



دانشکده مهندسی عمران و معماری

پایان نامه کارشناسی ارشد

# بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر شکل لبه دریچه بر میدان جریان پایین دست دریچه های تحتانی

محمدجواد منظمی

استاتید راهنما :

دکتر احمد احمدی

دکتر محمدرضا کاویانپور

ماه و سال انتشار : بهمن ۱۳۹۰





دانشکده مهندسی عمران و معماری

گروه عمران

# بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر شکل لبه دریچه بر میدان جریان پایین دست دریچه های تحتانی

دانشجو: محمدجواد منظمی

اساتید راهنما:

دکتر احمد احمدی

دکتر محمدرضا کاویانپور

استاد مشاور:

مهندس رضا روشن

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه های هیدرولیکی

بهمن ۱۳۹۰



فارغ التحصیلی زمان سپاس از کسانی است که به ما کمک کرده اند این

سالهای سخت را بگذرانیم:

تقدیم به خانواده عزیزم

## تشکر و قدردانی

اینک که این رساله به سرانجام رسیده است بر خود واجب می‌دانم تا مراتب قدردانی و سپاس بی‌پایان خود را از استاد بزرگوارم جناب آقای **دکتر کاویانپور** ابراز نمایم، چرا که در تمام مدت انجام این پایان نامه با توجه ویژه و دلسوزانه مرا در بهبود کیفی این رساله یاری نمودند. بی‌نهایت مسرورم که افتخار شاگردی آن بزرگوار نصیب من گردید.

همچنین از استاد ارجمندم جناب آقای **دکتر احمدی** که با نظارت کارگشای خود مرا مساعدت نمودند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

و نیز از کلیه پرسنل مؤسسه تحقیقات آب ایران بویژه جناب آقای **مهندس رضا روشن** و جناب آقای **مهندس عباس مقسومی** که در تمامی مراحل مرا یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از دوستان عزیزم **مهندس حمیدرضا نونهال** و **مهندس امیراحمد پایان** نیز بخاطر کمکهایشان در بخش آزمایشگاهی و گردآوری مقالات نهایت سپاسگزاری را می‌نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب **محمدجواد منظمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران- سازه های هیدرولیکی** دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر شکل لبه دریچه بر میدان جریان پایین دست دریچه های تحتانی** تحت راهنمایی **دکتر احمد احمدی** به عنوان استاد راهنمای اول و **دکتر محمدرضا کساویانپور** به عنوان استاد راهنمای دوم متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام << دانشگاه صنعتی شاهرود >> و یا << Shahrood University of Technology >> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (با بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیرشده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد.

## چکیده فارسی:

تونل های تخلیه کننده تحتانی یکی از سازه های جنبی سدها هستند که با توجه به نقش ویژه آنها در تخلیه و کنترل سیلاب و آبیاری پایین دست نیازمند طراحی دقیق می باشند و همواره اطمینان از عملکرد مناسب مجرا و تأسیسات آن باید مورد بررسی قرار گیرد. بدلیل اهمیتی که این سازه ها دارند و به لحاظ سرعت زیاد جریان (بخصوص در محل قرارگیری دریچه) و همچنین عدم اطلاعات کافی در زمینه عملکرد مناسب هیدرولیکی آنها، انجام تحقیقات و بررسی های بیشتری در این زمینه احساس می گردد.

وجود جریان تحت فشار در بالادست دریچه تخلیه کننده ها، وجود افت انرژی جریان به علل مختلف و هم چنین مقادیر ناچیز نسبت بازشدگی دریچه به هد آب روی آن باعث می شود استفاده از نتایج بدست آمده از روش های تئوری همواره مورد بررسی و صحت سنجی قرار گیرند. بر این اساس در این پایان نامه، ابتدا با استفاده از روش تجربی، آزمایش های موردنظر بر روی مدل آزمایشگاهی ساخته شده در مرکز تحقیقات آب ایران به انجام رسید. سپس مدل عددی شبیه سازی گردید و آزمایش ها بر روی آن ادامه پیدا کرد. بدین ترتیب که در گام اول با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی، نتایج حاصل از مدل عددی مورد کنترل، کالیبراسیون و صحت سنجی قرار گرفتند. پس از حصول اطمینان از صحت نتایج، در گام بعدی مدل عددی برای حالات جدید که مدل تجربی در دسترس نبود، گسترش یافت. آزمایش های مدل فیزیکی در حالت عدم وجود هواده جهت برداشت مقادیر فشارهای هیدروستاتیک و برای هد آب ۲ و ۵ متر، بازشدگی ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد تحت زاویه دریچه موجود (که ۲۲/۵ درجه بود) به انجام رسید. در مرحله بعد جهت بررسی تأثیر شکل دریچه بر میدان جریان پایین دست (شامل میدان فشار، سرعت و پروفیل جریان)، دریچه با زاویه لبه ۴۵ درجه در مدل عددی تهیه گردید و برای هد های ۲ و ۵ متر و همان بازشدگی های ۵۰ و ۷۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

● نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش زاویه لبه دریچه از ۲۲/۵ به ۴۵ درجه، فشار

هیدروستاتیک در کلیه نقاط مجرا افزایش خواهد یافت و نیز پروفیل جریان پایین دست دریچه



عمق کمتری پیدا خواهد نمود، در نتیجه دبی عبوری از زیر دریچه کاهش خواهد یافت. یا بعبارت دیگر، با ثابت نگهداشتن دبی، هد آب درون مخزن افزایش یافته که منجر به افزایش فشار در کلیه نقاط مجرا خواهد شد. همچنین دیده شد که روند کلی حاکم بر تغییرات اندیس کاویتاسیون، روند افزایشی است که این مطلب بخوبی با توصیه های موجود که زاویه ۴۵ درجه را توصیه می کنند سازگار است. و نیز با بررسی نیروهای وارد بر دریچه نیز ملاحظه گردید که با تغییر زاویه از ۲۲/۵ به ۴۵ درجه، نیروی پایین کشنده که در اثر فشار منفی در زیر دریچه ایجاد شده است تبدیل به نیروی بالابرنده می گردد که از اثرات مثبت زاویه ۴۵ درجه بحساب می آید.

**کلمات کلیدی:** تونل تخلیه کننده تحتانی، عدم هوادهی، زاویه لبه دریچه، درصد بازشدگی، میدان جریان

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه :

- 1. Numerical and experimental investigation of the effect of gate lip on flow domain downstream of outlet gates -IAHR-APD- South Korea - 2012, August**
- 2. Numerical and experimental study of the gate lip effect on flow aeration downstream of outlet gate - 6<sup>th</sup> International symposium on advances in science and technology - Malaysia - 2012, March**
- 3. Numerical and experimental investigation of the effect of gate lip on cavitation of outlet gates - 10<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering - ACE - Turkey - 2012, October**

## فهرست مطالب:

### فصل اول - مقدمه

- ۱-۱- کلیات ..... ۲
- ۲-۱- اهداف تحقیق ..... ۴
- ۳-۱- ساختار پایان نامه ..... ۹

### فصل دوم - تخلیه کننده تحتانی و مسائل مرتبط

- ۱-۲- تخلیه کننده تحتانی ..... ۱۳
- ۲-۲- کاویتاسیون ..... ۲۰
- ۳-۲- مروری بر مطالعات قبل ..... ۲۳
- ۴-۲- معادلات حاکم ..... ۲۵

### فصل سوم - مدل فیزیکی

- ۱-۳- مشخصات کلی سد مورد مطالعه ..... ۲۹
- ۲-۳- مشخصات کلی سیستم انحراف ..... ۲۹
- ۳-۳- مجرای تخلیه کننده تحتانی ..... ۳۱
- ۴-۳- مقیاس مدل ..... ۳۲
- ۵-۳- اجزاء مدل ..... ۳۴
- ۶-۳- ابزارهای اندازه گیری ..... ۴۰
- ۷-۳- خطاهای اندازه گیری ..... ۴۵
- ۸-۳- نحوه انجام آزمایش ها ..... ۴۷

## فصل چهارم - مدل عددی

۵۰	..... ۱-۴- مقدمه
۵۴	..... ۲-۴- شبیه سازی هندسی توسط نرم افزار Gambit
۵۴	..... ۳-۴- مدل کامپیوتری Fluent
۵۹	..... ۴-۴- مدل های آشفتگی در نرم افزار
۶۵	..... ۵-۴- روشهای مدل سازی جریان دوفازی
۶۹	..... ۶-۴- معرفی مدل عددی

## فصل پنجم - ارائه نتایج

۷۶	..... ۱-۵- مقدمه
۷۶	..... ۲-۵- نتایج مدل
۷۸	..... ۳-۵- ارائه نتایج
۸۹	..... ۴-۵- مقایسه نتایج

## فصل ششم - نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۱۲۳	..... ۱-۶- خلاصه نتایج بدست آمده
۱۲۶	..... ۲-۶- پیشنهادات برای ادامه مطالعه
۱۲۷	..... منابع

## فهرست اشکال:

- شکل (۱-۱) زاویه لبه دریچه ..... ۵
- شکل (۱-۲) کاویتاسیون ..... ۲۱
- شکل (۲-۲) شیار دریچه ..... ۲۵
- شکل (۱-۳) برش طولی سیستم انحراف سد مخزنی مورد مطالعه ..... ۳۰
- شکل (۲-۳) مقطع و پلان کالورت، تخلیه‌کننده و حوضچه آرامش سد مخزنی مورد مطالعه ..... ۳۰
- شکل (۳-۳) نمایی از مخزن تأمین هد مدل ..... ۳۵
- شکل (۴-۳) نمایی از کالورت بالا دست ..... ۳۶
- شکل (۵-۳) (مقطع و پلان) نمایی از مجرای بالادست دریچه اضطراری ..... ۳۶
- شکل (۶-۳) (مقطع و پلان) نمایی از شیار و مجرای پایین دست دریچه اضطراری ..... ۳۷
- شکل (۷-۳) نمایی از بالادست دریچه اضطراری ..... ۳۸
- شکل (۸-۳) (مقطع و پلان) دریچه اضطراری ..... ۳۸
- شکل (۹-۳) (پلان) نمایی از دریچه سرویس ..... ۳۸
- شکل (۱۰-۳) (مقطع) نمایی از دریچه سرویس ..... ۳۹
- شکل (۱۱-۳) نمایی از مقطع خروجی ..... ۳۹
- شکل (۱۲-۳) صفحه مانومتر جهت اندازه‌گیری فشارهای استاتیکی ..... ۴۰
- شکل (۱۳-۳) تراش زاویه لبه پایین دست سرریز مثلثی ..... ۴۲
- شکل (۱۴-۳) مشخصات نصب سرریز مثلثی در مخزن فلزی ..... ۴۲
- شکل (۱۵-۳) نمایی از لیمینیمتر و سرریز مستطیلی جهت اندازه‌گیری دبی ..... ۴۴
- شکل (۱۶-۳) نمایی از مانومتر قائم متصل به مخزن برای اندازه‌گیری ارتفاع آب مخزن ..... ۴۴
- شکل (۱۷-۳) نمایی از اشل میله‌ای Point Gauge در مدل ..... ۴۵
- شکل (۱-۴) اشکال هندسی مورد استفاده توسط نرم افزار ..... ۵۴
- شکل (۲-۴) نمای کلی از هندسه مدل عددی ..... ۶۹
- شکل (۳-۴) تصویری نزدیکتر از اطراف دریچه در مدل عددی ..... ۷۰
- شکل (۴-۴) مش بندی اطراف دریچه ..... ۷۱
- شکل (۵-۴) توزیع مکانی پیزومترها ..... ۷۳
- شکل (۱-۵) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای حالت هد ۵ متر و بازشدگی ۰.۵٪ و زاویه لبه ۲۲/۵ درجه ..... ۸۴
- شکل (۲-۵) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای حالت هد ۲ متر و بازشدگی ۰.۵٪ و زاویه لبه ۲۲/۵ درجه ..... ۸۴
- شکل (۳-۵) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای حالت هد ۵ متر و بازشدگی ۰.۷٪ و زاویه لبه ۲۲/۵ درجه ..... ۸۴
- شکل (۴-۵) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای حالت هد ۲ متر و بازشدگی ۰.۷٪ و زاویه لبه ۲۲/۵ درجه ..... ۸۴
- شکل (۵-۵) تغییرات فشار در طول مجرا با دو زاویه لبه دریچه و هد ۲m و بازشدگی ۰.۷٪ ..... ۹۰

- شکل (۶-۵) تغییرات فشار در طول مجرا با دو زاویه لبه دریچه و هد ۵m و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۰
- شکل (۷-۵) تغییرات فشار در طول مجرا در دریچه با زاویه لبه ۴۵° و هد ۵m با بازشدگی ۵۰٪ و ۷۰٪ ..... ۹۰
- شکل (۸-۵) تغییرات فشار در پیژومترهای ۱۷ الی ۲۷ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۱
- شکل (۹-۵) تغییرات فشار در پیژومترهای ۳۲ الی ۳۸ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۲
- شکل (۱۰-۵) تغییرات فشار در پیژومترهای ۳۹ الی ۴۹ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۲
- شکل (۱۱-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۶۳ الی ۷۰ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۳
- شکل (۱۲-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۱۷ الی ۲۷ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۹۳
- شکل (۱۳-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۳۲ الی ۳۸ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۹۴
- شکل (۱۴-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۳۹ الی ۴۹ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۹۴
- شکل (۱۵-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۶۳ الی ۷۰ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۹۵
- شکل (۱۶-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۱۷ الی ۲۷ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۶
- شکل (۱۷-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۳۲ الی ۳۸ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۶
- شکل (۱۸-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۳۹ الی ۴۹ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۷
- شکل (۱۹-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۶۳ الی ۷۰ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۹۷
- شکل (۲۰-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۱۷ الی ۲۷ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۹۸
- شکل (۲۱-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۳۲ الی ۳۸ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۹۸
- شکل (۲۲-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۳۹ الی ۴۹ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۹۹
- شکل (۲۳-۵) تغییرات فشار در پیژومتر ۶۳ الی ۷۰ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۹۹
- شکل (۲۴-۵) میدان فشار در مجرا با زاویه ۲۲/۵° و هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۰
- شکل (۲۵-۵) میدان فشار در مجرا با زاویه ۴۵° و هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۰
- شکل (۲۶-۵) تغییرات دبی عبوری از مجرا برحسب زاویه لبه دریچه، هد ۵ متر و بازشدگی مختلف ..... ۱۰۱
- شکل (۲۷-۵) تغییرات سرعت در مجرا با زاویه ۴۵° لبه دریچه، هد ۲ و ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ و ۷۰٪ ..... ۱۰۲
- شکل (۲۸-۵) تغییرات سرعت در پیژومتر ۳۲ الی ۳۸ با زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۳
- شکل (۲۹-۵) تغییرات سرعت در پیژومتر ۳۹ الی ۴۹ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۳
- شکل (۳۰-۵) تغییرات سرعت در پیژومتر ۳۲ الی ۳۸ با زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۱۰۴
- شکل (۳۱-۵) تغییرات سرعت در پیژومتر ۳۹ الی ۴۹ با زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۲ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۱۰۴
- شکل (۳۲-۵) تغییرات سرعت در پیژومتر ۳۲ الی ۳۸ با زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۵
- شکل (۳۳-۵) تغییرات سرعت در پیژومتر ۳۹ الی ۴۹ با زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۵
- شکل (۳۴-۵) تغییرات سرعت در پیژومتر ۳۲ الی ۳۸ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۱۰۶
- شکل (۳۵-۵) تغییرات سرعت در پیژومتر ۳۹ الی ۴۹ با دو زاویه ۲۲/۵° و ۴۵°، هد ۵ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۱۰۶
- شکل (۳۶-۵) میدان سرعت در مجرا با زاویه ۲۲/۵° و هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۷
- شکل (۳۷-۵) میدان سرعت در مجرا با زاویه ۴۵° و هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۸

