودی، عمق جریان، زاویه ی انحراف جریان در جام و همچنین شعاع جریان بوده و تقریباً در قسمت میانی گودی جام رخ می دهد.

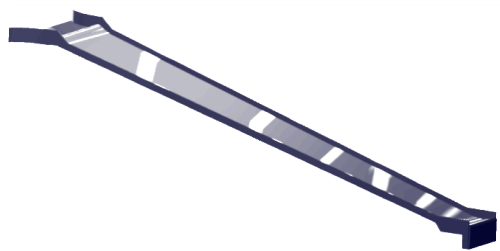
صفوی و همکاران (۱۳۸۹) به مطالعه ی آزمایشگاهی جام های پرتابی در پایانه ی سرریزهای آزاد و دریچه دار پرداختند. آن ها به این نتیجه رسیدند که نحوه ی بهره برداری از سرریز، به ازای بده های کوچک، تاثیر زیادی در طراحی جام ها دارد و ممکن است پرش آبی تشکیل شده بر روی جام، در بده های اولیه سیلاب، ایمنی جام را به خطر اندازد.

اکبری (۱۳۹۰) جریان بر روی پرتاب کننده ی جامی را به روش حجم محدود شبیه سازی کردند و خصوصیات جریان شامل فشار و سرعت را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. برای شبیه سازی عددی از نرم افزار Flow3D و شبیه آشفنگی RNG استفاده شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که روش های عددی با دقت مناسبی می

اشغال شده به وسیله ی سیال می باشد، از این رو مناطقی که  $F=1$  است سیال و مناطقی که  $F=0$  است، حباب و حفره داریم. مسائل جریان دو حالتی، ممکن است متشکل از دو سیال غیرقابل تراکم یا یک سیال غیرقابل تراکم و یک سیال قابل تراکم باشد.  $F$  بیانگر کسر حجمی سیال غیرقابل تراکم در هر حالت بوده، و نواحی مکمل با کسر حجمی  $(1-F)$  بیانگر سیال دومی است (هت و نیکولس، ۱۹۸۱).

### هندسه ی مرزهای جامد و شبکه بندی شبیه عددی

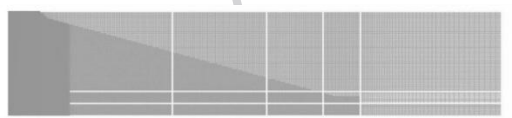
برای تهیه ی هندسه ی مرزهای جامد، همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده، از نرم افزار CATIA، و برای انفعال میدان از یک قطعه محاسباتی استفاده شده است، که در مجموع شامل چهار میلیون حجم محاسباتی می شود. شکل (۳) مرزهای جامد و شبکه بندی شبیه عددی را در تصویر افقی و نیمرخ طولی و سه بعدی نمائی نشان می دهد. شرایط مرزی، مشخصات شبکه و معادله های بکار رفته در جدول (۱) ارائه گردیده اند.



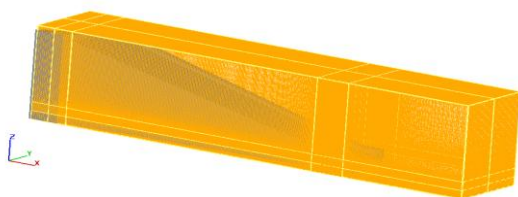
مرزهای جامد



شبکه بندی در تصویر افقی



شبکه بندی در نیمرخ



شکل ۳- هندسه مرزهای جامد و شبکه بندی در تصویر افقی و نیمرخ طولی و سه بعدی نمائی

## حل عددی

### روابط حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله های پیوستگی و معادله ی اندازه ی حرکت، که برای جریان آشفته تراکم ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می شود (فریزی، ۱۹۹۶).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

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

که در آن ها:

$\bar{u}_i$  = مؤلفه ی سرعت متوسط جریان در جهات (x, y, z)

$p$  = مؤلفه ی فشار

$g$  = مؤلفه ی شتاب ثقل

$u'_i$  = مؤلفه ی سرعت لحظه ای جریان در جهت (x)

### معادلات نیمرخ سطح آزاد

موقعیت سیال در جمله های  $F(x,y,z,t)$  تابع حجم سیال (VOF) تعریف می شود. این تابع بیانگر حجم سیال بر واحد حجم و به صورت معادله ی زیر است:

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

که در آن:

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

ضرایب پخش  $U_F$  که به صورت  $(C_F \mu) / \rho$  تعریف می شوند، مقادیر ثابتی هستند که عکس آن بعضی اوقات تحت عنوان عدد اشمیت آشفتگی تعریف می شود. این جمله های پخش تنها برای اختلاط آشفتگی دو سیال، که توزیع آن ها به وسیله ی تابع  $F$  بیان می شود، کاربرد دارد. جمله FSOR مربوط به منبع چگالی RSOR در معادله ی پیوستگی جرم است. مسائل جریان سیال غیرقابل تراکم شامل سیال منفرد با سطح آزاد یا دو سیال با سطح جدایی مشترک است. برای سیال منفرد،  $F$  بیانگر جمع نسبی حجم

### جدول ۱- شرایط مرزی، مشخصات شبکه و معادلات به کار رفته در شبیه عددی

VOF	نوع شبیه	شبکه
مسطحی تطبیقی	نوع شبکه	
۰/۵	متوسط اندازه شبکه (متر)	
۴۰۰۰۰۰	تعداد حجم های محاسباتی	شرایط مرزی
Solid	بدنه سرریز	
Symmetry	مرزهای کناری	
Specific velocity	ورودی	معادله ها
Outlet	خروجی	
RNG	شبیه آشفتنگی	
GMRES	الگوریتم حل معادلات فشار	معادله ها
صریح	الگوریتم حل تنش برشی سیال	
الگوی حجم سیال	مدل سطح آزاد	
۰/۰۱	گام های زمانی حل (ثانیه)	

### شبیه های آشفتنگی

شبیه آشفتنگی عبارت است از یک رویه محاسباتی برای بستن سیستم معادلات جریان متوسط یا معادلات ناویراستوکس متوسط گیری شده ی رینولدز (RANS)، به گونه ای که کم و بیش بخش وسیعی از مسائل جریان را بتوان حل کرد. معمول ترین شبیه های آشفتنگی شامل دودسته اند: دسته اول شبیه های کلاسیک هستند که بر اساس (میانگین زمانی) معادلات رینولدز شامل شبیه صفر معادله ای- شبیه طول اختلاط، شبیه دو معادله ای که شامل شبیه های  $k-\epsilon$  و  $k-\epsilon$  RNG، شبیه معادله ی تنش های رینولدز و شبیه تنش جبری بوده، و دسته ی دوم شبیه ادی بزرگ است که بر اساس میدان یکنواخت شده جریان است.