- شکل (۳۸-۵) تغییرات اندیس کاویتاسیون در مناطق مختلف مجرا در هد ۲ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۰۹
- شکل (۳۹-۵) تغییرات اندیس کاویتاسیون در مناطق مختلف مجرا در هد ۲ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۱۱۰
- شکل (۴۰-۵) تغییرات اندیس کاویتاسیون در مناطق مختلف مجرا در هد ۵ متر و بازشدگی ۵۰٪ ..... ۱۱۱
- شکل (۴۱-۵) تغییرات اندیس کاویتاسیون در مناطق مختلف مجرا در هد ۵ متر و بازشدگی ۷۰٪ ..... ۱۱۲
- شکل (۴۲-۵) تغییرات طولی پروفیل سطح آب در بازشدگی ۵۰٪ و عمق ۲ متر ..... ۱۱۴
- شکل (۴۳-۵) تغییرات طولی پروفیل سطح آب در بازشدگی ۷۰٪ و عمق ۲ متر ..... ۱۱۴
- شکل (۴۴-۵) تغییرات طولی پروفیل سطح آب در بازشدگی ۵۰٪ و عمق ۵ متر ..... ۱۱۴
- شکل (۴۵-۵) تغییرات طولی پروفیل سطح آب در بازشدگی ۷۰٪ و عمق ۵ متر ..... ۱۱۵
- شکل (۴۶-۵) تغییرات طولی عدد فرود جریان در بازشدگی و هدهای مختلف ..... ۱۱۵
- شکل (۴۷-۵) تغییرات طولی عدد رینولدز جریان در بازشدگی و هدهای مختلف ..... ۱۱۶
- شکل (۴۸-۵) تغییرات پروفیل جریان در بازشدگی ۵۰٪ و زاویه دریچه  $22/5^\circ$  ..... ۱۱۷
- شکل (۴۹-۵) تغییرات پروفیل جریان در بازشدگی ۵۰٪ و زاویه دریچه  $45^\circ$  ..... ۱۱۸
- شکل (۵۰-۵) تغییرات پروفیل جریان در بازشدگی ۷۰٪ و زاویه دریچه  $22/5^\circ$  ..... ۱۱۸
- شکل (۵۱-۵) تغییرات پروفیل جریان در بازشدگی ۷۰٪ و زاویه دریچه  $45^\circ$  ..... ۱۱۸
- شکل (۵۲-۵) تغییرات فشار زیر دریچه در بازشدگی ۵۰٪ و هد ۵ متر ..... ۱۲۱
- شکل (۵۳-۵) تغییرات فشار زیر دریچه در بازشدگی ۷۰٪ و هد ۵ متر ..... ۱۲۱

## فهرست جداول:

۲۹	جدول (۱-۳) : مشخصات سد ژاوه
۵۹	جدول (۱-۴) : ثوابت معادله K-ε
۶۱	جدول (۲-۴) : ثوابت معادله k-ε استاندارد
۶۲	جدول (۳-۴) : ثابتهای معادله k-ε حالت RNG
۶۳	جدول (۴-۴) : ثابتهای مدل k-ε محسوس
۶۴	جدول (۵-۴) : ثابتهای مدل آشفتگی k-ω
۷۷	جدول (۱-۵) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه ۲۲/۵ و بازشدگی ۰.۹۰٪ و هد ۲ متر
۸۰	جدول (۲-۵) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه ۲۲/۵ و بازشدگی ۰.۵۰٪ و هد ۲ متر
۸۱	جدول (۳-۵) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه ۲۲/۵ و بازشدگی ۰.۷۰٪ و هد ۲ متر
۸۲	جدول (۴-۵) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه ۲۲/۵ و بازشدگی ۰.۵۰٪ و هد ۵ متر
۸۳	جدول (۵-۵) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه ۲۲/۵ و بازشدگی ۰.۷۰٪ و هد ۵ متر
۸۵	جدول (۶-۵) : نتایج عددی میدان سرعت و فشار با زاویه لبه دریچه ۴۵ و بازشدگی ۰.۵۰٪ و هد ۲ متر
۸۶	جدول (۷-۵) : نتایج عددی میدان سرعت و فشار با زاویه لبه دریچه ۴۵ و بازشدگی ۰.۷۰٪ و هد ۲ متر
۸۷	جدول (۸-۵) : نتایج عددی میدان سرعت و فشار با زاویه لبه دریچه ۴۵ و بازشدگی ۰.۵۰٪ و هد ۵ متر
۸۸	جدول (۹-۵) : نتایج عددی میدان سرعت و فشار با زاویه لبه دریچه ۴۵ و بازشدگی ۰.۷۰٪ و هد ۵ متر
۱۱۳	جدول (۱۰-۵) : تغییرات طولی عدد فرود و رینولدز و عمق آب
۱۱۹	جدول (۱۱-۵) : مقادیر طول و عرض پروفیل سطح آب و محاسبه ضریب انقباض
۱۲۰	جدول (۱۲-۵) : مقادیر فشار و نیروی ناشی از آن در زیر دریچه با هد ۵ متر و بازشدگی ۰.۵۰٪ و ۰.۷۰٪



# فصل اول

## مقدمه

## 1-1- کلیات

یکی از ضروری ترین و حیاتی ترین نیازهای بشر "آب" است که با افزایش جمعیت و ضرورت رشد کشاورزی و صنعت از یک طرف و محدودیت مخازن و منابع آبی از طرف دیگر، حساسیت آن روز به روز بیشتر شده و پیش بینی می‌گردد در آینده ای نه چندان دور بحران کمبود آب مهمترین مسأله کشورها بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک گردد.[1]

بشر در کشف رمزها و وضع قانون های جدید برای حرکت مایعات و طرح نقشه های معقولانه برای مهار نمودن انرژی آنها تلاش های زیادی نموده و در نتیجه سعی و کوشش مداوم و پشتکار قابل تحسین در طول قرن های متمادی، توانسته به پیشرفتهای شایان توجه در علم مکانیک سیالات نائل آید. وضع قوانین حرکت برای سیالات فوق العاده مشکل تر و پیچیده تر است تا برای اجسام جامد. گالیله منجم معروف در این مورد چنین اظهار نموده است: "برای بشر حرکت ستاره هایی که مسافت ببعیدی از کره زمین فاصله دارند خیلی ساده تر قابل درک است تا پی بردن به رموز جریان آبی که در مقابل چشمهای او در جویبارها جاری است." [2]

از سوی دیگر آب نیز همچون سایر پدیده ها و عوامل طبیعی بدون توجه به مرزهای قراردادی بین کشورها از قوانین و عوامل مؤثر بر خود تبعیت نموده، گاه از یک کشور سرچشمه گرفته و در کشوری دیگر به مقصد خود منتهی می‌گردد. کمبود آب و روشن شدن ارزش حقیقی و حیاتی آن مردم و ممالک را بر آن میدارد تا حداکثر بهره برداری از آب در دسترس را بنمایند و از هر قطره آن استفاده صحیح و بهینه بنمایند. لذا ضمن انتظار بروز پاره ای مشکلات از این بابت، لازم است تا تمام توان در جهت استفاده بهینه و جلوگیری از هدررفتن آب و کنترل و مهار آن بکار گرفته شود.

"اکثر کشورها از بحران مدیریت آب رنج میبرند تا کمبود آب". این عبارت قسمتی از بیانیه سومین نشست جهانی آب است که بعلت نوسان شدت جریان آب در رودخانه ها و نیاز به ذخیره آب در زمانهای پرآبی برای مصرف در مواقع کم آبی و همچنین نیاز به استفاده از انرژی آب جهت تبدیل به انرژی الکتریکی و...، لازم میسازد تا با ساخت موانعی در مسیر جریان بعنوان "سد" به این هدف دسترسی پیدا کرد.[3]

تاریخ ساخت سد را بایستی به تاریخ تمدن بشر نسبت داد. قدیمی ترین سد شناخته شده، سد الکافرا (el-kafara) در مصر و بر روی رودخانه وادی الکرآوی (Wadi-el-Garawi) است که در ۲۸۰۰ سال قبل از میلاد

و برای تأمین آب آشامیدنی و کشاورزی ساخته شده است. بدنه سد مذکور را سنگ بدون ملات تشکیل میداد که وزن سنگ مقاومت و تعادل سنگ ها را در مقابل نیروی وارده ایجاد مینمود و لذا این سد که آب بندی لازم را نداشت پس از مدت کوتاهی خراب شد. حدود ۱۰۰۰ سال بعد، تمدن های بوجودآمده در زمین های حاصلخیز بین رودخانه های تیگریس و افراتس ( Euphrates & Tigris ) با ساخت یک سیستم پیچیده از سدهای انحرافی و کانال های آبیاری، نیازهای آبی خود را جهت کشاورزی تأمین مینمودند. بسیاری از این سدها کوتاه و عموماً " خاکی یا چوبی بوده، تعداد کمی از آنها برای ذخیره آب ساخته شده بودند. در بررسی تمدن های ایران باستان و رم قدیم نیز پیشرفت های قابل ملاحظه ای در صنعت سدسازی مشاهده میشود. مهار و ذخیره آب در قالب سدها و بندها چیزی نبوده است که از ذهن خلاق ایرانی ها به دور مانده باشد. در بسیاری از مناطق کشورمان آثار بجای مانده از سدهای کهن قابل مشاهده است. بند میزان، سد کبار، بند امیر و ... که هنوز با گذشت صدها سال پابرجا و استوار، زاینده و آفرینندگی را به دشت های تشنه ارزانی می دارند. اما با این حال میتوان با جرأت قرن بیستم را " قرن سدسازی " نامید. استفاده از سیمان، بتن و بتن مسلح برای ساخت سدها به اوایل قرن بیستم برمیگردد که از آن تاریخ به بعد، ساخت سدهای بتنی سرعت توسعه پیدا کرد.

در دهه های اخیر با پیشرفت تکنولوژی تحول بزرگی در ساخت سازه های آبی به منظور تولید انرژی و تهیه آب برای مصارف کشاورزی و سایر امور شهری صورت گرفته است. هزینه گزاف، مدت زمان طولانی و نیز توجه به این واقعیت که آزمایش هنوز هم به عنوان دقیق ترین روش در بررسی مسائل و مشکلات پیش روی اینگونه سازه ها مطرح می باشد، محققان و طراحان را بر آن داشته تا با ساخت مدل فیزیکی از سازه طراحی شده و انجام آزمایشات، از جنبه های پنهان پدیده توسط شبیه سازی جریان های واقعی پرده بردارند.[1]

قسمت اعظم پیشرفت های حاصل در زمینه سازه های هیدرولیکی مرهون آزمایش روی مدل این سازه ها است که قبل از اقدام به ساخت مدل اصلی در آزمایشگاه با مقیاس های کوچک و با استفاده از قوانین تشابه ساخته می شوند. استفاده از مدل های هیدرولیکی علاوه بر صرفه جوئی در هزینه اجرای پروژه مناسب ترین راه حل ها را با در نظر گرفتن جنبه های فنی ارائه می نماید. لذا بررسی مدل ها برای جلوگیری از اشتباهات پرخرج و

کسب اطلاعاتی در مورد نمونه واقعی ضرورت کامل دارد و روشن است که هر گونه اصلاح و تغییر در مدل‌ها بسیار کم هزینه‌تر خواهد بود از اصلاحاتی که در نمونه اصلی و هنگام اجرای پروژه ممکن است پیش آید. رینولدز درباره اهمیت استفاده از روش‌های آزمایشگاهی قبل از ساخت نمونه واقعی می‌گوید:

"آزمایش با مدل وسیله مناسبی برای آگاهی قبلی از نتیجه سرمایه‌گذاری و پیش‌بینی آثار کارهای سدسازی و بندری است. تجربه نشان می‌دهد که نادیده گرفتن این روش پیش از اقدام به سرمایه‌گذاری‌های سنگین کار عاقلانه‌ای نیست" [4].

اگرچه امروزه استفاده از روش‌های عددی نیز در محاسبات مرسوم است، اما این روش شبیه‌سازی دارای مزایا و معایبی می‌باشد. هزینه و زمان نسبتاً کم، دقت بسیار خوب و کم بودن اثر خطاهای انسانی در ضمن آزمایشات از جمله مزایای این روش محسوب می‌گردند. اما جدید بودن روش و عدم اطمینان نسبی به نتایج در حالت‌های پیچیده و نبود یک راه حل کلی برای مسائل مختلف در زمره معایب شبیه‌سازی عددی به حساب می‌آیند که اینها نیز استفاده از روش‌های آزمایشگاهی را در راستای کسب نتایج قابل اعتمادتر تأیید می‌کنند.

## ۱-۲- اهداف تحقیق

علیرغم پیشرفتهای اخیر در طرح و محاسبه سدها با استفاده از نرم افزارهای محاسباتی، هنوز طرح بعضی از سازه‌های جنبی سدها از جمله تخلیه کننده‌های عمقی و دریچه های کنترل آنها، بعلت حساسیت و پیچیدگی‌های هیدرولیکی، مستلزم آزمایش برروی مدل های فیزیکی می باشد. اهداف ساخت مدل فیزیکی (در مرحله نهائی) از چند بخش شامل تخلیه کننده تحتانی و حوضچه آرامش و سازه پایانه به شرح زیر تشکیل می گردد.

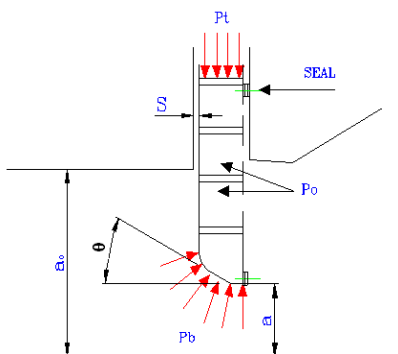
- تحقیق درباره شکل جریان، بررسی شرایط و الگوی جریان بازاء بازشدگی‌های مختلف دریچه‌ها
- تعیین ظرفیت آبگذری تخلیه‌کننده عمقی در بازشدگی‌های مختلف و هدهای مختلف

- اندازه‌گیری مقادیر فشار متوسط در مجرا و روی دریچه‌ها و شیار دریچه‌ها
- محاسبه شاخص کاویتاسیون در نقاط فوق
- مطالعه و بررسی وضعیت جریان خروجی پس از دریچه و داخل تندآب و تعیین پروفیل سطح آب، سرعت جریان و شاخص کاویتاسیون
- اندازه‌گیری فشارهای استاتیکی در محل دریچه و سازه خروجی

به منظور پاسخگویی به موارد فوق، آزمایشهایی بر روی مدل فیزیکی انجام خواهند گرفت.

هدف اصلی این تحقیق بررسی شکل لبه دریچه در تخلیه کننده های تحتانی سدها و تاثیر آن بر پارامترهای هیدرولیکی جریان میباشد.

هندسه قسمت پایین دریچه معمولاً با زاویه لبه تعریف می شود (پارامتر  $\theta$ ). زاویه لبه دریچه طبق تعریف به زاویه ای گفته میشود که تانژانت آن برابر نسبت فاصله عمودی قسمت زیرین دریچه به ضخامت یا عمق دریچه می باشد [5]



با توجه به بررسی های انجام شده، موارد تحقیقاتی راجع به جریان در تونل تخلیه کننده تحتانی و مسائل مشابه سابقاً انجام گرفته ولی مطالعات مشخص راجع به تأثیر لبه دریچه بر مشخصات میدان اندک بوده ولی در عین حال برای تمام طراحان سازه های هیدرولیکی مهم است که دریچه ای با بهینه ترین هندسه، به منظور حذف اثرات منفی کاویتاسیون و داشتن بیشترین ضریب دبی را داشته باشند.

۱-۲-۱- اهمیت موضوع

تونل های تخلیه کننده تحتانی یکی از سازه های جنبی سدها هستند که با توجه به نقش ویژه آنها در تخلیه و کنترل سیلاب و آبیاری پایین دست نیازمند طراحی دقیق می باشند و همواره اطمینان از عملکرد مناسب مجرا و تاسیسات آن باید مورد بررسی قرارگیرد. بدلیل اهمیتی که این سازه ها دارند و به لحاظ سرعت زیاد جرطن (بخصوص در محل قرارگیری دریچه) و همچنین عدم اطلاعات کافی در زمینه عملکرد مناسب هیدرولیکی آنها، انجام تحقیقات و بررسی های بیشتری در این زمینه احساس می گردد. [6]

مشکلاتی که از جنبه هیدرولیکی گریبانگیر این سازه ها میگردد شامل: ۱- برخورد جت آب خروجی از دریچه به دیوارها و سقف پایین دست، ۲- عدم تطابق دبی عبوری مورد نظر در طراحی با دبی عبوری واقعی، ۳- ارتعاش مخرب دریچه سرویس بر اثر عملکرد توام دریچه سرویس و دریچه اضطراری، ۴- رخداد پدیده کاویتاسیون در محدوده جلو دریچه سرویس و در صورت عملکرد توام دو دریچه سرویس و اضطراری، ۵- وقوع پدیده کاویتاسیون در محدوده بین دو دریچه، ۶- خیزش آب در قسمتی از مجرای پایین دست دریچه که دارای محور قوسدار می باشد.