واضح است شبیه آشفتنگی که برای تمام مسائل مهندسی جوابگو باشد، وجود ندارد. انتخاب شبیه مناسب از بین شبیه های فوق تابع حالت های متعددی مانند فیزیک حاکم بر مسئله ی جریان، وجود یا عدم همزمان چند رژیم متفاوت جریانی در کنار هم، دقت مورد نیاز، امکانات محاسباتی یا به عبارتی ویژگی ها و قدرت پردازش رایانه در دسترس، میزان زمان لازم برای رسیدن به جواب مطلوب. از جمله شبیه های دوعده ای بسیار پر کاربرد در زمینه ی جریان بر روی سازه های آبی شبیه های  $k-\epsilon$  و  $k-\epsilon$  RNG

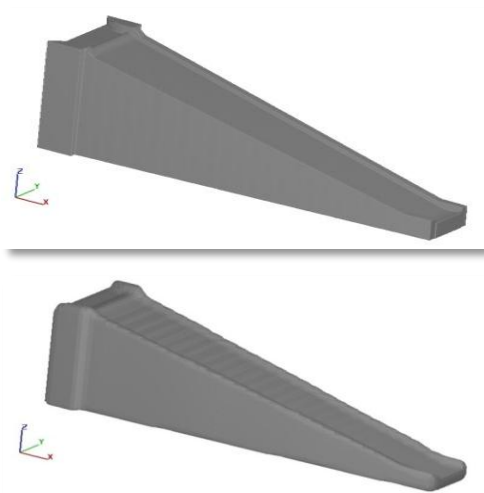
$\epsilon$  هستند. شبیه  $k-\epsilon$  رایج ترین شبیه دو معادله ای است و علاوه بر سادگی قوانین، شناسه نویسی ساده آن نیز از علل جامعیت آن است. در این شبیه میدان آشفته برحسب دو متغیر بیان می شود: ۱- کارمایه ی جنبشی جریان آشفته ی  $k$  ۲- نرخ استهلاک لزوج کارمایه جنبشی آشفته ی  $\epsilon$ . هر چند این شبیه قابلیت پیش بینی بسیاری از مسائل مهندسی را داراست، اما برای برخی از مسائل جریان کاربرد آن مناسب نیست، از جمله جریان هایی با جدا شدن لایه ی مرزی، جریان هایی با تغییر ناگهانی در نرخ متوسط کرنش، جریان سیال چرخان، و جریان روی سطوح خمیده. از این رو، برای رفع مشکلات مذکور و شبیه سازی بهتر آشفتنگی جریان در سازه های آبی از شبیه دیگری که درصد اصلاح این حالت ها برآمده است، بهره برده می شود. در شبیه  $k-\epsilon$  RNG که برای اصلاح برخی از مشکلات شبیه  $k-\epsilon$  معیار بیان شده، دو عمل اصلاحی انجام گرفته: ۱- یک معادله ی انتقال جدید برای  $\epsilon$  ۲- تغییر ثابت های شبیه نسبت به شبیه  $k-\epsilon$  معیار. از این رو قابلیت شبیه سازی جریان هایی که دچار جداشدگی و یا چرخش شده و یا گذرا هستند، است. در این تحقیق پس از شبیه سازی با هر دو شبیه آشفتنگی، از شبیه  $k-\epsilon$  RNG با توجه به شرایط غالب در جریان بر روی سازه های آبی جهت تولید نتایج استفاده شده است.

### حساسیت سنجی شبکه و شبیه عددی

حساسیت شبیه های عددی به شبکه بندی و انفعال میدان حل، همواره یکی از مسائل مهم در شبیه های عددی بوده است. در همین زمینه الگوهای شبکه بندی مختلفی ارائه شده است که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت خاصی می باشند. نرم افزار FLOW-3D، نسبت به مرزهای جامد و شبکه بندی برخورد نسبتاً متفاوتی در مقایسه با سایر بسته های پویائی سیالات محاسباتی دارد. روش کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR): برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد. هندسه ی مسئله به وسیله ی محاسبه ی کسر مساحت و جوه و کسر حجم هر واحد برای شبکه که به وسیله ی موانعی محصور شده اند، تعریف می شود.

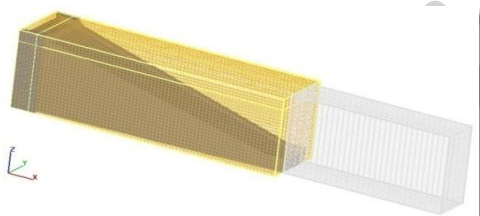
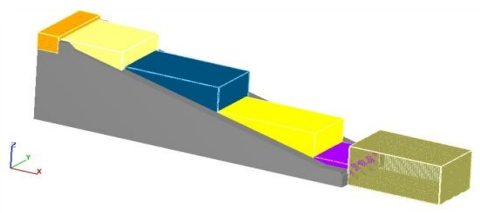
همان طور که از کسر حجم سیال موجود در هر واحد شبکه برای قرارگیری سطوح سیال استفاده شود، از کمیت کسر حجمی دیگری برای تعیین سطوح صلب بهره وری



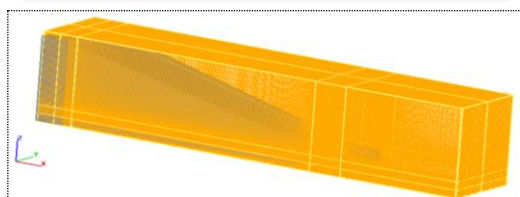
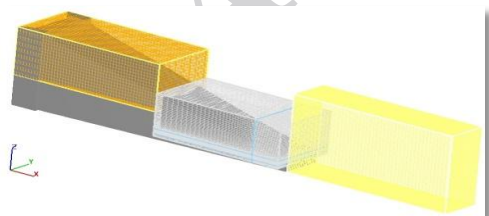