پارامترهای هیدرولیکی نقش مهمی در طراحی ابنیه های تخلیه کننده تحتانی دارند. بطوری که یک طرح مناسب وقتی است که جریان بدون هیچ گونه مسئله ای و با برقراری دبی مورد نظر طراح در حالی که مسائل اقتصادی نیز در نظر گرفته می شود بتواند از مجرا عبور نماید.

#### ۱-۱-۲-۱- پارامترهای هیدرولیکی:

- ۱- **سرعت جریان:** سرعت از پارامترهای مهمی بوده که علاوه بر تعیین الگوی جریان، در بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون، لرزش و غیره مورد استفاده می باشد.
- ۲- **دبی عبوری از مجرا:** طبق بررسی های بعمل آمده از مدل هیدرولیکی، میزان دبی عبوری از مجرای تونل به عوامل زیر بستگی دارد:

- میزان بازشدگی دریچه، بطوریکه با افزایش میزان بازشدگی، دبی افزایش می یابد.
- میزان هد پشت دریچه که ناشی از ارتفاع آب مخزن می باشد.
- ابعاد دریچه و مقطع مجرای دریچه، با افزایش ابعاد فوق دبی نیز افزایش می یابد.
- افت انرژی در مسیر جریان، بطوریکه هر قدر افت انرژی را بتوان در طول مسیر کاهش داد (مثلاً استفاده از تبدیلات ملایم در مسیر جریان و یا با ایجاد سازه هایی در مسیر جریان جهت تسهیل عبور سیال) دبی افزایش می یابد.

**۳- هد انرژی:** عامل برقراری جریان در مجرای تونل وجود هد انرژی (هد)، ناشی از تجمع آب مخزن سد است، بطوریکه هر اندازه مقدار فوق به لحاظ ارتفاع سطح آب مخزن زیاد باشد جریان بیشتری از تونل عبور می نماید. در طول مسیر جریان، هد ناشی از سطح آب مخزن، بجهت اتلاف انرژی کاهش می یابد، بطوریکه میزان افت انرژی به الگوی جریان و افت انرژی بستگی دارد. معمولاً افت انرژی برای دبی های بزرگتر، افزایش می یابد. برای مثال در طرح تخلیه کننده سد گیلانغرب برای دبی  $30/7$  مترمکعب و هد مخزن  $13/2$  متر، افت انرژی تا قبل از دریچه معادل  $1/9$  متر اندازه گیری گردید. این در حالی است که طرح فوق در دبی  $55/83$  مترمکعب بر ثانیه (هد  $43/2$  متر) افت انرژی برابر  $9/9$  متر را نشان می دهد. [7]

**4- عمق جریان:** مطالعات انجام گرفته روی مدل های هیدرولیکی نشان دهنده جریان تحت فشار قبل از دریچه و آزاد بعد از دریچه می باشد. لذا پروفیل سطح آب در سراسر مجرا حدالامکان نایستی به سقف برخورد نماید. همچنین در صورت نامتقارن بودن سطح آب و نوسانات شدید آن مخصوصاً در انتهای مجرا، کارایی مطلوب حوضچه آرامش کاهش خواهد یافت. لذا بررسی پروفیل سطح آب در بهینه سازی مجرا نقش مهمی دارد.

**۵- فشار:** اندازه گیری فشار یکی از مهمترین بخش های مطالعات مدلی را تشکیل می دهد، چنانچه بررسی وقوع کاویتاسیون، ارتعاش، نیروهای وارد بر دریچه و افت انرژی در مسیر جریان را ممکن می سازد. وقوع فشار منفی بخصوص در ناحیه زیر دریچه و شیارهای دریچه باعث رخداد پدیده کاویتاسیون می گردد.

در فصل پنجم با ارائه جداول مربوط به فشار، به شناسایی فشارهای بحرانی و عواقب ناشی از آن در عملکرد مجرا پرداخته شده، همچنین این جداول حاکی از آن است که عمدتاً در فشارهای بسیار پایین مشکلات ناشی از کاویتاسیون و ارتعاش وجود دارد که برای مرتفع ساختن آن تمهیدات لازم باید در نظر گرفته شود.

**کاویتاسیون:** در سازه های هیدرولیکی که در معرض سرعت های بالای جریان می باشند، هرگاه فشار از مقدار فشار بخار کمتر شود، حباب های بخار بوجود می آید. حبابها به همراه جریان حرکت نموده و پس از رسیدن به محل پرفشار منفجر شده و باعث جریان تخریبی می گردد. در ابتدای تخریب، روی بستر بتن بتدریج ناهمواری های ثانویه ایجاد شده، موجب جدایی بیشتر جریان می شود، بطوریکه صدمات ناشی از آن توسعه می یابد. با تکرار این فرآیند، بعد از مدتی تخریب تا عمق چند متر نیز ادامه می یابد، در این صورت خسارت وارد بر سازه اساسی خواهد بود. پدیده فوق را کاویتاسیون نامند.

سه عامل مهم در بروز پدیده فوق عبارتند از سرعت زیاد جریان، فشار کم و ناهمواری سطوح.

اندیس کاویتاسیون، معیاری است جهت پیش بینی رخداد کاویتاسیون. هرگاه اندیس کاویتاسیون از مقدار بحرانی کمتر شود احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون وجود دارد. مقدار بحرانی فوق بستگی به موقعیت، شکل و ناهمواری های روی سطح در نقطه مورد بررسی دارد. معمولاً با توجه به آنکه در سازه های هیدرولیکی، بتن به کار برده می شود، ناهمواریها دارای شیب ۱:۲۰ (نسبت ارتفاع ناهمواری به طول آن) است. [8]

ضریب کاویتاسیون بحرانی برای شیب خلاف جریان ناهمواری ۰/۲، و برای موافق جریان ۰/۲۵ در نظر گرفته می شود.

در بررسی های موردی تخلیه کننده تحتانی سد گیلانغرب مشاهده گردیده است که هرچقدر میزان دبی کاهش یابد، منحنی توزیع ضرائب کاویتاسیون به سمت بالا انتقال می یابد، بعبارت دیگر بر اثر کاهش دبی، ضرائب کاویتاسیون افزایش می یابند. بنابر این در دبی های کمتر خطر وقوع کاویتاسیون منتفی می باشد. [9]

### ۱-۳- ساختار پایان نامه



این پایان نامه در قالب شش فصل به رشته تحریر درآمده است. در فصل اول پس از یک مقدمه کلی راجع به سد و سدسازی و قدمت و ضرورت آن در جهان و ایران، اهمیت تحقیق حاضر و اهداف و روش این مطالعه آورده شده است. در فصل دوم به معرفی تخلیه کننده تحتانی و مشخصات و اصول طراحی آن پرداخته شده است. هم چنین سعی شده تا با تعریف کاویتاسیون و اهمیت آن به بررسی مسائل مربوطه پرداخته شود. در قسمت دیگری از این فصل نگاهی گذرا به مطالعات قبلی داشته و نیز به معادلات حاکم بر جریان اشاراتی شده است.

در فصل سوم ابتدا سد مورد مطالعه معرفی شده و در ادامه به تشریح مدل فیزیکی مورد آزمایش و اجزاء آن پرداخته شده است. در فصل چهارم به معرفی نرم افزار مورد استفاده و مدل کامپیوتری ساخته شده، به همراه توضیحاتی راجع به نحوه عملکرد اینگونه برنامه ها اشاره شده است. فصل پنجم شامل ارائه نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی است. نتایج و نمودارهای بدست آمده از تحلیل عددی دوبعدی جهت کالیبراسیون و مقایسه آنها با داده های آزمایشگاهی، به همراه درصد اختلاف نتایج ارائه گردیده است. فصل آخر نیز شامل ارائه نتیجه گیری و پیشنهادات برای پروژه های تحقیقاتی مشابه می باشد. در ادامه نیز تحت عنوان ضمیمه نتایجی که جهت کالیبراسیون و صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفته اند در قالب نمودار ارائه شده اند.

### ۱-۳-۱- روش انجام تحقیق

اصولاً پیش بینی فرآیندهایی همچون جریان سیال به دو روش اصلی انجام میشود که شامل تحقیقات آزمایشگاهی و محاسبات تئوری میباشد. آزمایشات انجام شده توسط یک دستگاه یا یک سازه که اندازه هایش عیناً اندازه واقعی باشد جهت پیشگویی عملکرد موارد مشابه استفاده میشود. اما در بیشتر حالات چنین آزمایشاتی بسیارگران و اغلب غیرممکن است. لذا آزمایشها بر روی مدل‌هایی با مقیاس کوچکتر انجام میگردد.

در پیش بینی بصورت محاسبات تئوری بیشتر از مدل‌های ریاضی استفاده میشود. در گذشته امکان پیش بینی بسیاری از موارد توسط ریاضیات کلاسیک ممکن نبود زیرا تنها برای تعدادی از مجهولات در مسائل علمی

معادلات لازم پیدا میشود. اما امروزه با توجه به توسعه روشهای عددی و در دسترس بودن کامپیوترها این امکان وجود دارد که تقریباً برای همه مسائل علمی بتوان از یک مدل ریاضی استفاده کرد.

از آنجا که مدلسازی عددی امروزه بسیار متداول گشته و همچنین با توجه به هزینه بسیار پایین آن در مطالعه سازه های هیدرولیکی، مقرر شد که از نرم افزار فلونت که یکی از نرم افزارهای شناخته شده میباشد جهت انجام شبیه سازی عددی استفاده گردد.

با توجه به تاثیر هندسه لبه دریچه (نسبت ضخامت دریچه به مقدار پایین آمدگی آن یا همان زاویه برخورد) بر میدان جریان پایین دست دریچه ها - شامل میدان سرعت، میدان فشار، اندیس کاویتاسیون و پروفیل جریان - مطالعات براساس شکلهای مختلف لبه دریچه، بازشدگیهای مختلف دریچه و هدهای مختلف آب پشت آن، توسط نرم افزار فلونت انجام خواهد گرفت.

وجود جریان تحت فشار در بالادست دریچه تخلیه کننده ها، وجود افت انرژی جریان به علل مختلف و هم چنین مقادیر ناچیز نسبت بازشدگی دریچه به هد آب روی آن باعث می شود استفاده از نتایج بدست آمده از روش های تئوری همواره مورد بررسی و صحت سنجی قرار گیرند. بر این اساس در این پایان نامه علاوه بر مدلسازی عددی، از مدل فیزیکی ساخته شده در موسسه تحقیقات آب، جهت برداشت و مقایسه نتایج استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا به کمک نرم افزار، دریچه تحتانی و کلیه متعلقات آن شامل دریچه، کانال ورودی و کانال خروجی موردنظر مدلسازی می شود و برای هدهای آب پشت دریچه (۲ و ۵ متر) و بازشدگی های ۵۰ و ۷۰ درصد و شکل لبه دریچه موجود در مدل فیزیکی (زاویه لبه ۲۲/۵ درجه) اطلاعات از کامپیوتر استخراج می گردد. بطور همزمان آزمایشات بر روی مدل فیزیکی موجود برای هدهای مختلف آب و شکل لبه دریچه ثابت انجام می پذیرد. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل کامپیوتری کالیبره شده و برای حالت زاویه لبه ۴۵ درجه آزمایشات روی مدل عددی ادامه داده می شود.

تاثیر شکل دریچه بر آیتمهای مذکور نهایتاً منجر به تاثیر مستقیم آن بر پارامترهای طراحی کانال هدایت جریان و تخلیه کننده های تحتانی خواهد شد.



## فصل دوم

تخلیه کننده تحتانی و مسائل مرتبط

## ۲-۱- تخلیه کننده تحتانی

**دریچه:** دریچه ها وسایلی هستند که از فلزات، مواد پلاستیکی و شیمیایی یا از چوب ساخته می شوند. دریچه ها و شیرها برای قطع و وصل جریان یا تنظیم سطح آب به کار می روند.

دریچه ها را می توان به صورت زیر طبقه بندی کرد: [10]

- 1- بر اساس محل قرارگیری: دریچه های سطحی<sup>۱</sup> و دریچه های تحتانی<sup>۲</sup>
  - 2- بر اساس کاری که انجام می دهند: دریچه های اصلی (سرویس)، تعمیراتی (محافظ) و اضطراری
  - 3- بر اساس مصالح بدنه: دریچه های فولادی، آلومینیومی، بتنی مسلح، چوبی و از مواد پلاستیکی
  - 4- بر اساس نوع بهره برداری: دریچه های تنظیم کننده دبی و دریچه های کنترل کننده سطح آب
  - 5- بر اساس مکانیزم حرکت: دریچه های خودکار، هیدرولیکی، مکانیکی، برقی و دستی
  - 6- بر اساس نوع حرکت: دریچه های چرخشی، غلطان، شناور و دریچه هایی که در امتداد و یا در جهت عمود بر جریان حرکت می نمایند.
  - 7- بر اساس انتقال فشار آب: دریچه هایی که فشار را به طرفین یا تکیه گاه ها منتقل می کنند، دریچه هایی که فشار را به کف منتقل می کنند. یا هر دو
- تقسیم بندی شماره 1 بیشتر مرسوم است و حالت کلی تری دارد.

سدها به منظور ایجاد مخزن، افزایش ارتفاع هیدرولیکی یا ایجاد سطح وسیعی از آب ساخته می شوند. از مخزن برای ایجاد هماهنگی بین آب موجود و آب مصرفی استفاده می شود. مخازن برای ذخیره سازی موقت آب نیز کاربرد دارند. برای نمونه مصارف دیگر سدها را می توان به صورت تامین آب شرب، آبیاری و استفاده در نیروگاه ها برشمرد. آب معمولاً در زمان وقوع سیل و در طول ماه های پرآبی توسط سد ذخیره و در فصل کم آبی مصرف می شود. بنابراین با توجه به آنکه سدها آب را ذخیره و با تاخیر زمانی آن را رها می کنند، لذا سازه های موثری برای کنترل سیل به شمار می روند. ارتفاع هیدرولیکی ایجاد شده، افزایش فشار خالص روی نیروگاه را سبب می شود. همچنین

<sup>1</sup> Surface gates

<sup>2</sup> Submerged gates

می‌توان با ایجاد پایاب مناسب، شرایط رودخانه را برای کشتیرانی بهبود بخشید. بنابراین سدها موضوعاتی از قبیل ساخت، مدیریت، ایمنی و محیط زیست را به همراه دارند.

ایمنی سد در قیل و بعد از بهره‌برداری مورد توجه می‌باشد. بعد از ساخت و بهره‌برداری به شرایطی که سد باید در حالت سرویس به راحتی سیلاب را عبور دهد اشاره دارد. در زمان ساخت سد، رودخانه را باید از طریق سازه‌هایی مانند کانال و تونل یا آبرو (Culvert) منحرف نمود. معمولاً وجود یک تخلیه‌کننده تحتانی در زمان اولین آبیگری مخزن ضروری است تا کنترل لازم را در زمان آبیگری مخزن تضمین و در مراحل بعدی برای تخلیه مخزن بکار گرفته شود. بستگی به مکانی که تخلیه‌کننده تحتانی قرار می‌گیرد، آب خروجی با رسوب یا بدون آن همراه می‌باشد. بعنوان مثال در تخلیه‌کننده سد گتوند، دهانه تونل تخلیه‌کننده‌ها از بستر سد فاصله داشته و لذا در ساخت مدل آن مسئله اختلاط و حمل رسوب مد نظر قرار نگرفته و جریان صرفاً بصورت دوفازی آب و هوا مورد مطالعه قرار گرفته است. مسائل خاص مورد توجه در مطالعه این مدل شامل هوادهی، وقوع کاویتاسیون و ارتعاش مخرب، استهلاک انرژی و فرسایش می‌باشد.

تخلیه‌کننده‌ها به منظور تنظیم یا رهاکردن آب سدها بکار می‌روند. از تخلیه‌کننده‌ها ممکن است بمنظور تاخیر در تخلیه جریانهای ورودی در سدهای تنظیمی، انحراف آب به داخل کانال و یا لوله‌ها در سدهای انحرافی، تخلیه آبهای ذخیره شده به میزان نیاز آبی پایین دست، تخلیه کامل مخزن و یا بمنظور تامین ترکیبی از نیازهای چندمنظوره استفاده کرد.