الف) اندازه ی سلول ها 1 cm (ب) اندازه ی سلول ها 5 cm

شکل ۵- نحوه ی عملکرد روش FAVOR با مرزهای جامد



الف) الگوی اول (ب) الگوی دوم

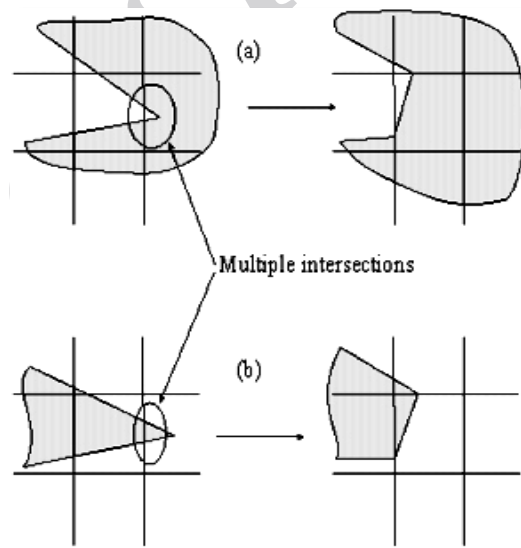


ج) الگوی سوم (د) الگوی چهارم

شکل (۶) - الگوهای مختلف شبکه بندی

گردد. روش (FAVOR) واحدهای ساده مستطیلی را حفظ می کند، در صورتی که می تواند شکل هائی با هندسه ی پیچیده در حد سازگاری با مقادیر جریان میانگین گیری شده برای هر واحد نشان دهد.

در این روش، شکل نهایی موانع به شدت به شبکه ی ساخته شده در اطراف آن ها بستگی دارد. اگر سطح مانع دارای لبه های تیز، مقعر یا محدب باشد، ممکن است محل تقاطع چندگانه ۴ به وجود آید، که این حالت هنگامی رخ می دهد که یک پاره خط شبکه بیش از یک بار به وسیله ی مانع قطع شود. در این رخداد فرض می شود که سلول یا از داخل پر شود، مانند آنچه در شکل (۴-ا) نشان داده شده است، یا از خارج به گونه ای خالی شود که هر پاره خط شبکه را فقط یک بار قطع کند، شکل (۴-ب).



شکل ۴- تغییر شکل موانع در شبکه بندی FLOW- 3D به دلیل رویداد محل تقاطع چندگانه

برای مشخص کردن حدود شبکه بندی، قطعه هایی مشخص می شوند که کلیه اندازه های سازه مطلوب و فضای آزاد در داخل آن تعریف می شود، می توان تمام جزئیات مطلوب را در یک قطعه هم در نظر گرفت. در شکل شماره (۵) نشان داده شده است که شبیه عددی و روش Favor چگونه برخوردی با مانع و مؤلفه های صلب، در شبکه بندی های گوناگون دارد (راهنمای نرم افزار Flow-3D).

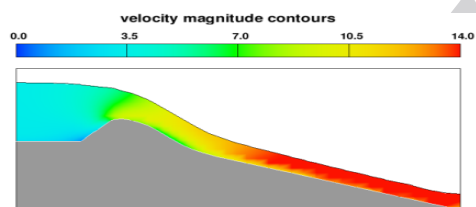
<sup>4</sup>Multiple intersection

جدول (۲) - موقعیت مقاطع اندازه گیری روی سرریز سد گاوشان

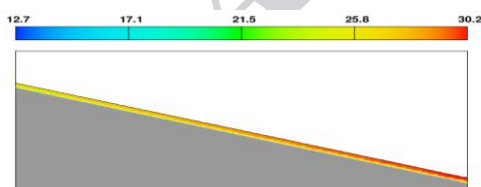
مقطع	فاصله از آستانه ی سرریز (متر)	تراز مقطع (متر)	مقطع	فاصله از آستانه ی سرریز (متر)	تراز مقطع (متر)
D	۰	۱۵۴۵/۵	I	۱۴۲/۶	۱۴۹۹
E	۱۴/۵	۱۵۳۹	J	۱۸۱	۱۴۸۷
F	۴۶/۵	۱۵۲۹	K	۲۰۰/۲	۱۴۸۱
G	۷۸/۵	۱۵۱۹	L	۲۲۲/۷	۱۴۷۴
H	۱۱۰/۶	۱۵۰۹	M	۲۵۵/۱	۱۴۶۴/۰۷
N	۲۶۶	۱۴۶۱/۶۳	O	۲۷۴/۹	۱۴۶۳/۵۳

### عبور جریان در بازه های زمانی مختلف

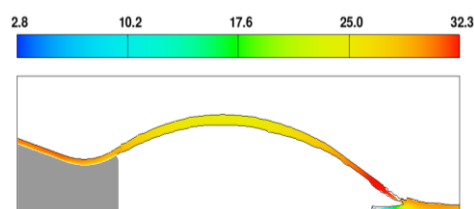
برای استخراج داده های صحیح و قابل اطمینان از یک شبیه عددی یا آزمایشگاهی، برقراری شرایط پایدار جهت جریان ضروری است. در شبیه عددی حاضر زمان مناسب برای اجرای برنامه و رسیدن به شرایط پایدار پس از بررسی چند شبیه معادل ۱۰۰ ثانیه اختیار گردید. در شکل شماره ی (۸) می توان نحوه ی عبور جریان را از روی سرریز در بازه های زمانی مختلف مشاهده کرد. جریان بعد از گذشت ۴۰ ثانیه از اجرای برنامه به حالت پایداری می رسد.



الف) جریان بر روی سرریز منحنی پیوندی



ب) جریان در مسیر تنداب

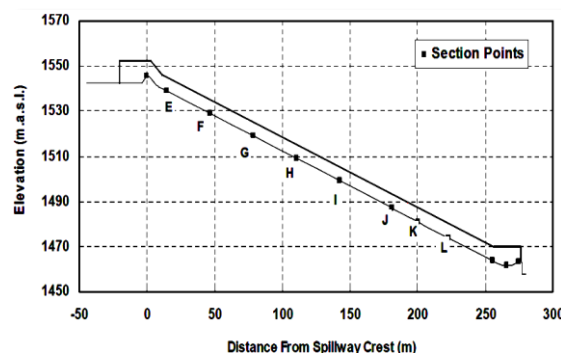


شکل ۷- نحوه ی شکل گیری جریان در شبیه عددی

با توجه به مباحث فوق می توان نتیجه گرفت که ایجاد مرزهای جامد مناسب در شبکه بندی شبیه عددی با استفاده از نرم افزار Flow 3D، به خصوص در شبیه هایی با هندسه پیچیده، از اهمیت بالایی برخوردار است و انتخاب مناسب آن ها می تواند دقت محاسبات را بیفزاید. در تحقیق حاضر تعداد شبکه های شبیه در سه جهت مختصات کمی بیشتر از حد لازم به نظر می رسد. اما با توجه به هندسه ی شبیه، استفاده از شبکه بندی مذکور امری ضروری بوده است. در شکل شماره ی (۶) الگوهای مختلف شبکه نشان داده شده است که بین آن ها الگوی چهارم به دلیل استفاده از یک قطعه ی محاسباتی که باعث کاهش خطا می گردد، انتخاب شده است.

### تحلیل نتایج

نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر شامل متوسط سرعت جریان، عمق آب و فشار ایستائی در کف در مقاطع ذکر شده در طول سازه سرریز سد گاوشان به ازاء چهار بده ی ۶۰۰، ۸۰۰، ۹۵۰ (بده ی سیلاب به ازاء دوره ی بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله) و ۱۳۵۰  $m^3/s$  (بده ی بیشینه سیلاب محتمل) است. انتخاب ۴ بده ی فوق بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی و مشاهده عملکرد سرریز تحت بده های کمینه و بیشینه بوده است. اندازه گیری پارامترهای آبی مانند عمق آب، فشار در کف و سرعت جریان روی سرریز در امتداد محور تاج سرریز (در ۵ محور)، و همچنین بر روی تنداب و پرتابه ی جامی شکل در سه محور (راست، چپ و وسط) مطابق شکل (۶) انجام گرفت. شکل (۷) نیز نتایج ترسیمی نحوه ی شکل گیری جریان در شبیه عددی را بر روی سرریز منحنی پیوند، مسیر تنداب و پرتابه ی جامی شکل نشان می دهد.

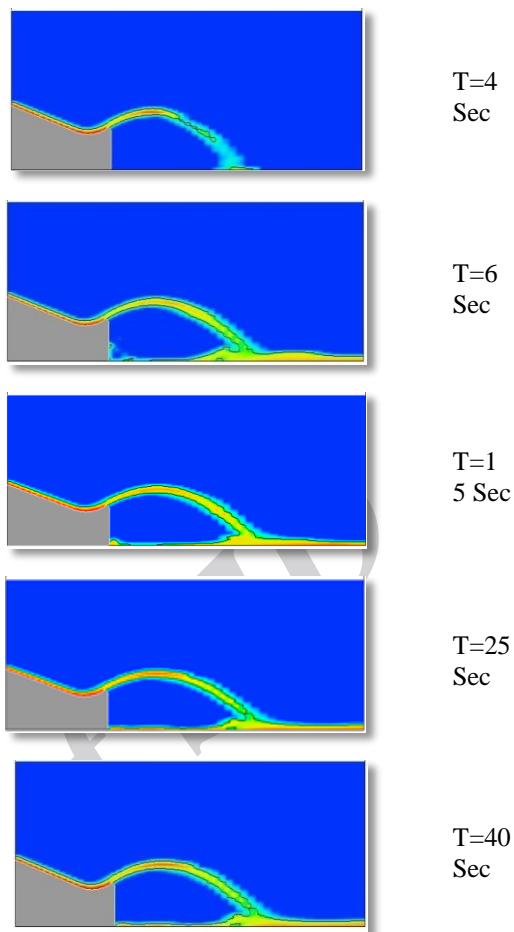


شکل ۶- موقعیت مقاطع اندازه گیری سرعت و عمق آب بر روی سرریز



جدول (۲) - نتایج عمق و سرعت متوسط آزمایشگاهی جریان روی تنداب به ازای چهار بده

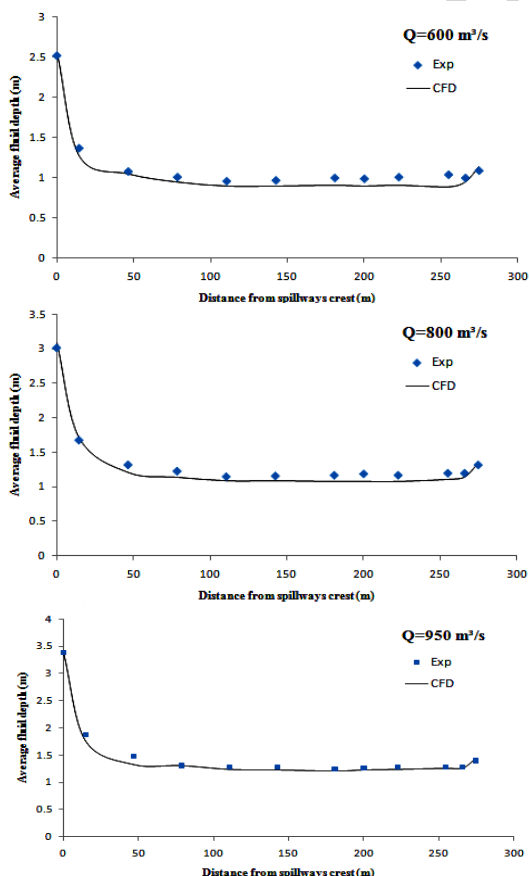
بده	$Q = 600\text{cms}$		$Q = 800\text{cms}$	
	عمق	سرعت	عمق	سرعت
E	۱/۳۷	۱۲/۲۲	۱/۶۸	۱/۶۸
F	۱/۰۸	۱۸/۰۸	۱/۳۲	۱۸/۵۸
G	۱/۰۱	۲۲/۰۳	۱/۲۳	۲۲/۶۳
H	۰/۹۶	۲۲/۸۸	۱/۱۵	۲۵/۱۶
I	۰/۹۷	۲۴/۶۳	۱/۱۶	۲۶/۲۶
J	۱/۰۰	۲۶/۶۴	۱/۱۷	۲۸/۱۸
K	۰/۹۹	۲۷/۱۴	۱/۱۹	۲۹/۱۶
L	۱/۰۱	۲۷/۶۸	۱/۱۷	۲۹/۵۵
دبی	$Q = 950\text{cms}$		$Q = 1350\text{cms}$	
	عمق	سرعت	عمق	سرعت
E	۱/۸۸	۱۲/۹۱	۲/۴۰	۱۳/۱۹
F	۱/۴۸	۱۸/۸۸	۱/۸۴	۱۹/۱۷
G	۱/۳۱	۲۳/۰۶	۱/۶۱	۲۳/۵۵
H	۱/۲۸	۲۶/۲۶	۱/۵۶	۲۶/۶۸
I	۱/۲۸	۲۶/۶۳	۱/۶۰	۲۷/۹۲
J	۱/۲۵	۲۹/۳۲	۱/۵۹	۳۰/۱۳
K	۱/۲۷	۲۹/۹۲	۱/۵۷	۳۰/۸۲
L	۱/۲۸	۳۱/۲۶	۱/۶۰	۳۱/۶۵