در سدهای مخزنی، سازه‌های جنبی هیدرولیکی مختلفی همچون سرریز، حوضچه آرامش، تخلیه‌کننده عمقی، آبیگر کشاورزی و یا شرب تعبیه می‌شوند. این سازه‌ها وظیفه انتقال سیلاب اضافی از مخزن به پایین‌دست سد را بر عهده دارند. در این میان تخلیه‌کننده‌های تحتانی یکی از سازه‌های مهم سدها به شمار آمده که وظایف مهم زیر را بر عهده دارند:

- تامین نیاز آبی پایین‌دست
- تخلیه مخزن سد در مواقع اضطراری
- تخلیه قسمتی از سیلاب علاوه بر ظرفیت سرریز به هنگام وقوع سیلاب‌های بزرگ
- تخلیه قسمتی از رسوبات مخزن سد
- کنترل آبیگری اولیه مخزن در سدهای خاکی

تخلیه کننده ها را میتوان برحسب هدف، مشخصات فیزیکی و سازه ای، و یا شکل بهره برداری هیدرولیکی طبقه بندی کرد.

تخلیه کننده ای را که مستقیماً به داخل رودخانه میریزد میتوان تخلیه کننده روخانه ای نامید. تخلیه کننده کانالی تخلیه کننده ای است که به داخل کانال میریزد. تخلیه کننده ای را که بداخل لوله تحت فشار میریزد میتوان تخلیه کننده لوله تحت فشار نامید. تخلیه کننده ها را همچنین میتوان برحسب آنکه در مجاری روباز یا بسته جریان داشته باشند تعریف کرد.

بعلاوه تخلیه کننده ها را میتوان برحسب نوع بهره برداری هیدرولیکی از آنها، بصورت دریچه دار یا بدون دریچه رده بندی کرد. در مجاری بسته ممکن است تمام و یا قسمتی از مجرا تحت فشار باشد و یا بطور کلی بصورت مجرای روباز جریان داشته باشد.

گاه ممکن است تخلیه کننده ها را بمنظور رساندن آب به یک کانال در ارتفاع بالاتر تعبیه نمود. در اینصورت ممکن است برای تامین آب مورد نیاز پایین دست سد، از یک مجرای فرعی که تا رودخانه ادامه دارد، استفاده نمود. از این جریانها میتوان برای تامین حقابه های پایین دست محل سد، حفظ حیات رودخانه در برابر آلودگی ها، حفظ حیات آبیان و یا ذخیره آبی استفاده کرد. برای سدهایی که اصولاً بمنظور گردشگاه یا پرورش ماهی و حیات وحش ساخته میشوند، تامین یک حداقل برای تراز آب دریاچه لازم است. در اینصورت تخلیه کننده ها فقط بمنظور رهاکردن حداقل جریان لازم برای تامین حیات رودخانه در پایین دست سد ساخته میشوند.

در موارد مشخصی میتوان از تخلیه کننده های یک سد بعنوان سرریز اصلی همراه با یک سرریز کمکی استفاده کرد. در اینصورت طرح معمول تخلیه کننده ها باید طوری تغییر داده شود که شامل یک لبریز باشد و بتواند هم بعنوان تخلیه کننده و هم بعنوان سرریز بکار گرفته شود.

همچنین از تخلیه کننده ها بعنوان تنظیم کننده در پروژه های کنترل سیلاب میتوان استفاده کرد و آبی را که موقتاً در قسمت کنترل سیلاب مخزن ذخیره شده است، رها نمود. در این مورد میتوان با استفاده از تخلیه کننده ها بهنگام پیش بینی سیل، مخزن را تخلیه کرد. بعلاوه از تخلیه کننده ها میتوان بمنظور خالی کردن مخزن برای بررسی و یا تعمیر آن و همچنین محافظت دیواره بالادست سد و سایر سازه های آبی، که نوعاً در معرض سیل هستند بهره جست. همچنین ممکن است از تخلیه کننده ها در پایین بردن سطح آب مخزن بمنظور کنترل و یا مسموم کردن ماهی های دور ریختنی و سایر آبیان نامطلوب مخزن استفاده کرد.

با توجه به اهداف فوق، طراحی تخلیه‌کننده‌های عمقی یکی از مسائل مهم طراحان سدها می‌باشد که اطمینان از ظرفیت آبگنجری و عملکرد مناسب مجرا و تاسیسات هیدرولیکی و هیدرومکانیکی وابسته از جمله دریاچه‌ها و شیرها باید مورد آزمایش و بررسی قرار گیرد. بر این اساس جهت اطمینان از عملکرد هیدرولیکی مجرای تحتانی سد مخزنی ژاوه و همچنین تعیین عملکرد هیدرولیکی حوضچه آرامش تخلیه‌کننده و بررسی کفایت تخفیف انرژی بت پرتابی در دبی‌های مختلف، مدل مناسب این تخلیه‌کننده در مؤسسه تحقیقات آب ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت.



## ۲-۱-۱- اصول طراحی تخلیه کننده ها

اهداف مختلفی که معمولاً در ساخت تخلیه کننده های تحتانی مد نظر می باشند شامل تخلیه مخزن در مواقع ضروری، پایین بردن تراز مخزن و تخلیه دبی اضافی یا بار سیل از مخزن است. به علت بالا بودن سرعت جریان در تخلیه کننده تحتانی که بر اساس رابطه انرژی با صرف نظر از افت به شکل  $U = \sqrt{2gh}$  می باشد، کاویتاسیون، و در نتیجه هوادهی جریان از مسایل مهم این سازه ها می باشد. در رابطه فوق  $h$  هد موثر آب پشت دریچه و  $g$  شتاب ثقل است.

از دیگر مسایل مرتبط با تخلیه کننده تحتانی می توان به ارتعاش مخرب دریچه به علت سرعت بالای جریان نام برد. ارتعاش دریچه مشکل اساسی در تخلیه کننده تحتانی است. تخلیه کننده های تحتانی باید بگونه ای طراحی شوند که در تمام شرایط بهره برداری بخوبی عمل نمایند.

معمولاً دو دریچه برای تخلیه کننده پیش بینی می شود که شامل دریچه ایمنی یا دریچه محافظ و دریچه سرویس یا دریچه تنظیم کننده (دریچه اصلی) می باشند. دریچه سرویس معمولاً بر حسب نیاز، باز شده و دریچه اضطراری نیز معمولاً صرفاً در دو حالت باز کامل یا بسته کامل تعریف می شوند. در یک نگاه چهار نوع تخلیه کننده تحتانی بصورت زیر قابل معرفی می باشند:

- تونل انحراف که به صورت تخلیه کننده تحتانی استفاده شده و دسترسی به آن از طریق مجرای عمودی انجام می شود.
- تخلیه کننده تحتانی از نوع آبرو که برای تمامی شرایط جریان، بجز تراز حداقل مخزن، قابل استفاده بوده و بمنظور کاهش طول قسمت تحت فشار، دو دریچه در نزدیکی دهانه ورودی دارد.
- بخشی از تونل انحراف به صورت کانال تخلیه کننده برای سرریز نیلوفری استفاده می شود.
- تخلیه کننده تحتانی سد وزنی که بسیار کوچکتر از تخلیه کننده های مورد استفاده در سد خاکی است.

در مطالعه مشخصات فنی مورد نیاز تخلیه‌کننده تحتانی Giesecke در ۱۹۸۲ توصیه نمود که موارد زیر مورد توجه قرار گیرند. لازم به ذکر است که تخلیه‌کننده تحتانی به علت مشکلات و محدودیت‌هایی مانند:

کاویتاسیون، نیروهای هیدرودینامیکی، ارتعاش و سایش بصورت دائمی استفاده نمی‌شود.

- زمانی که خروجی آن باز است، جریان کاملاً هموار در آن شکل گیرد.
- برای تمامی جریان‌ها با بازشدگی مشخصی از دریچه، کارایی خوبی داشته باشد.
- استهلاک انرژی مناسبی در خروجی سازه انجام شود.
- نشت جریان در سازه وجود نداشته باشد.
- استفاده از آن آسان و ساده باشد.
- طراحی آن مناسب و اقتصادی باشد.
- عمر طولانی داشته باشد.

## 2-1-2- علل هیدرولیکی خرابی تخلیه‌کننده های تحتانی

دریچه‌های کنترل جریان در سدها معمولاً تحت تاثیر شرایط دینامیکی نامساعد و خطرناکی قرار دارند. با بررسی تخلیه‌کننده های تحتانی آسیب دیده در جهان، مشکلات ناشی از کاویتاسیون، سایش، ارتعاش دریچه‌ها و جریان کوبشی، بعنوان مهمترین علل خرابی تخلیه‌کننده های تحتانی شناخته شده اند. در پدیده های فوق پارامترهایی همچون دبی جریان، سرعت جریان، فشار هیدرودینامیکی آب، سرعت هوا، غلظت هوای جریان و عمق آب موثر می باشند که با اندازه گیری برخی از این پارامترها می توان پیش از خرابی از وقوع آن جلوگیری نمود.[11]

برای مثال، زمانی که در اثر ناهموازی های موجود در سطح، کاویتاسیون اتفاق می افتد، آسیب های بعدی نیز در پایین دست ناحیه تخریب شده آغاز خواهد شد و بعد از مدتی حفره بزرگی در سطح بتن ایجاد می شود. با گذشت زمان، در اثر برخورد جریان با سرعت بالا به سطح پایین دست حفره، حفره ایجاد شده بزرگتر خواهد شد و در این حالت اختلاف فشار زیادی بین حفره و مناطق اطراف آن ایجاد می شود که خود سبب شدن سنگدانه ها و حتی قطعاتی از بتن و حمل آنها با جریان به بیرون از منطقه اثر می شود. با اطمینان می توان ادعا کرد که آسیب های ایجاد شده در این مرحله

ناشی از سایش است که کاملاً با آسیب ناشی از کاویتاسیون متفاوت است. در این حالت با ادامه سایش در جریان با سرعت زیاد آرماتورهای موجود نیز در معرض جریان قرار گرفته و به ارتعاش در می آیند که خود آسیب دیدگی های مکانیکی را به دنبال خواهد داشت.

در سد گلن کنیون (Glen Canyon) در ایلات متحده آرماتورهایی پیدا شده که به همراه بتن از سطح جدا شده و با جریان به پایین دست منتقل شده اند. این در حالی است که آرماتورها در عمق 150 میلی متری در بتن مدفون بوده اند. با همه وجود و با ادامه سایش و در صورت نفوذ آب به پشت پوشش تخلیه کننده، یکپارچگی سازه نیز در خطر خواهد بود. [12]

## ۲-۲- کاویتاسیون

### ۲-۲-۱- تعریف

نیوتن اولین کسی است که در سال ۱۷۰۴ در کتاب "اپتیک" بدون اینکه این پدیده را کاملاً شناخته باشد به مشاهده آن اشاره نموده است. فرود نام این پدیده را کاویتاسیون نهاد. نتایج آزمایش رینولدز در سال 1894 بر روی یک مدل ونتوری نشان میدهد که افزایش سرعت در گلوگاه و کاهش فشار باعث جوشیدن سیال خواهد شد. [13]

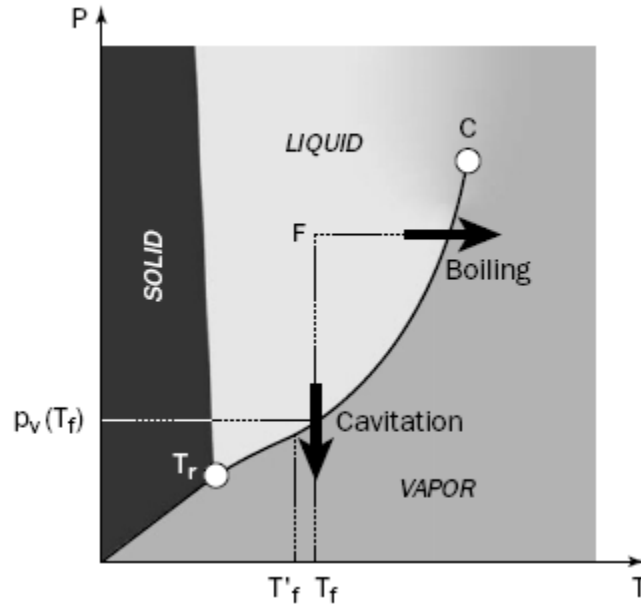
فشار بخار: مفهوم فشار بخار به بهترین نحو خود در ترمودینامیک کلاسیک مطرح شده است. در شکل زیر منحنی گذرنده از نقاط  $T_r$  و  $C$  حالت‌های مایع و گاز را برای مثلاً آب، از هم جدا می‌کند. با توجه به نمودار بخوبی دیده میشود که کاویتاسیون در یک مایع با کاهش فشار در یک دمای تقریباً ثابت میتواند رخ دهد، کما اینکه در جریان‌ات واقعی نیز همین اتفاق می‌افتد. کاویتاسیون همانند جوشیدن<sup>۳</sup> باعث تبدیل مایع به گاز می‌شود. با این تفاوت که تغییر در دما صورت نمی‌گیرد بلکه تغییرات در فشار صورت می‌پذیرد آنهم بوسیله جریان دینامیکی. [14]

در نتیجه کاویتاسیون را میتوان چنین تعریف نمود:

به ایجاد خلاء در میان مایع کاویتاسیون گفته می‌شود و عبارتست از مرحله عبور از حالت مایع به بخار بخاطر تغییر فشار موضعی، در حالیکه درجه حرارت ثابت باشد. کاهش فشار می‌تواند ناشی از آشفتگی، اغتشاش و یا ایجاد جریان گردابی در جریان باشد. [15]

---

<sup>3</sup>Boilling



شکل (1-2) کاویتاسیون

خسارت ناشی از کاویتاسیون را با دو روش زیر می توان کنترل کرد:

- کنترل شاخص کاویتاسیون با اصلاح هندسی
- کنترل شاخص کاویتاسیون با هوادهی جریان

در هر مورد، ناهمواری های سطح سرریز یا تخلیه کننده تحتانی با دقت لازم با توجه به کیفیت مصالح و مسائل محلی باید مشخص شود. سپس بر اساس مفهوم آستانه کاویتاسیون باید تعیین کرد که آیا خسارت ناشی از کاویتاسیون روی میدهد یا نه. برای این کار به پیش بینی پروفیل های جریان بر اساس منحنی فشار برای تمام دبی های مورد نظر و محاسبه تغییرات شاخص کاویتاسیون نیاز است. اگر در مناطقی وقوع کاویتاسیون تخمین زده شود آنگاه هندسه یا ناهمواری سطح سازه بایستی اصلاح شود. اگر با این کار نتیجه ای حاصل نشد هوادهی جریان باید انجام شود. (ویسچر و هاگر، 1998)

## 2-2-2- شاخص کاویتاسیون

در تخلیه کننده های تحتانی بعثت سرعت بالای جریان، احتمال جداشدگی جریان از جداره و ایجاد اغتشاش و آشفتگی و در نتیجه کاهش فشار و وقوع کاویتاسیون زیاد می شود. معیار تشخیص بروز کاویتاسیون پارامتری است بعنوان شاخص کاویتاسیون که بصورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{P_s - P_v}{1/2 \rho V^2}$$

که در آن :

$\sigma$ : شاخص کاویتاسیون  
 $P_0$ : فشار در نقطه ای خاص  
 $P_v$ : فشار بخار آب در دمای محیط  
 $V$ : سرعت جریان در همان نقطه خاص  
 $\rho$ : جرم حجمی آب

محققین دریافته اند در صورتیکه شاخص کاویتاسیون به  $0/2$  برسد خسارت ناشی از کاویتاسیون اجتناب ناپذیر است.

بررسی امکان رخداد پدیده کاویتاسیون

همانگونه که اشاره گردید، جهت ارزیابی وقوع کاویتاسیون از پارامتر اندیس کاویتاسیون ( $\sigma$ ) که بنابر تعریف نسبت فشار مطلق به فشار هیدرودینامیکی است، استفاده می شود. بر این اساس اندیس کاویتاسیون با استفاده از فشارهای اندازه گیری شده و سرعت جریان در هر بازشدگی دریچه محاسبه و با عدد کاویتاسیون بحرانی مقایسه گردید تا احتمال وقوع کاویتاسیون مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور احتراز از خسارت ناشی از کاویتاسیون، لازم است که اندیس فوق در مجرا از یک حد بحرانی کمتر نباشد. (در مجرا

۰/۲۵ و برای شیار دریچه ۰/۲) [16]

## 2-3- مروری بر مطالعات قبل

جهت تشخیص پارامترهای فیزیکی مؤثر، ناحیه جریان در اطراف دریچه را می توان به سه دسته تقسیم کرد:

1- جریان ورودی (Approaching Zone)

2- جریان در تنگ شدگی ونا، که ناحیه ورود هوا و ناحیه مغشوش است.

3- جریان دائمی در تونل و ناحیه هوادهی

پارامترهای مؤثر در ناحیه ورودی جریان شامل: هد هیدروستاتیکی، سطح مقطع تونل تحت فشار، طول و ضریب زبری تونل، دمای آب، کیفیت آب (بار معلق)، عدد رینولدز و میزان آشفتگی جریان می باشد.

پارامترهای مؤثر در تنگ شدگی ونا شامل: سطح مقطع تونل، طول و شیب جریان آزاد در تونل، میزان پرشدگی مقطع، دمای آب و افت فشار و در نهایت دبی هوا که به طول و شکل کانال هوادهی، دمای هوا و فشار در ابتدای کانال وابسته می باشد. [17]

### پیشنهادات:

- عدم بهره برداری از تخلیه کننده تحتانی در تراز آب بالا که عموماً در زمان سیلابی مورد بهره برداری قرار می گیرد مشکلات ناشی از کاویتاسیون در تخلیه کننده تحتانی را تا حد زیادی کاهش خواهد داد، چرا که طبق آمار موجود بیشترین خروجی های ناشی از کاویتاسیون در این زمان حادث شده است.
- همانگونه که پایش پارامترهای سازه ای بدنه سد نظیر تنش و کرنش و ... بمنظور آگاهی از ایمنی سد دارای اهمیت می باشد، پایش هیدرولیکی نیز که شامل اندازه گیری سرعت آب، سرعت باد، فشار، دما، عمق آب، غلظت هوا و غلظت رسوب می باشد نیز به نوبه خود بهره برداران را از عملکرد اجزای هیدرولیکی سد آگاه خواهد ساخت.

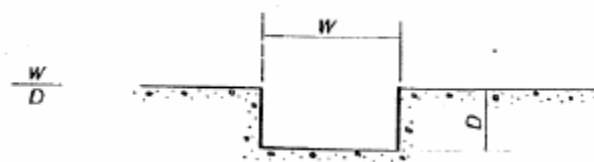
نتایج بررسی های انجام شده در انستیتو مدیریت سازه های آبی و انرژی برقایی چین در سال 1988 نشان می دهد که تغییر شکل شیار دریچه ها می تواند احتمال وقوع کاویتاسیون را تا حد زیادی کاهش دهد. این مطالعات بر روی یک مدل و نتوری با تست انواع شیار انجام شد و با 158 دریچه در 85 پروژه انجام شده تطبیق داده شد. [18]

انتشار نتایج مطالعات آقای پترکا (Peterka) در سال 1953 نشان داد که هوادهی حجمی 2 تا 3% (نسبت دبی هوا به دبی آب)، تخریب ناشی از کاویتاسیون را به میزان زیادی کاهش خواهد داد. این تحقیقات که بر روی یک مدل و نتوری انجام شده و تخریب ناشی از کاویتاسیون با اندازه گیری وزن ذرات جدا شده از مدل برآورد گردید. نتایج این مطالعات نشان می دهد که هوادهی حجمی 7 تا 8% باعث جلوگیری از هرگونه تخریب می گردد. این مطالعات راهی جدید فراروی طراحان سازه های هیدرولیکی قرار داد. [19] اولین استفاده از این تجربه در سد یلوتیل (Yellowtail) آمریکا به کار گرفته شد [20] و پس از آن به دلیل اطمینان و هزینه کم در پروژه های هیدرولیکی و سدهای بزرگ بصورت گسترده مورد استفاده قرار گرفت.

در تخلیه کننده های تحتانی سدها در محلی که دریچه بصورت قائم در مقابل جریان قرار گرفته است با توجه به سرعت بالای جریان، افت فشار قابل توجه بوده و احتمال وقوع کاویتاسیون این محدوده را تهدید می کند. در این محدوده نیز می توان به کمک سیستمهای هوادهی و یا استفاده از نتایج مرتبط با بهینه کردن شکل شیارها خطرات ناشی از وقوع کاویتاسیون را کاهش داد. با توجه به میزان خطر موجود در نزدیکی دریچه ها طراحان سازه های هیدرولیکی هوادهی حجمی بیشتری را در محدوده دریچه ها توصیه می نمایند. بعنوان مثال آقای اکر (Acker) در سال 1989 میزان 20% هوادهی را برای شرایطی که سیال دارای سرعت بالای 30 m/s باشد توصیه می نماید. [21]

تحقیقات جهت بهینه کردن شکل شیار دریچه ها توسط انستیتو سازه های آبی و انرژی برقآبی چین در سال 1988 بر روی مدل یک تونل آب برای بررسی کاویتاسیون انجام گردیده است. سرعت ماگزیمم در محل آزمایش 15/5 m/s و ابعاد تونل 20×20 m بوده است. نتایج تحقیقات نشان داد که بهینه کردن شیار دریچه با گوشه های تیز به شیار دریچه ها با افست نسبی، گردشگی گوشه پایین دست و شیب دار کردن گوشه پایین دست، احتمال وقوع کاویتاسیون را تا 60% کاهش خواهد داد.

[18]



شکل (2-2) شیار دریچه

زاویه لبه دریچه نقش موثری در وقوع پدیده کاویتاسیون خواهد داشت. اگر دریچه دارای جریان روگذر باشد زاویه بهینه لبه 45 درجه بوده و اگر در محفظه فوقانی دریچه جریان ساکن وجود داشته باشد و دریچه تحت فشار هیدروستاتیکی باشد زاویه بهینه لبه دریچه 25 درجه می باشد. [5]



انتخاب شکل شیار دریچه ها با نسبت پهنا به عمق  $1/4$  تا  $2/5$  از وقوع کاویتاسیون به میزان قابل توجهی پیشگیری خواهد نمود. در محدوده نسبت پهنا به عمق کوچکتر از  $1/4$ ، احتمال وقوع کاویتاسیون پیچکی و در محدوده نسبت پهنا به عمق بالاتر از  $2/5$  احتمال وقوع کاویتاسیون ثابت، دریچه و شیار را تهدید خواهد نمود.

در زمینه نیروی پایین کشنده نیز مطالعات فیزیکی و انتشارات بسیار زیادی انجام شده است. نتیجه چنین مطالعاتی همواره این بوده است که در طراحی های جدید دریچه، زاویه لبه بطور محافظه کارانه انتخاب شود. بر این مبنا داوین (Dawin) در "هندبوک هیدرولیک کاربردی" زاویه  $35$  درجه را برای لبه دریچه ارائه داده است. عموماً زاویه لبه دریچه نسبت به کاهش نیروهای پایین کشنده در به حداقل رساندن ارتعاشات (لرزش ها) و کاویتاسیون تأثیر بیشتری دارد.

## 2-4- معادلات حاکم

قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله اندازه مقدار حرکت در جهات محورهای سه گانه مختصات که به معادلات ناویر- استوکس معروف هستند، بیان می شود. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و اندازه مقدار حرکت می باشد. چنانچه جزئی کوچک از سیال به عنوان حجم کنترل ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود، نیروهای وارده بر آن و اصل بقای جرم و اندازه مقدار حرکت در این سلول به صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می شوند. در جریان تراکم ناپذیر معادلات حاکم بر جریان به صورت معادلات زیر بیان می شود که در آنها  $\rho$  چگالی سیال،  $g$  شتاب ثقل،  $\mu$  لزجت سیال و  $P$  فشار می باشند.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad \text{معادله پیوستگی}$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 V \quad \text{معادله اندازه مقدار حرکت}$$

به منظور حل میدان جریان آشفته بر اساس معادلات پیوستگی و ناویر- استوکس، نیاز است تا تنشهای رینولدز و معادلات آن به روش خاصی مدل شود. در این صورت در حالت جریان دو بعدی با وجود سه معادله (یک معادله پیوستگی و دو معادله اندازه حرکت)، سه مجهول میدان (یعنی سرعتها در جهت  $x$  و  $y$  و فشار) معین می شوند. ترمهای آشفتگی در معادلات بر اساس یک سری معادلات جبری و یا معادلات دیفرانسیل تعیین خواهند شد. مدلهای آشفتگی با توجه به چگونگی استفاده مبانی طرح آنها و نیز تعداد معادلات دیفرانسیل جهت ارتباط تنشهای آشفتگی با سرعتهای

متوسطگیری شده و یا گرادینهای آنها به گروههای زیر تقسیم بندی می‌شوند. انواع مدل های آشفتگی مورد استفاده شامل مدل‌های صفر معادله ای، مدل‌های یک معادله ای، مدل‌های دو معادله ای، مدل تنش جبری و مدل تنش رینولدز می باشند که به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند.

## ۲-۴-۱- روشهای انفصال معادلات

در انفصال معادلات دیفرانسیل اطلاعاتی که در حل دقیق این معادلات حاکم می‌باشد با مقادیر جدا از هم تعویض می‌گردد که بدین ترتیب توزیع پارامترهای دخیل در معادله دیفرانسیل به صورت ناپیوسته صورت می‌گیرد. معمولاً<sup>۴</sup> در تعیین پروفیل انتخابی برای متغیر مورد نظر، منطقه کوچکی از میدان را پوشش می‌دهد که بدین ترتیب میدان محاسباتی به تعدادی میدان کوچکتر تقسیم می‌شود که هر یک از این میدانهای کوچک دارای یک پروفیل عرضی می‌باشد. معادله انفصال رابطه جبری است که مقادیر متغیر در یک میدان کوچک را به هم مرتبط می‌سازد.

دو روش عمده به عنوان روشهای انفصال میدان مطرح می‌باشد که به نام روش اجزای محدود<sup>۴</sup> و روش تفاضل محدود<sup>۵</sup> شناخته شده اند. تفاوت بین روشهای تفاضل محدود و اجزاء محدود از نحوه انتخابی پروفیل‌های میدان های منفصل شده و نحوه بدست آوردن معادلات انفصال حاصل می‌شود. روش دیگری که این تحقیق متکی بر آن می‌باشد روش احجام محدود<sup>۶</sup> می‌باشد که دارای ظاهر روش تفاضل محدود است ولی بسیاری از ایده‌های اجزاء محدود را بکار می‌گیرد.

روش حجم محدود بعلاوه مستقیم بودن خاصیت بقای جرم در آن، در حل میدان جریان سیال نسبت به سایر روشهای انفصال ارجح است. این روش یکی از حالات ویژه روش مانده‌های وزن دار می‌باشد، که در آن درک مستقیم حالت فیزیکی مساله آسان می‌باشد. در این روش ابتدا دامنه مورد نظر به تعدادی حجم کنترل غیر هم پوشان تقسیم شده، بنحویکه هر حجم حول یک نقطه از میدان قرار گیرد و آنگاه از روی معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال‌گیری شده و معادلات به روش عددی منفصل می‌گردند. ایده اصلی در این روش انفصال تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط مجزا نمی‌باشد، بلکه شرط برقراری اصل بقای جرم بصورت ماکروسکوپی دارای اهمیت است. پس از انتگرال‌گیری روی حجم کنترل مدنظر مربوط به هر گره، عبارت جابجایی<sup>۷</sup> و پخش<sup>۸</sup> باید بگونه‌ای منفصل شوند که فرمولبندی حاصل پایدار و دقیق باشد.

<sup>4</sup> Finite element Method

<sup>5</sup> Finite difference Method

<sup>6</sup> Finite Volume Method

<sup>7</sup> Convection



# فصل سوم

## مدل فیزیکی

### ۳-۱- مشخصات کلی سد مخزنی مورد مطالعه و تأسیسات وابسته

سد مخزنی ژاوه از نوع R.C.C بوده که بر روی رودخانه سیروان در غرب کشور اجرا می‌گردد.

۳-۱-۱- مشخصات سد: [22]

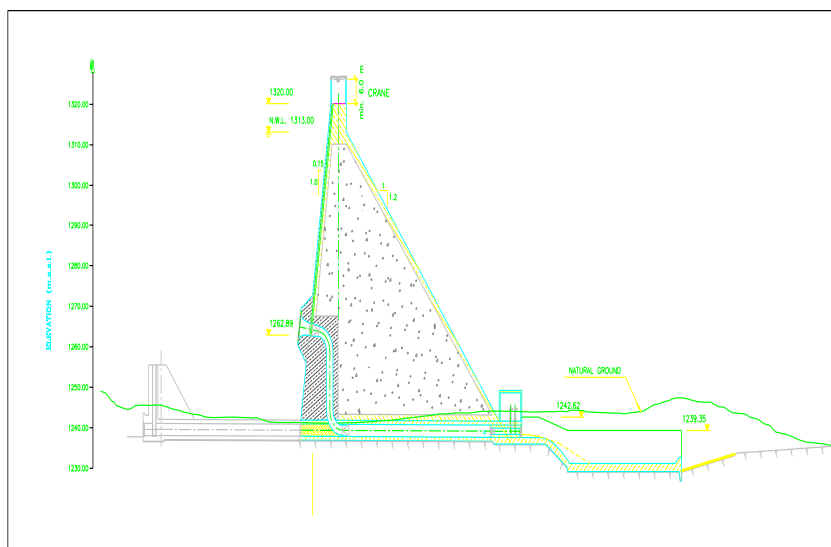
جدول (1-3) مشخصات سد ژاوه

نوع سد	بتنی غلطکی (R.C.C)
تراز آستانه سد	1320 متر از سطح دریا
تراز بستر رودخانه در مکان سد	1235 متر از سطح دریا
ارتفاع سد	85 متر
طول آستانه سد	360 متر
عرض آستانه سد	6 متر

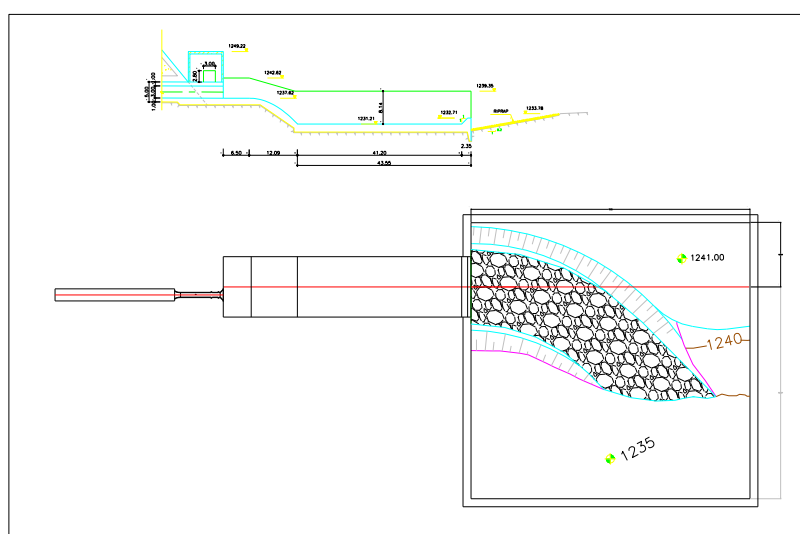
جریان خروجی از حوضچه آرامش به طور مستقیم وارد رودخانه می‌گردد. تراز بستر رودخانه 1235 متر و در فاصله 60 متری بعد از حوضچه آرامش مقطع کنترل و بازاء دبی عبوری اشل تراز سطح آب رودخانه تعیین گردیده است. در محدوده خروجی حوضچه آرامش با ایجاد سنگ چین (Rip - Rap)، بستر در مقابل عبور جریان حفاظت می‌شود.

### ۳-۲- مشخصات کلی سیستم انحراف

سیستم انحراف آب سد، بطور کلی شامل فرازبند بتنی، سازه ورودی جریان، کالورت (زیر بدنه سد قرار می‌گیرد)، سازه خروجی، حوضچه آرامش و نشیب‌بند بتنی می‌باشد.