شکل ۸ - نحوه عبور جریان در بازه‌های زمانی مختلف

### نیمرخ عمق جریان

مقایسه ی مقادیر عددی و آزمایشگاهی میانگین عمق جریان روی سرریز در شکل (۹) ارائه شده است. مقایسه ی نتایج شبیه عددی و آزمایشگاهی حاکی از انطباق قابل قبول نتایج شبیه عددی با نتایج نظیر آزمایشگاهی است. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه عمق جریان در تاج سرریز بوده و به تدریج از عمق جریان کاسته شده است. کاهش عمق جریان در سرریز سد گاوشان به دلیل همگرایی دیواره‌های سرریز برخلاف سرریزها با دیواره‌های موازی به حالت یکنواخت نرسیده و دارای نوسان ها و نامنظمی‌هایی در عمق متوسط جریان است. در بده‌های پایین جریان، عمق جریان به علت تأثیر بیشتر زبری بستر و جداری مسیر جریان از نوسان های بیشتری برخوردار بوده و در نتیجه خطاهای محاسباتی بیشتری را نسبت به بده‌های بالا نشان می‌دهند. همان گونه که از نتایج عمق و سرعت متوسط جریان در جدول (۲) نیز مشخص است،



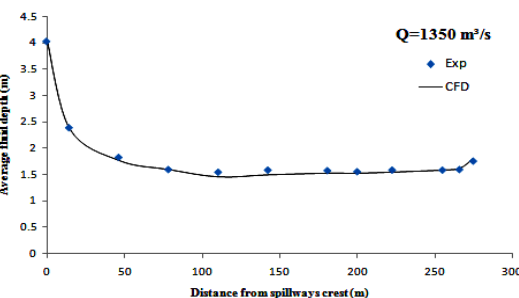
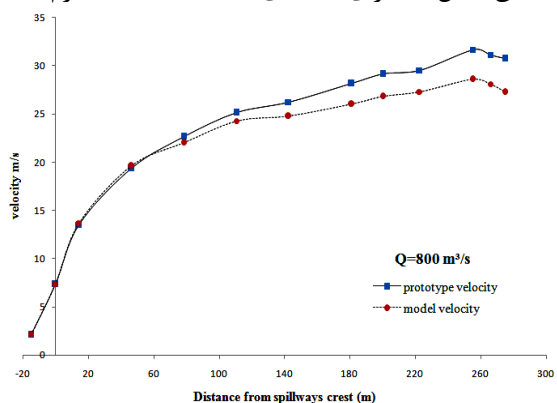
تنداب از تطابق مناسبی برخوردارند ولی با ورود جریان به داخل جام پرتابی به دلیل اغتشاشات بالای جریان، که این امر قرائت نتایج آزمایشگاهی را با خطای زیادی همراه می کند، خطای بین نتایج آزمایشگاهی و عددی افزایش یافته است.

نتایج عددی و آزمایشگاهی تا فاصله ی ۱۱۰/۶ متر از تاج سرریز، یعنی نقطه ی H در جدول (۲) تطابق بسیار خوبی دارند، ولی از این نقطه به بعد شاهد افزایش خطا بین نتایج هستیم. شکل (۱۰) مقایسه ی نتایج سرعت متوسط جریان حاصل از شبیه عددی و اندازه گیری های آزمایشگاهی را در امتداد محور سرریز نشان می دهد.

### توزیع فشار

#### توزیع فشار در طول سرریز

مقادیر فشار ایستائی در طول سرریز برای ۱۳ مقطع مطابق شکل ۱۱ برای بده های مختلف آمده اند. لازم به

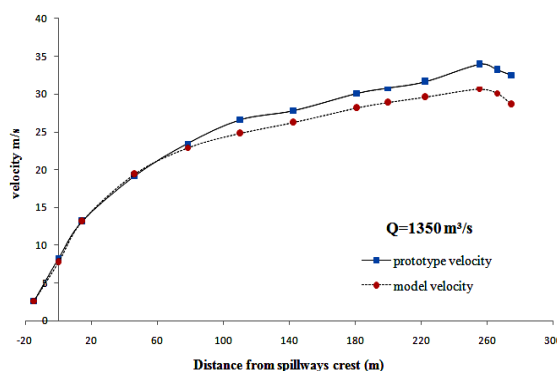


شکل ۹- مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی عمق متوسط جریان روی سرریز

زاویه ی همگرایی انتخابی به گونه ای است که جریان عبوری در طول تنداب همگرا بدون امواج عرضی بوده و سطح آب دارای نوسان های حداقلی هستند.