شکل (۳-۱) برش طولی سیستم انحراف سد مخزنی مورد مطالعه



شکل (۳-۲) مقطع و پلان کالورت، تخلیه کننده و حوضچه آرامش سد مخزنی مورد مطالعه

۳-۲-۱- کالورت انحراف : سازه اصلی انحراف شامل يك کالورت دو دهانه به ابعاد 3×3 مي باشد که

طول کالورت راست 147/42 متر و طول کالورت چپ 148/47 متر است. به این ترتیب کف

ورودي سازه کالورت روي توده سنگ ساحل چپ واقع خواهد گرديد و با توجه به مشخصات هندسي

و هيدروليكي کالورت، شیب آن 0/3 درصد خواهد بود. سرعت جریان در کالورت انحراف، هنگام

عبور سیلاب طراحی که بصورت فشار می‌باشد، 12/78 متر بر ثانیه است، که به منظور آرام کردن جریان خروجی، از یک حوضچه آرامش در انتهای کالورت استفاده شده است.

۳-۲-۲- سازه ورودی : در هر دو دهانه ورودی کالورت انحراف، شرایط مناسب آبیگری و نیز

امکان استفاده از دریچه StopLog لحاظ گردیده است. کف سازه ورودی کالورت انحراف در تراز 1238/06 متر از سطح دریا می‌باشد. دهانه ورودی سازه در تاج و دیواره‌های جانبی با قوس

دایره‌ای به شعاع 0/5 متر و در کف با معادله بیضی  $\frac{X^2}{3/0^2} + \frac{Y^2}{0.3^2} = 1$  طراحی شده است.

۳-۲-۳- سازه خروجی : خروجی کالورت (همراه با یک بازشدگی از عرض ۶ متر به ۱۵ متر)، با یک شوت

(منحنی تراژکتوری) به حوضچه آرامش با همین عرض متصل می‌شود، سپس جریان تسکین یافته پس از عبور از کانال پایاب، به رودخانه هدایت می‌گردد.

۳-۲-۴- منحنی پرتابی (Trajectory): حد فاصل بین پلاتفرم خروجی سیستم انحراف و حوضچه آرامش

از یک منحنی تراژکتوری (پرتابی) استفاده شده است.

### 3-3- مجرای تخلیه‌کننده تحتانی

مطابق نقشه‌های ارائه شده از طرف کارفرما، سد مخزنی مورد مطالعه از دو دهانه کالورت انحراف با مشخصات زیر بهره گرفته است. از میان این کالورت‌ها، کالورت سمت چپ مسدود و کالورت سمت راست بعنوان تونل تخلیه‌کننده عمیق مد نظر قرار گرفته است. بر این اساس در قسمت میانی کالورت سمت راست و با استفاده از پوشش فولادی و استفاده از دو دریچه سرویس و اضطراری، تخلیه‌کننده فوق طراحی گردیده است.

جریان پشت سد ابتدا وارد دهانه آشغالگیر با تراز کف ورودی 1261/50m شده و پس از طی مسافتی به تراز 1237/62 m رسیده و سپس از طریق ورودی شیپوری وارد تخلیه‌کننده می‌شود. جریان پس از عبور از تخلیه‌کننده به طول 12/24 m با پوشش فلزی وارد پلاتفرم خروجی سیستم انحراف با تراز کف 1237/62m شده و سپس از یک منحنی تراژکتوری (پرتابی) عبور و وارد حوضچه آرامش پائین دست بتنی با تراز کف 1231/21 m شده که جریان با یک شیب معکوس به تراز 1235 m وارد مسیر رودخانه می‌گردد.

در قسمت میانی مجرای تخلیه‌کننده، سیستم کنترل شامل یک دریچه کشویی اضطراری و یک دریچه کشویی سرویس قرار دارد که به منظور حفاظت در مقابل پدیده کاویتاسیون، دو هواده بلافاصله درپائین‌دست دریچه اضطراری با قطر 0/2 متر با شیر یکطرفه در نظر گرفته شده است که البته قطر نهایی هواده پس از انجام آزمایش‌ها مشخص خواهد شد. در پائین‌دست دریچه سرویس و با توجه به افزایش سطح مقطع مجرا، جریان با سطح آزاد پیش‌بینی شده و انتظار می‌رود که مجرای هواده با تامین هوا از طبیعت و با طراحی صحیح این وظیفه را عهده دار گردد.

### ۳-۴- مقیاس مدل

مدل فیزیکی مجرای تخلیه‌کننده تحتانی با مقیاس ۱:۱۰ ساخته شده است. انتخاب مقیاس مدل باید به گونه ای باشد که نیروهای غالب در پدیده مورد بررسی به درستی مدل شده و سایر نیروها نیز قابل صرف‌نظر کردن باشند و یا به نحوی اثر آنها را کاهش داد. عموماً در اکثر مدل های هیدرولیکی، با صرف‌نظر کردن از اثر نیروهای کشش سطحی و فشار الاستیکی خطای قابل توجهی بوجود نیامده و در صورت غالب بودن نیروهای ثقل و لزجت مدل ها بخوبی می توانند حرکت سیال را شبیه‌سازی نمایند.

اصولاً جریان در بالادست دریچه سرویس تخلیه‌کننده عمقی از نوع تحت فشار و در پائین‌دست آن با سطح آزاد است. هدف از این پایان نامه، بررسی وضعیت جریان در قسمت تحت فشار مجرای تخلیه‌کننده عمقی می‌باشد، لذا می‌بایست از قانون تشابه رینولدز ( $Re$ ) که مبین نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت است، برای مدل سازی استفاده گردد. براساس این قانون، نسبت سرعتها در مدل و واقعیت ( $V_r = V_m/V_p$ ) با مقیاس مدل ( $\lambda_r = L_m/L_p$ ) نسبت معکوس دارد. لیکن باید توجه داشت که در تخلیه‌کننده‌های عمقی، سرعت جریان زیاد بوده و لذا استفاده از مدلی با مقیاس نسبتاً بزرگ که معرف جزئیات جریان در این مجرا باشد مستلزم آن است که سرعت جریان در مدل فوق العاده بالا باشد. در مجرای تخلیه‌کننده عمقی سد مخزنی مورد مطالعه، سرعت جریان در اطراف دریچه به بالاتر از 30/07 m/s می‌رسد. حال، چنانچه مقیاس مدل 1:10 انتخاب شده و سیال مورد مطالعه آب باشد، به سرعتی بالاتر از 300/7 m/s در مدل نیاز خواهد بود که تامین آن امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا بر اساس تجربیات موجود، از معیار تشابهی فرود ( $F_r$ ) به جای قانون رینولدز استفاده می‌گردد، مشروط بر آنکه عدد رینولدز در مدل از حد خاصی ( $10^5$ ) بزرگتر بوده، تا اثر لزجت قابل صرف‌نظر باشد.



برای تحقق شرط فوق، حداقل مقیاس لازم  $\lambda_r$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_{\max} = 44.42 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow V_p = 29.18 \text{ m/s}$$

$$Re_p = \frac{V_p y_p}{\nu} = \frac{29.18 \times 1.45}{10^{-6}} = 423 \times 10^5$$

$$Re_m = 10^5$$

$$\lambda_r^{1.5} = \frac{Re_m}{Re_p} = \frac{10^5}{423 \times 10^5} = \frac{1}{423} \Rightarrow \lambda_r = \frac{1}{56} \left\langle \frac{1}{10} \right\rangle$$

در روابط فوق  $Re_p$  عدد رینولدز پرتوتیپ (نمونه واقعی)،  $y_p$  ارتفاع مجرا در محل دریچه سرویس و  $V_p$  سرعت جریان در مجرا، در واقعیت و بلافاصله پس از دریچه سرویس می‌باشند. مقیاس مدل انتخابی 1:10 و بزرگتر از حداقل مقیاس قابل قبول بوده و لذا مناسب می‌باشد. عمده‌ترین روابط حاکم در معیار تشابه عدد فرود به قرار زیر می‌باشند.

$$M_L = \frac{L_p}{L_M} \text{ مقیاس طولی}$$

$$M_V = \frac{V_p}{V_M} = M_L^{0.5} \text{ مقیاس سرعت}$$

$$M_Q = \frac{Q_p}{Q_M} = M_L^{2.5} \text{ مقیاس دبی}$$

$$M_T = \frac{T_p}{T_M} = M_L^{0.5} \text{ مقیاس زمان}$$

$$M_f = M \left( \frac{h}{L} \right) = 1 \text{ مقیاس افت اصطکاکی}$$

بنابراین دبی حداکثر در مدل برابر 140/47 lit/s بوده و بازا هد 74/68 متر در پرتوتیپ، هد آب در مخزن در مدل برابر 7/468 متر خواهد بود. همچنین سرعت ماکزیم در خروجی مجرا در مدل معادل 9/23 m/s برآورد می‌گردد. البته لازم به ذکر است که با توجه به افت‌های موجود در مسیر که تابع هندسه مجرا و میزان بازشدگی دریچه‌ها می‌باشد، مقادیر هد واقعی در مدل تعریف می‌گردد که مطمئناً از هد 7/47 متر کمتر خواهد بود. میزان این افت بر اساس روش تحلیلی محاسبه و با کاهش هد مرجع به مدل اعمال می‌گردد.

### ۳-۵- اجزاء مدل

مدل مجرای تخلیه کننده عمقی سد مخزنی مذکور، شامل لوله ورودی مجرا به قطر ۹/۵ متر، تبدیل ها، لوله به قطر ۵/۵ متر، شیارهای دریچه اضطراری و سرویس، اتاقک های دریچه اضطراری و سرویس، مجرای میانی، هوادهای بین دو دریچه، دریچه های سرویس و اضطراری، بازشدگی، هواده و همچنین کل مجرای پایین دست دریچه سرویس همراه با شیب معکوس انتهایی با جزئیات کامل مطابق نقشه های ارائه شده بوسیله مهندس مشاور طرح، با مقیاس ۱:۱۰ از جنس ورق شفاف (پلگسی گلاس) و در قسمتهایی از فلز ساخته خواهد شد.

### ۳-۵-۱- مخزن تأمین هد

به منظور تأمین ارتفاع آب لازم و دبی مورد نیاز، از یک مخزن روباز فلزی استفاده شد. این مخزن به شکل استوانه بوده و مطابق شکل (۳-۳) به قطر ۵ متر و ارتفاع ۶ متر و در ارتفاع ۶ متری مخزن دیگری به قطر ۲ متر و ارتفاع ۴ متر اضافه گردیده که ارتفاع کل هر دو مخزن ۱۰ متر می باشد. مخزن به وسیله چهار پمپ به ظرفیت هر یک ۲۵۰ لیتر بر ثانیه تغذیه می گردد و برای آرام ساختن جریان و جلوگیری از تلاطم آب ورودی به مخزن از صفحات مشبک انرژی گیر استفاده می شود.



شکل (۳-۳) نمایی از مخزن تأمین هد مدل

### 3-5-2- کالورت

مدل کالورت در اتصال با مخزن تأمین هد قرار داشته و قسمت ورودی مدل درون مخزن قرار گرفته است؛ درون کالورت مربع شکل به ابعاد  $30 \times 30$  سانتیمتر و به طول تقریبی 3 متر قرار گرفته و به داخل مخزن متصل گردیده است. تعداد کافی پیزومتر برای اندازه‌گیری افت‌های ناشی از ورودی بر روی آن در این قسمت نصب شده است.

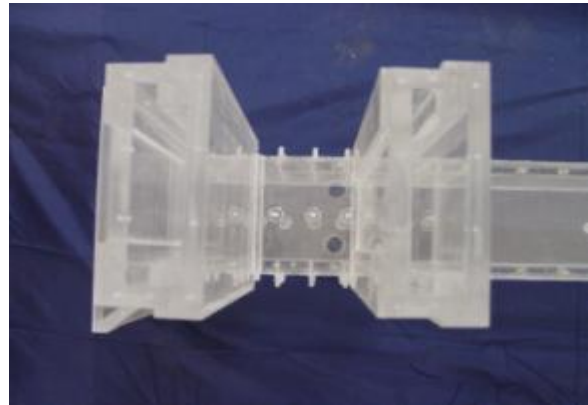
در Prototype جریان پشت سد ابتدا وارد دهانه آشغالگیر با تراز کف ورودی  $1261/50$  متر شده و پس از طی مسافتی به تراز  $1237/62$  متر رسیده و سپس از طریق ورودی شیپوری وارد تخلیه‌کننده با تراز کف  $1237/62$  متر می‌شود. جریان پس از عبور از تخلیه‌کننده به طول  $122/4$  متر با پوشش فلزی از یک منحنی تراژکتوری (پرتابی) عبور و وارد حوضچه آرامش پائین‌دست بتنی با تراز کف  $1231/21$  متر شده که جریان با یک شیب معکوس به تراز  $1235$  متر وارد مسیر رودخانه می‌گردد. در شکل شماره (3-4) مقطعی از دهانه کالورت بالادست دیده می‌شود.



شکل (۳-۴) نمایی از کالورت بالادست

### ۳-۵-۳- مجرای بالادست دریچه اضطراری

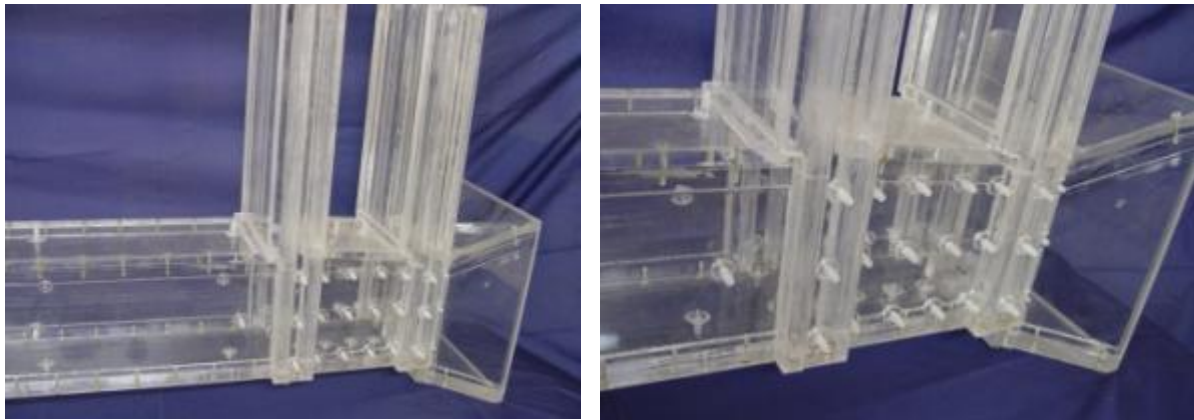
طول بالادست دریچه اضطراری تا اتصال به قطعه ابتدایی زنگوله‌ای شکل به طول ۱۰۷/۵ سانتیمتر مدل گردیده و پیزومترهایی در نقاط مختلف این مجرا بر روی سقف، کف و دیواره راست برای اندازه‌گیری فشار استاتیک متوسط نصب گردیده است.



شکل (۳-۵) (مقطع و پلان) نمایی از مجرای بالادست دریچه اضطراری

### ۳-۵-۴- اتاقک دریچه اضطراری، هواده و مجرای میان دو دریچه

به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری فشارهای وارد بر دریچه در تخمین نیروها و تحلیل ارتعاشات احتمالی شیار دریچه اضطراری، اتاقک دریچه، هواده و مجرای میان دو دریچه اضطراری و سرویس به دقت و مطابق با نقشه‌های کارفرما اجرا شده است. همچنین برای بررسی دقیق الگوی جریان، افت‌های ناشی از طرح، لایه برشی جریان و جت خروجی از دریچه و به منظور بررسی گردابه‌های تشکیل شده بین دو دریچه و بررسی اثر و میزان هواده‌ی پیرومترهایی در نقاط بحرانی نصب شده است. برای اندازه‌گیری سرعت هوا در لوله هواده پیرومتری روی آن نصب شده است. در شکل (۳-۶) محدوده شیار و اتاقک دریچه اضطراری دیده می‌شود.



شکل (۳-۶) (مقطع) نمایی از شیار و مجرای پایین‌دست دریچه اضطراری

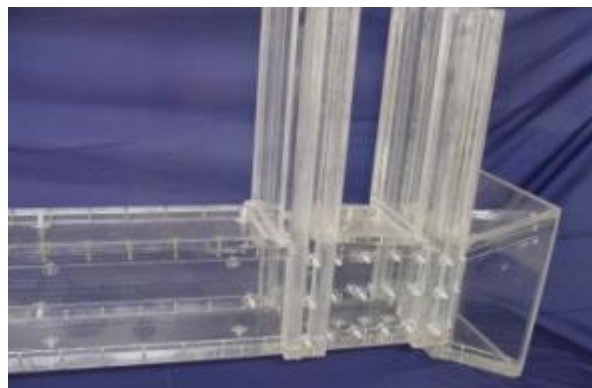
### ۳-۵-۵- دریچه اضطراری

دریچه اضطراری از نوع کشوئی ساده و از جنس پلگسی گلاس ساخته شده است. این دریچه دارای صفحه مقاوم در برابر جریان در بالادست آن می‌باشد (upstream skin plate). تقویت‌کننده‌های دریچه، زاویه لبه زیرین دریچه و لاستیک‌های آب‌بندکننده دریچه به دقت ساخته و نصب و شفت قائمی به منظور حرکت دریچه روی آن نصب گردیده و همچنین برای بازشدگی‌های مختلف دریچه اشل مناسبی مقابل بازوی خارجی شفت نصب و نیز شیار دریچه مدرج شده است. برای اندازه‌گیری فشارهای وارد بر دریچه تعداد ۸ پیرومتر روی دریچه تعبیه و تمام این پیرومترها به شلنگ‌های رابط، محکم متصل و از طریق فضاها باز

داخل دریچه به بیرون هدایت و با اتصال به مانومترهای قائم، فشار نقاط فوق برداشت گردیده است. در شکل (۷-۳) نمای بالادست دریچه اضطراری و در شکل (۸-۳) مقطع راست دریچه دیده می‌شود.



شکل (۸-۳) (مقطع) دریچه اضطراری



شکل (۷-۳) نمایی از بالادست دریچه اضطراری

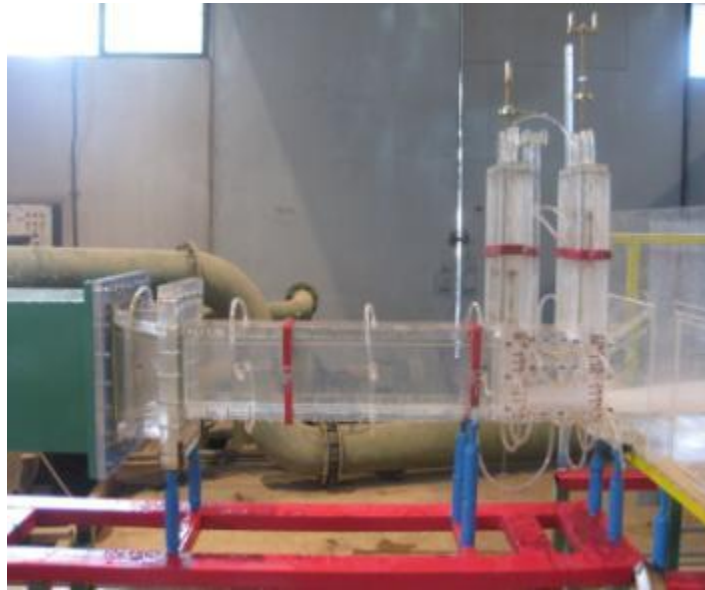
### ۳-۵-۶- دریچه سرویس

برای بهره‌برداری از تخلیه‌کننده تحتانی دریچه سرویس از نوع کشوئی طراحی شده است. این دریچه در مدل با ورق شفاف ساخته و تعداد ۸ پیزومتر برای اندازه‌گیری فشار روی آن نصب گردیده است. بازوهای نگهدارنده دریچه بطور شماتیک و با مکانیزم فیزیکی برای حرکت اجرا شده است. ضمناً لاستیک‌های آب‌بند نیز مطابق نقشه‌های مشاور در نظر گرفته و نصب گردیده است (شکل ۹-۳).



شکل (۹-۳) (پلان) نمایی از دریچه سرویس

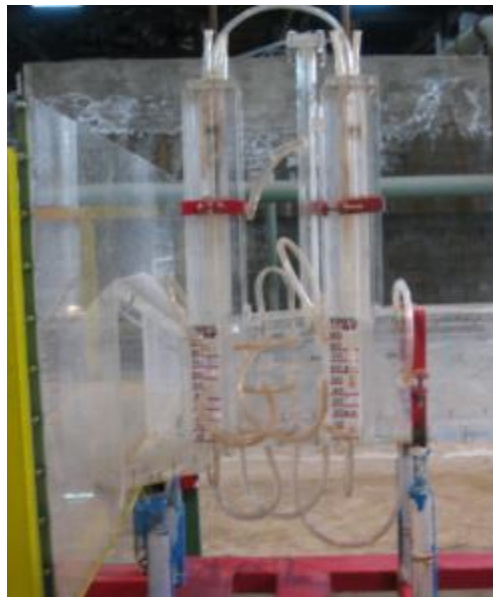




شکل (۳-۱۰) مقطعی نمایی از دریچه سرویس

### ۳-۵-۷- مجرای خروجی تخلیه‌کننده

در قسمت خروجی مجرای تخلیه‌کننده، به منظور بررسی اثر هوادهی و میدان جریان، طول حدود ۲.۵ متر که معادل ۲۵ سانتیمتر در مدل می‌گردد در نظر گرفته شده است. جت خروجی پس از عبور از این مجرا وارد یک حوضچه می‌گردد. علت انتخاب این محدوده، شبیه‌سازی نسبی هندسه پائین‌دست می‌باشد که عبور هوا به داخل مجرا را بهتر مدل نماید (شکل ۳-۱۱).



شکل (۳-۱۱) نمایی از مقطع خروجی

### ۳-۶- ابزارهای اندازه‌گیری

#### ۳-۶-۱- اندازه‌گیری فشار

به منظور اندازه‌گیری مقادیر متوسط فشار، از تعداد متنابهی پیزومتر استفاده می‌گردد. در مدل تخلیه‌کننده تحتانی سد مخزنی مورد مطالعه ۱۸۰ پیزومتر جهت اندازه‌گیری فشار در م‌کان‌های مختلف مجرا شامل ورودی، بدنه دريچه‌ها، شياره‌های دريچه، ديواره‌ها، كف تونل پايين‌دست مجرا و حوضچه آرامش در نظر گرفته شده است. موقعیت این نقاط اندازه‌گیری فشار با توجه به شکل هندسی مقطع و تغییرات آن به گونه‌ای که نشان‌دهنده احتمال جدایی جریان، افت فشار و رخداد پدیده کاویتاسیون باشد، انتخاب گردید. کلیه پیزومترهای تخلیه‌کننده به وسیله شلنگ‌های رابط به مانومترهای قائم متصل، و در بستر و دیوار طرفین حوضچه آرامش ۱۰۸ پیزومتر جهت اندازه‌گیری فشار استاتیکی تعیین گردیده است. شیوه آرایش نقاط اندازه‌گیری به صورتی است که در بستر حوضچه آرامش ۶۴ پیزومتر در ۳ ردیف، روی دیوارهای راست و چپ هر کدام ۲۲ پیزومتر در ۱ ردیف جمعاً ۴۴ پیزومتر نصب گردیده است. کلیه پیزومترهای حوضچه آرامش با استفاده از تابلوی پیزومتریکی اندازه‌گیری ارتفاع ستون معادل آب مطابق (شکل ۳-۱۲)، مقادیر فشار در مدل را نشان داده و آنگاه با اعمال اثر موقعیت پیزومتر، نسبت به صفر مبنا و با توجه به اثر مقیاس، مقادیر متناظر فشار در مقیاس واقعی حاصل می‌گردد.



شکل (۳-۱۲) صفحه مانومتر جهت اندازه‌گیری فشارهای استاتیکی



### 3-6-2- اندازه‌گیری دبی جریان

اندازه‌گیری دبی جریان در مدل با استفاده از سرریز مستطیلی و مثلثی انجام پذیرفت.

رابطه کلی اندازه‌گیری دبی جریان روی سرریزهای مستطیلی عبارتست از :

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L h^{\frac{3}{2}}$$

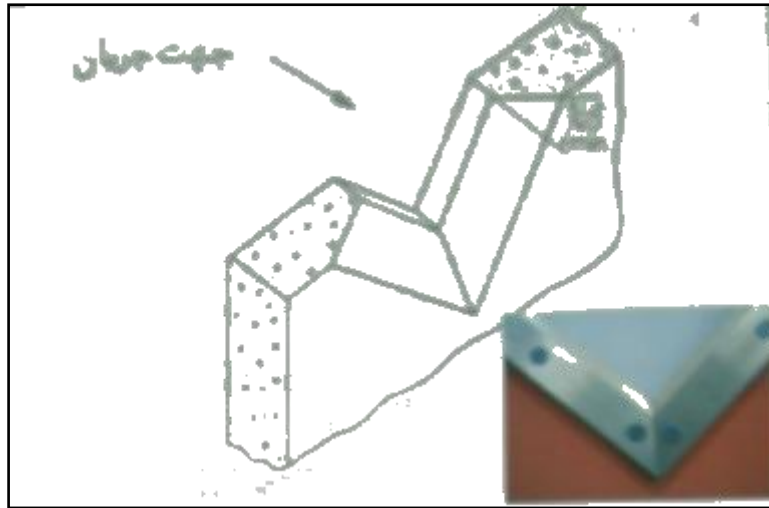
تغییرات ضریب دبی  $C_d$  بصورت تابعی از  $\frac{h}{p}$  ، توسط معادله Rehbock بصورت زیر ارائه شده است.

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{h}{p}$$

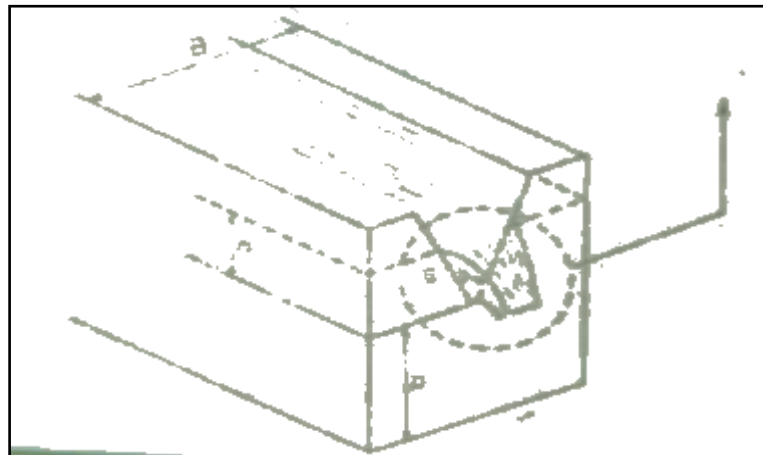
این رابطه برای  $\frac{h}{p} \leq 5$  کاربرد دارد. در این روابط  $Q$  دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه) ،  $h$  فاصله

لبه سرریز تا بالاترین تراز آب پشت سرریز (متر) ،  $L$  عرض سرریز یا عرض کانال (متر) و  $p$  فاصله لبه سرریز تا کف کانال

مطالعات فراوان روی سرریز مثلثی در مراکز آزمایشگاه‌های هیدرولیکی جهان بعمل آمده و ضرایب دبی آن حسب وضعیت قرارگیری آن نسبت به مخزن ارائه گردیده است. جهت اندازه‌گیری دبی با دقت کافی به وسیله سرریز مثلثی لازم است نکاتی در ساخت و نصب آن رعایت گردد. در این ارتباط لازم است تا عرض سرریز تمام عرض مخزن اندازه‌گیری را شامل و کاملاً عمودی و صاف باشد، آستانه سرریز از کف مخزن فاصله داشته و کوتاه نبوده و پشت صفحه سرریز (بالادست سرریز) صاف و عمود بر مخزن اندازه‌گیری قرار گیرد. همچنین لبه تاج سرریز به ضخامت ۱ تا ۲ میلیمتر و کاملاً صاف و یکنواخت بوده، تقاطع دو لبه سرریز بایستی زاویه دقیق و مورد نظر را داشته و انتهای لبه سرریز تحت زاویه حداکثر ۶۰ درجه در جهت جریان مطابق شکل (۳-۱۳) بطور مورب تراش داده شود. این سرریزها با صفحه برنجی به ضخامت ۶ میلیمتر ساخته شده و جریان باید به صورت آزاد از روی سرریز عبور نماید. لیمنیتر اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب نیز در فاصله پنج برابر بار آب روی سرریز نصب می‌گردد.



شکل (۳-۱۳) تراش زاویه لبه پایین دست سرریز مثلثی



شکل (۳-۱۴) مشخصات نصب سرریز مثلثی در مخزن فلزی

دبی جریان در سرریز مثلثی با استفاده از رابطه زیر حاصل می گردد که در آن  $Q$  دبی جریان عبوری از سرریز (متر مکعب بر ثانیه)،  $C_d$  ضریب دبی که حسب مقدار جریان تغییر می یابد (برای دبی کم 0/608 و برای دبی زیاد 0/584)،  $\theta$  زاویه بین دو لبه کاملاً صاف طرفین سرریز (زاویه سرریز مثلثی) بر حسب درجه و  $h$  بار آب روی سرریز بر حسب متر است.

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d \tan \frac{\theta}{2} h^{\frac{5}{2}}$$

برای سرریز با زاویه 90 درجه (درجه  $\theta=90$ ) رابطه را می توان بصورت زیر نوشت.

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d h^{\frac{5}{2}}$$

با استفاده از رابطه بالا دبي عبوري از سرريز 90 درجه بازاي بار آب قابل محاسبه مي‌باشد. بار آب از 5 تا 40 سانتيمتر محاسبه و در جدولي تنظيم و استفاده مي‌گردد. لازم به ذكر است كه بايد بار آب روي سرريز حداقل 5 سانتيمتر و ارتفاع سرريز (p) از 45 سانتيمتر كمتر نباشد. ضمن رعايت نكات در مورد ساخت و نصب سرريز مثلي دقت اندازه‌گيري با سرريز مثلي 1% مي‌باشد.

### 3-6-3- اندازه‌گيري دبي

در انتهاي پاياب تخليه جريان، يك حوضچه آرامش به ابعاد 2×2 متر جهت استهلاك انرژي جريان عبوري و در انتهاي حوضچه با تعبیه بلوك هاي سفالي و انرژي شكن هاي بزرگ سعي مي‌گردد تا جريان نسبتاً آرامي وارد يك مخزن فلزي با ابعاد مشخص جهت اندازه‌گيري دبي مي‌گردد. در انتهاي اين مخزن به منظور اندازه‌گيري دبي جريان از يك سرريز مثلي لبه تيز، كه در انتهاي مخزن برگشت نصب شده، استفاده مي‌گردد. لبه و زاويه اين سرريزها بر اساس استانداردهاي معمول ساخته و كالبره گرديد هاند و منحنی دبي اشل تهيه شده آنها در اين پروژه مورد استفاده قرار مي‌گيرد. اندازه‌گيري هد روي سرريز نيز با استفاده از يك ليمينيتر متصل در كنار مخزن مطابق شكل (3-15) كه با لوله رابط به داخل مخزن متصل گرديده، با دقت 0/1 ميليمتر صورت گرفت.



شکل (۳-۱۵) نمایی از لیمینومتر و سرریز مستطیلی جهت اندازه‌گیری دبی

### ۳-۶-۴- اندازه‌گیری ارتفاع آب مخزن

ارتفاع آب موثر در مخزن توسط پمپ های ورودی و شیرهای تخلیه خروجی مخزن قابل تنظیم می باشد. اندازه‌گیری هد مورد نظر با استفاده از یک مانومتر قائم متصل به مخزن مطابق شکل (۳-۱۶) صورت خواهد گرفت. با توجه به قطور بودن نسبی این لوله ، نوسانهای سطح آب در آن به خوبی مستهلک شده و لذا انتظار می‌رود که از دقت بالایی برخوردار باشد.



شکل (۳-۱۶) نمایی از مانومتر قائم متصل به مخزن

برای اندازه‌گیری ارتفاع آب مخزن

### ۳-۶-۶- اندازه‌گیری تراز آب

برای اندازه‌گیری تراز سطح آب در قسمت‌های مختلف از اشل میله‌ای Point Gauge، خطکش و مدرج کردن دیواره سازه در قسمت‌های مورد نیاز مطابق شکل (۳-۱۷) استفاده می‌گردد.