### توزیع سرعت متوسط جریان

مشابه روند اندازه گیری سرعت متوسط جریان در شبیه آزمایشگاهی، محاسبه ی سرعت جریان در شبیه عددی حاضر نیز در ۰/۶ عمق از سطح آزاد آب انجام گرفته است. تغییرات سرعت بر روی سرریز سد گاوشان برخلاف عمق آب بوده، به طوری که در ابتدای تنداب جریان شتاب گرفته، لذا سرعت در بدو ورود به تنداب افزایش می یابد. بیشترین مقدار سرعت در بده ی طراحی (PMF) مربوط به قسمت ابتدای جام و معادل ۳۰ متر بر ثانیه است. با توجه به نحوه ی برخورد شبکه بندی نرم افزار با مرزهای جامد در شبیه عددی، کف تنداب در شبیه به صورت کاملاً مسطح شبیه سازی نمی گردد و دارای ناهمواری هائی است، که این مسئله باعث کاهش سرعت در طول تنداب و تجمع این خطا در شبیه عددی نسبت به شبیه آزمایشگاهی می گردد. در نتیجه، رفته رفته از میزان سرعت در طول تنداب کاسته شده و مقادیر عددی و آزمایشگاهی اختلاف معنی داری پیدا می کنند. همان گونه که از نتایج صحت سنجی سرعت جریان برای بده های ۶۰۰ و ۱۳۵۰ متر مکعب بر ثانیه مشخص است، نمودار سرعت جریان بر روی تنداب با شیب تندی در حال افزایش است ولی در محدوده ی ورود جریان به داخل جام به دلیل اغتشاشات به وجود آمده و شیب معکوس جام پرتابی، شیب نمودار سرعت جریان افزایش کمتری یافته، به طوری که رفته رفته به سمت انتهای جام از روند صعودی سرعت جریان کاسته شده و روند نزولی به خود گرفته است. همانگونه که از نتایج مشخص است، نتایج شبیه عددی و آزمایشگاهی بر روی



شکل ۱۰- مقایسه ی مقادیر عددی و آزمایشگاهی

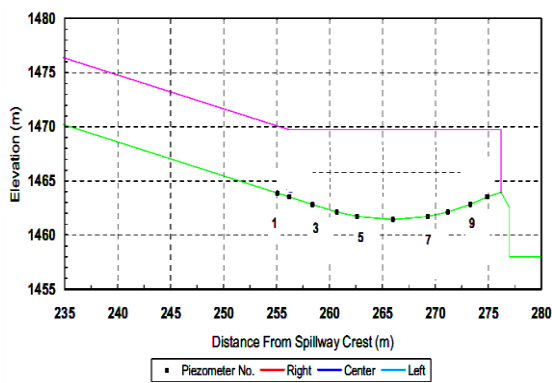
#### تغییرات سرعت متوسط جریان در محور سرریز

ذکر است که نتایج حاصل از شبیه عددی حاضر نیز همانند اندازه گیری های شبیه آزمایشگاهی، میانگین مقادیر در هر مقطع را نشان می دهد. همان گونه که در شکل ۱۱ نیز مشخص است، در حالت کلی تغییرات فشار در طول

با افزایش بده نیز تغییراتی در میزان فشار بر روی سرریز رخ داده است که شامل بروز فشارهای منفی بیشتر در تاج برای بده ی  $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ ، تغییرات قابل ملاحظه فشار در نزدیکی گذرگاه شیب دار هواده و افزایش قابل ملاحظه فشار در جام است. نتایج به دست آمده از شبیه عددی همخوانی خوبی با اندازه گیری های شبیه آزمایشگاهی داشته و بیانگر آن است که شبیه عددی به خوبی توانسته است که توزیع فشار را در بستر سرریز شبیه سازی کند. لازم به ذکر است که هواده در فاصله ی ۱۹۰ متر، و خط القعر جام در فاصله ی ۲۶۶ متری از تاج سرریز قرار گرفته است.

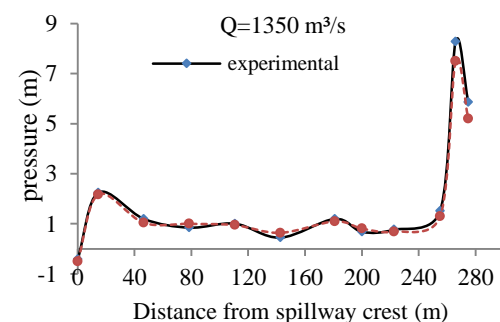
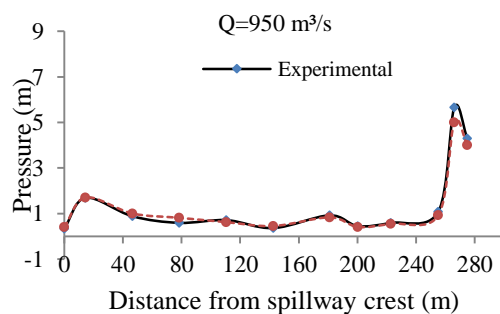
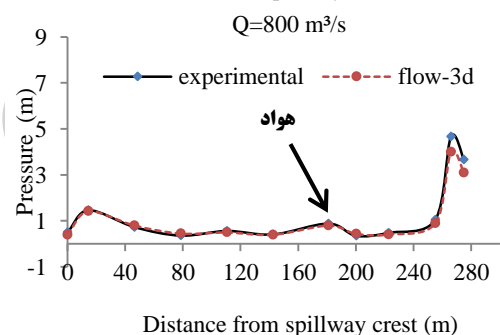
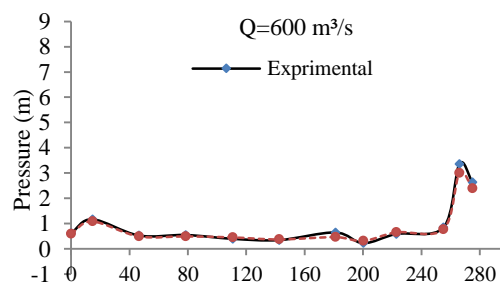
### توزیع فشار متوسط ایستائی در بستر پرتابه ی جامی شکل

در شبیه فیزیکی، جهت ثبت تغییرات فشار متوسط ایستائی در کف پرتابه ی جامی شکل در مقاطعی فشارسنج نصب شده، که موقعیت مکانی آنها در شکل (۱۲) آورده شده است. همان گونه که از شکل ۱۳ مشخص است، شبیه عددی با درصدی کمتر نیمرخ فشار در کف شبیه آزمایشگاهی را تخمین زده است. با توجه به نحوه ی برخورد شبکه بندی نرم افزار با مرزهای جامد در شبیه عددی، کف تنداب در شبیه به صورت کاملاً مسطح شبیه سازی نگشته و دارای ناهمواری هائی است، که این مسئله باعث خطاهائی در شبیه عددی نسبت به شبیه آزمایشگاهی می گردد. میزان فشار در فشارسنج های واقع در پرتابه ی جامی شکل به دلیل انحنای و تغییر مسیر خطوط جریان به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

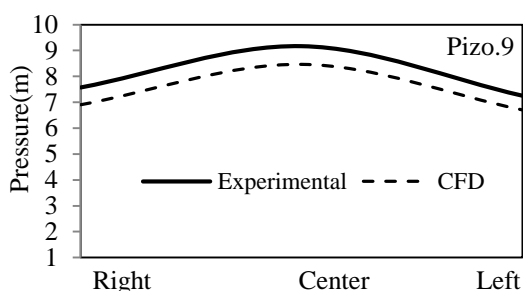


شکل ۱۲- محل قرار گیری پیزومترها در کف پرتابه

سرریز و پرتابه ی جامی شکل در محل های زیر قابل تصور است. در تاج منحنی پیوندی، به دلیل انحنای و تحدب بستر تاج، فشار کاهش یافته، در محل گذرگاه شیب دار هواده فشار افزایش یافته و بلافاصله بعد گذرگاه شیب دار هواده فشارها کاهش یافته اند. به محض ورود به پرتابه ی جامی شکل فشار به میزان قابل ملاحظه ای افزایش پیدا می کند که ناشی از تغییر در مسیر جریان به علت انحنای و تقعر بستر جام پرتابه جامی شکل است.



شکل ۱۱- مقایسه ی مقادیر عددی و آزمایشگاهی تغییرات فشار متوسط ایستائی در کف در امتداد طولی سرریز



شکل ۱۳- پروفیل توزیع فشار متوسط ایستائی در مقاطع مختلف کف پرتابه ی جامی شکل

با توجه به اینکه روش (VOF)، در عمل به صورت تک‌حالتی عمل نموده، از حالت دوحالتی تنها برای محاسبه ی سطح آزاد سیال استفاده کرده، و هوا را تنها به سطوح سیال وارد می‌کند، در رساندن هوا به عمق سیال، که آنچه در عمل اتفاق می‌افتد، دچار مشکل می‌شود. روش (VOF) قادر به شبیه‌سازی حباب‌های هوای ورودی به جریان نبوده و از تعادل بین نیروهای کشش سطحی آب، نیروی ناشی از آشفتگی، و نیز تغییرات چگالی ناشی از ورود هوا، برای تعیین سطح آزاد سیال استفاده می‌کند. از این رو در شکل شماره ی ۱۳، ضعف روش (VOF) در شبیه کردن ورود هوا به جریان در توزیع فشار خودنمایی می‌کند. در شبیه فیزیکی ورود هوا به جریان باعث افزایش جزئی عمق جریان در نهر نسبت به شبیه عددی می‌شود. البته به نظر می‌رسد مقداری از این اختلاف، ناشی از خطای ایجادشده در شبیه عددی به واسطه ی ضعف شبیه‌های آشفتگی باشد.

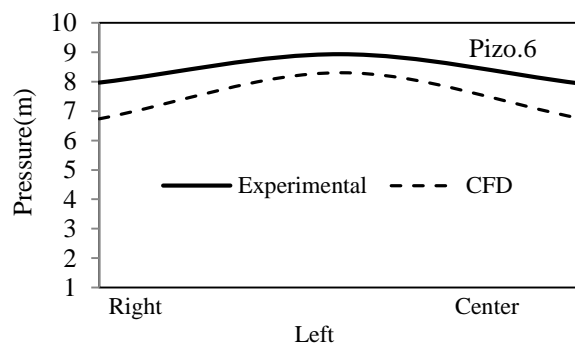
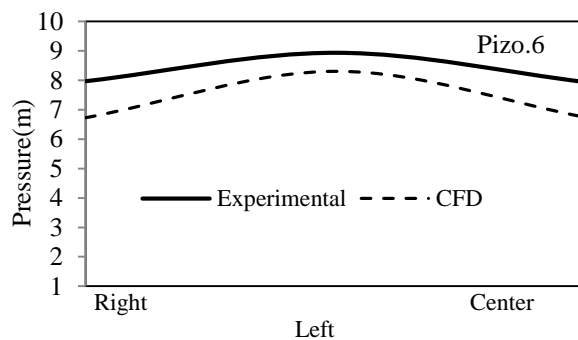
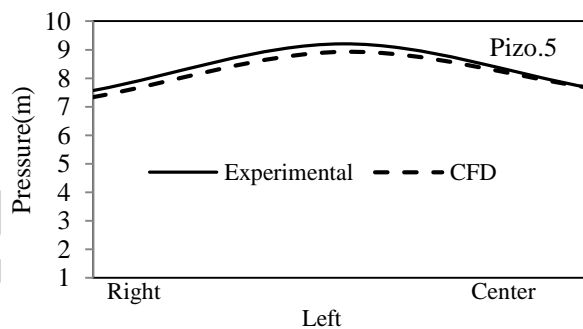
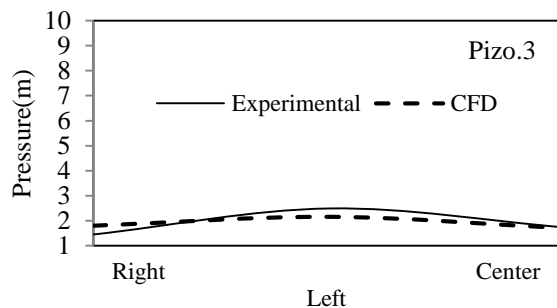
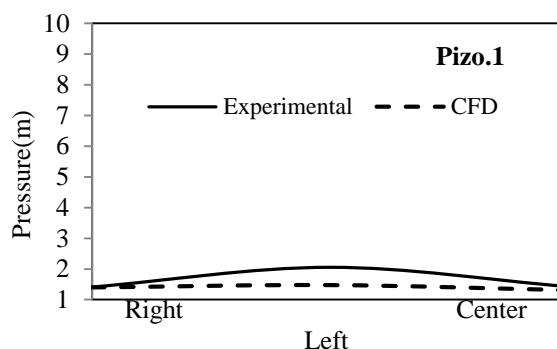
### نتیجه‌گیری

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای متوسط سرعت، فشار متوسط ایستائی و عمق جریان برای سرریز سد گاوشان نتایج زیر حاصل می‌گردد.

(۱) نرم‌افزار FLOW-3D به‌عنوان یک برنامه ی تحلیلی جریان، از قابلیت مناسبی جهت شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد برخوردار است.

(۲) بیشترین خطا در محاسبات از لحاظ مکانی در ناحیه ی پرتابه ی جامی شکل به علت آشفتگی و تلاطم شدید جریان، و عدم امکان شبیه‌سازی حباب‌های ورودی به جریان به وسیله ی شبیه عددی در این ناحیه مشاهده‌شده است.

(۳) در بده‌های پایین جریان، عمق و فشار متوسط بستر جریان به علت تأثیر بیشتر زبری بستر و جداره ی مسیر



۴) بارانی غ ح، عباسی ا، ۱۳۸۴. بهینه‌سازی شعاع پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل مسطح با استفاده از آنالیز ابعادی. پنجمین اجلاس هیدرولیک ایران، ۱۷ الی ۱۹ آبان ماه، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

۵) پاشاکی م ح، و شفاعی بجستان م، ۱۳۹۱. شبیه سازی سه بعدی نوسانات فشار پویایی در پرتابه جامی با استفاده از شبیه FLUENT. نهمین کنگره ی بین المللی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۶) کاکش پور م، و ذاکری نیبری م، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر شکل پرتاب کننده جامی در سرریز تندابا استفاده از شبیه عددی. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک جلد (۲۳)، شماره (۵) ۱۳۹۵.

۷) سلطانی ا، و اکبری غ، ۱۳۹۰. بررسی شبیه‌های جریان آشفته بر روی سرریز اوجی. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان.

۸) مهری م، و فتحی مقدم ا، ۱۳۸۷. بررسی عملکرد آبی پرتاب‌کننده جامی در پایاب سرریز سد بالا رود به کمک شبیه فیزیکی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۲۳ الی ۲۵ مهرماه، دانشگاه تبریز، تبریز.

۹) موسسه تحقیقات آب (وابسته به وزارت نیرو)، ۱۳۸۲. گزارش نهائی شبیه هیدرولیکی سرریز سد گاوشان.

10) Bruce M, Savage M, Gohnson C. 2001. Flow over Ogee Spillways, Physical and Numerical Model Case Study. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 127(8): 145-152.

11) Cassidy J. J. 1965. Irrotational flow over spillway of finite height. Journal of Engineering Mechanical Division. ASCE. 91(6): 157-173.

12) Ferziger J, Peric M. 1996. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer Verlag.

13) Johnson M, Savage B. 2006. Physical Numerical Comparison of Flow over Ogee Spillway in the Presence of Tail Water. Journal of Hydraulic Engineering. 132 (12): 1353-1357.

14) John R, Hager W.H. 2000. Flip Bucket Without and with Deflectors. Journal of Hydraulic Engineering. 1269(11): 837-845.

جریان از نوسان های بیشتری برخوردار بوده، و در نتیجه خطاهای محاسباتی بیشتری را نسبت به بده های بالا نشان می‌دهد.

۴) زاویه ی همگرایی ۲/۰۷ درجه ی دیواره‌های تنداب زاویه همگرایی بهینه برای ممانعت از تشکیل امواج عرضی و عدم نیاز به افزایش ارتفاع دیواره‌های سرریز همگراست.

۵) سرعت بر روی انحنای تاج سرریز افزایش سریع و ناگهانی داشته و در طول تنداب این روند افزایشی دنبال می‌شود تا جایی که بیشترین میزان سرعت در انتهای تنداب، یعنی ابتدای پرتابه ی جامی شکل، در بده ی ۱۳۵۰ مترمکعب بر ثانیه معادل ۳۰ متر بر ثانیه است.

۶) در تمامی بده ها برخلاف افزایش سرعت، عمق آب در طول جریان به تدریج کاهش می‌یابد. اما این کاهش عمق جریان به دلیل وجود دیواره‌های همگرای جریان دارای شیب کاهشی ملایم‌تری هستند و نامنظمی‌هایی نیز به دلیل وجود دیواره‌های فوق در عمق متوسط جریان قابل مشاهده اند.

۷) در طول سرریز با افزایش میزان بده، مقدار فشار ایستائی متوسط در کف نیز افزایش می یابد. توزیع فشار در طول سرریز تا قبل از ورود به پرتابه ی جامی شکل دارای نوسان هائی است. میزان فشار در پرتابه ی جامی شکل به دلیل انحنای پرتابه و تغییر مسیر خطوط جریان نسبت به سرریز به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می‌یابد.

۸) با افزایش بده تغییراتی در میزان فشار، همچون بروز فشارهای منفی در تاج برای بده حداکثر، تغییرات قابل ملاحظه فشار در نزدیکی گذرگاه شیب دار هواده و افزایش قابل ملاحظه فشار در جام رخ داده است.

## منابع

۱) اکبری غ ح، ۱۳۹۰. مطالعه آزمایشگاهی اثر تغییرات بده و عمق پایاب بر بیشترین عمق آبشستگی. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران گیلان، ۱۷ تا ۱۹ آبان ماه، دانشگاه گیلان، گیلان.

۲) بابا زاده و، مناف پور م، و محمدی م، ۱۳۹۱. بررسی عددی اثر همگرایی دیواره‌های سرریز بروی مشخصه‌های آبی جریان. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

۳) بیرامی م ک، ۱۳۸۲. سازه‌های انتقال آب. نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ چهارم.

- 15) Heller V, Hager W. 2005. Ski jump hydraulic. Journal of hydraulic engineering. ASCE. 131(5): 347-355.
- 16) Hirt C, Nichols B. 1981. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Hydraulic Engineering. (39): 201-225.
- 17) Paul G, Chanel H, John K. 2008. Assessment of Spillway Modeling Using Computational Fluid Dynamics. Journal of Civil Engineering. 35: 1481-1485.
- 18) USBR. 1990. Hydraulic design of spillway. Chap 7.

Archive of SID