شکل (۳-۱۷) نمائی از اشل میله‌ای Point Gauge در مدل

### ۳-۷- خطاهای اندازه‌گیری در مدل

در مدل جهت اندازه‌گیری پارامترهای مختلف جریان نظیر دبي، عمق، تراز سطح آب، سرعت، فشارهای استاتیکی و فشارهای دینامیکی از وسایل و دستگاه‌های مختلف استفاده می‌گردد که در قسمت قبل به آنها اشاره گردید. در این بخش بررسی خطاهای موجود اندازه‌گیری‌ها ارائه می‌شود.

**3-7-1- خطا در ساخت مدل :** در حین ساخت مدل و نصب تجهیزات و قطعات باید دقت و وسواس خاصی به خرج داد. زیرا تشابه‌سازی دقیق هندسی منجر به تشابه‌سازی مناسب سینماتیکی و تا حدی دینامیکی بین مدل و نمونه واقعی خواهد شد. در این راستا تعیین تراز دقیق بعضی قسمت ها مانند رقوم تاج سرریز و اشل‌بندی قسمت‌های مختلف سازه، جهت تعیین عمق یا تراز سطح آب، از اهمیت مضاعفی برخوردار است. تعیین تراز قسمت های مختلف توسط دوربین نیوو (ترازیاب) انجام می‌پذیرد. دقت اندازه‌گیری توسط قرائت تار میانی دوربین با نشان‌روی به خطکش مخصوص که تا حد میلی‌متر مدرج شده است، معادل  $0/5 \pm$  میلی‌متر در مدل ( $12/5 \pm$  میلی‌متر در نمونه واقعی) می‌باشد. لذا سعی می‌شود تراز قسمت‌های مختلف مدل تا دو رقم اعشار انعکاس یابد.

**3-7-2- خطا در قرائت رقوم سطح آب و عمق جریان:** قرائت تراز سطح آب در مخزن بالادست توسط اشل میله‌ای (یا لمینیمتر) انجام می‌پذیرد. دقت اندازه‌گیری تراز آب (با فرض انطباق صحیح نوک سوزن اشل بر سطح آب)، معادل  $0/1 \pm$  میلی‌متر می‌باشد. حال چنانچه خطای انسانی را برای عدم انطباق دقیق سوزن اشل با سطح آب در نظر بگیریم، میزان دقت را می‌توان  $1 \pm$  میلی‌متر در مدل ( $25 \pm$  میلی‌متر در نمونه واقعی) تخمین زد. برای اندازه‌گیری عمق توسط خطکش مدرج شده

بر روی دیوار، بسته به شرایط جریان ، میزان خطا متفاوت می‌باشد. در جریان یکنواخت و بدون نوسان، میزان خطای اندازه‌گیری عمق به  $\pm 1$  میلی‌متر در مدل و در جریان های نوسانی نظیر جریان در کانال های جانبی و حوضچه های آرامش ، این خطا می‌تواند تا حد  $\pm 5$  میلی‌متر در مدل ( $\pm 125$  میلی‌متر در نمونه واقعی) بالغ گردد.

**3-7-3- خطای اندازه‌گیری دبی:** دبی جریان در مدل توسط سرریز لبه تیز مستطیلی انجام می‌شود. خطای اندازه‌گیری دبی جریان به سه پارامتر خطای ساخت کانال و لبریز لبه تیز و نصب آن، خطای قرائت اشل میله‌ای (قرائت ارتفاع تیغه آب روی لبریز) و خطای ناشی از نشستی مدل قبل از رسیدن جریان به محل اندازه‌گیری بستگی دارد. جهت قرائت ارتفاع تیغه آب روی سرریز از اشل میله‌ای استفاده می‌شود که دقت قرائت آن  $\pm 1\text{mm}$  در مدل عنوان شده است. با فرض خطای قرائت ارتفاع تیغه آب روی سرریز معادل  $\pm 1/5\text{mm}$  ( $\pm 1\text{mm}$  خطای قرائت اشل میله‌ای و  $\pm 0/5\text{mm}$  خطای نصب در مدل)، خطای اندازه گیری دبی مدل تعیین می‌شود. دبی جریان سرریز، از رابطه  $Q = CLh^{3/2}$  تعیین می‌گردد. از طرفین نسبت به ارتفاع تیغه آب روی سرریز مشتق گرفته و لذا داریم:

$$\Delta Q = \frac{3}{2} CLh^{1/2} \Delta h \rightarrow \Delta Q = 1.5 CLh^{1/2} \Delta h$$

با تقسیم دو رابطه خواهیم داشت :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 1.5 \frac{\Delta h}{h}$$

مقدار  $\Delta h = \pm 1/5 \text{ mm} = \pm 0/0015 \text{ m}$  می‌باشد. برای تعیین  $h$  از دبی‌های میانی استفاده می‌شود تا بتوان متوسط خطای وارده در محاسبات را ارزیابی کرد. اگر دبی نمونه واقعی تونل  $400\text{m}^3/\text{s}$  در نظر گرفته شود، با توجه به مقیاس 1:25، میزان دبی در مدل معادل 128 لیتر بر ثانیه و مقدار  $h$  در مدل (با فرض  $Cd=1$  و  $L=1\text{m}$ ) برابر با 250mm یا 0/25m خواهد بود. پس:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 1.5 \times \frac{\pm 0.0015}{0.25} = \pm 0.009 = \pm 0.9\%$$

حال اگر برای دبی میانی ذکر شده، میزان نشتی جریان قبل از رسیدن به محل اندازه‌گیری معادل یک لیتر بر ثانیه باشد، خطایی معادل  $(1:128=0/0078)$  یا  $0/78\%$  خواهد داشت. بنابراین در مجموع برای اندازه‌گیری دبی در مدل، متوسط خطایی معادل  $0/9+0/78=1/68\%$  برآورد می‌شود.

### 3-8- نحوه انجام آزمایش‌ها

بر روی مدل فیزیکی معرفی شده آزمایش‌های مورد نظر، به شرح زیر انجام گردید.

با توجه به اینکه میدان جریان پایین دست دریچه، مدنظر تحقیق حاضر بوده لذا دریچه سرویس در آزمایش‌ها کاملاً باز بوده و آزمایش‌ها بر روی دریچه اضطراری انجام گرفته‌اند. و از آنجایی که تأثیر شکل لبه بر میدان جریان مورد نظر بوده است در نتیجه از اثرات هوادهی در آزمایش‌ها صرف‌نظر گردید. به این معنی که لوله هوادهی بوسیله سرپوش مخصوصی کاملاً بسته شد تا از ورود هوا به جریان جلوگیری شود.

با توجه به ثابت بودن زاویه لبه دریچه در مدل فیزیکی، کلیه آزمایش‌ها بر روی دریچه با زاویه لبه  $22/5$  درجه انجام شده‌اند.

ابتدا هد آب بر روی 2 متر تنظیم شد و بر اساس آن بازشدگی‌های 90 و 70 و 50 و 30 درصد مورد بررسی قرار گرفت. برای هر کدام از آزمایش‌ها، مقادیر فشارهای هیدروستاتیک در نقاط مورد نظر برداشت شد. سپس جهت تهیه پروفیل جریان در پایین دست دریچه مقادیر پروفیل سطح آب در سه نقطه قرائت گردید. سپس برای هر کدام از درصدهای بازشدگی، دبی آب گذرنده از زیر دریچه به کمک سرریز لبه مثلثی برداشت شد.

در گام بعدی هد آب به ترتیب بر روی 3 و 4 و 5 متر تنظیم و آزمایش‌ها برای بازشدگی‌های مذکور تکرار شد.

# فصل چهارم

## مدل عددی



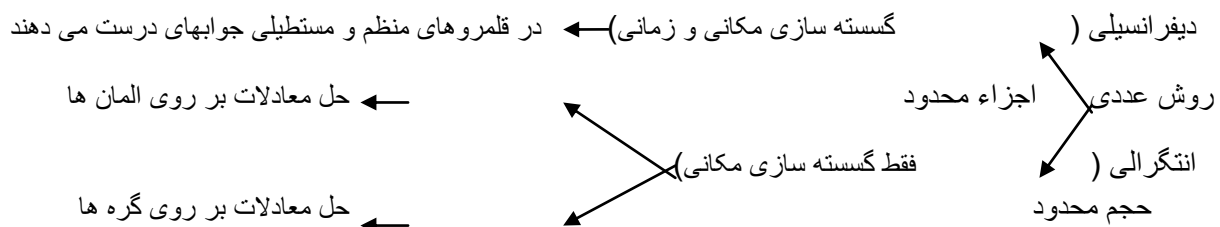
#### ۴-۱- مقدمه

در مکانیک سیالات برای حل معادلات سه روش اصلی وجود دارد. ۱- تئوری ۲- تجربی ۳- عددی

روش تئوری به حل تحلیلی معادلات با استفاده از ریاضیات کلاسیک می پردازد. در روش تجربی با استفاده از مدل های فیزیکی پارامترهای موردنظر بررسی می شوند و در روش عددی بوسیله کامپیوتر و نرم افزار معادلات حاکم بر مسئله حل می شوند.

روش حل عددی معادلات خود به دو روش دیفرانسیلی و انتگرالی صورت می پذیرد. در روش دیفرانسیلی از راه حل های تفاضل محدود استفاده می شود. روش انتگرالی نیز خود به دو روش اجزاء محدود و حجم محدود تقسیم می شود.

در حالت کلی روش های تفاضل محدود برای قلمروهای پیچیده ذاتاً ضعیف هستند. ولی روش های حجم محدود و اجزاء محدود دارای چنین ضعفی نیستند. زیرا متغیر مستقل مستقیماً در قلمرو فیزیکی انتگرال گیری می شود و از این رو هموار بودن شبکه دیگر الزامی نیست. پس در صورتی که بتوانیم قلمرو را به چند المان تجزیه کنیم، می توان معادلات را حل کرد. بعلاوه روش های حجم محدود برخلاف روش های تفاضل محدود به شبکه بندی با سازمان نیاز ندارند. از طرفی چون معادله های انتگرالی را مستقیماً در قلمرو فیزیکی بکار می بریم، تبدیل مختصات دیگر لازم نیست. آشکار است در قلمروهای هندسی پیچیده روش های حجم محدود بر روش های تفاضل محدود برتری دارند. اما اگر بتوان قلمرو را به شبکه با سازمان همواری تبدیل کرد، روش تفاضل محدود به علت راندمان بهتر، برتر است. [8]



آزمایش های انجام شده در مورد يك دستگاه یا سازه که اندازه هایش عیناً اندازه واقعی باشد، جهت پیشگویی عملکرد موارد مشابه استفاده می شود. اما در بیشتر حالات چنین آزمایشاتی به علت بزرگ

بودن اندازه واقعی بسیار گران و اغلب نیز غیرممکن است، لذا آزمایش‌ها بر روی مدل‌هایی با مقیاس کوچکتر انجام می‌گیرد. مسأله‌ای که در اینجا وجود دارد بسط دادن اطلاعات از نمونه کوچکتر به نمونه اصلی است و این بسط دادن همیشه تمام جنبه‌های نمونه اصلی را شبیه‌سازی نمی‌کند و در بسیاری از موارد نیز مشکلات جدی اندازه‌گیری وجود دارد و وسایل اندازه‌گیری نیز عاری از خطا نمی‌باشند. در پیش‌بینی بصورت محاسبات تئوری بیشتر از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود و اصولاً مدل ریاضی عبارت است از یک سری معادلات دیفرانسیلی. در گذشته امکان پیش‌بینی بسیاری از موارد توسط ریاضیات کلاسیک ممکن نبود زیرا تنها برای تعدادی از مجهولات در مسائل علمی، معادلات لازم پیدا می‌شد. اما امروزه با توسعه روش‌های عددی و در دسترس بودن کامپیوترها این امکان وجود دارد که تقریباً برای همه مسائل علمی بتوان از یک مدل ریاضی استفاده نمود.

در روش‌های تئوری ابتدا با مشاهده پدیده فیزیکی به بیان معادلات دیفرانسیل مربوطه پرداخته و سپس به معادلات جزئی حاکم بر مسئله می‌پردازیم. پدیده‌هایی وجود دارند که برای آنها مدل ریاضی مناسبی ارائه شده است و پدیده‌هایی نیز وجود دارند که هنوز مدل ریاضی مناسبی برای آنها یافت نشده است (نظیر جریان دو فاز)، در اینجا استفاده از روش‌های عددی برای حل معادلات جریان سیال جای خود را باز می‌کند.

دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD که ساختار آن عددی است در تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و غیره کاربرد دارد و دارای چند مزیت منحصر به فرد نسبت به روش‌های تجربی است که عبارتند از:

- 1- کاهش زمان و قیمت طراحی
- 2- توانایی مطالعه سیستم‌هایی که انجام آزمایش بر روی آنها مشکل و یا غیرممکن است
- 3- توانایی مطالعه سیستم‌ها تحت شرایط تصادفی و بالاتر از حدود آن
- 4- بدست آوردن نتایج بسیار زیاد.

در روش‌های بالا اعمال زیر انجام می‌شود:

- 1- تقریب متغیرهای مجهول با استفاده از توابع ساده
- 2- گسسته‌سازی با استفاده از جایگذاری تقریب‌ها در معادلات حاکم بر جریان و سپس انجام تغییرات ریاضی و غیره
- 3- حل معادلات جبری

تفاوت اصلی میان روش ها طرز تقریب متغیرهای جریان و فرایند گسسته سازی است. امروزه در برنامه های CFD از روش حجم محدود که از توسعه روش اختلاف محدود بدست آمده است استفاده می شود که الگوریتم حل عددی شامل مراحل زیر است:

1 - انتگرال گیری از معادلات حاکم بر جریان سیال روی تمام حجم های کنترل مربوط به میدان حل

2 - گسسته سازی که شامل نوعی از تقریب های اختلاف محدود برای عبارتهای داخل معادله انتگرالی می باشد و فرایندهایی مانند جابه جایی، نفوذ و چشمه ها را نشان می دهند که این عمل معادلات دیفرانسیل را به یک سیستم معادلات جبری تبدیل می کند.

3 - حل معادلات جبری با استفاده از یک روش تکرار

قدم اول یعنی انتگرال گیری از حجم کنترل، روش حجم محدود را از سایر روشها متمایز می گرداند.

مراحل کاری تمام برنامه های CFD به صورت زیر می باشد:

1 - تعریف هندسه

2 - شبکه بندی

3 - دائمی یا غیردائم بودن جریان

4 - آرام یا متلاطم بودن جریان

5 - دو بعدی یا سه بعدی بودن جریان

6 - تک فاز یا چندفازی بودن جریان

7 - قابل تراکم یا غیرقابل تراکم بودن جریان

8 - انتقال حرارت (معادلات انرژی)

9 - مواد تشکیل دهنده

10 - لایه مرزی

11 - برنامه های حل کننده (Fluent ، Flow 3D و ...)

حل یک مسئله جریان (سرعت ، فشار ، دما و غیره) در گره های داخلی هر سلول صورت می گیرد. دقت مربوط به حل CFD از تعداد سلول های موجود در شبکه پیروی می کند. در حالت کلی سلول های زیاد دارای دقت حل بهتری می باشند و دقت حل، قیمت، سخت افزار محاسباتی مورد نیاز و زمان محاسبه بستگی به ظرافت شبکه دارد.

برای حل مسائل توسط برنامه‌های CFD لازم است مراحل زیر انجام شود:

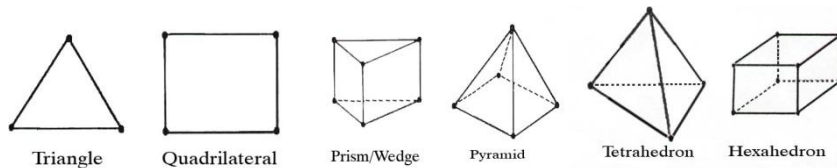
- 1- تعیین اهداف مساله
- 2- تهیه هندسه مدل و شبکه بندی
- 3- تعیین حل کننده و مدل‌های فیزیکی
- 4- محاسبه و نمایش حل
- 5- کنترل مدل و ذخیره سازی.

مراحل اولیه فرایند حل، احتیاج به تولید هندسه و شبکه دارد که می‌توان از نرم افزار پیش پردازنده (Pre-processor) نظیر Gambit استفاده کرد. در مراحل بعدی، نیاز به یک نرم افزار تحلیل جریان (Solver) و خروجی ساز (Post Processor) می‌باشد که می‌توان از نرم افزار Fluent بهره گرفت که در این فصل به معرفی اجمالی این دو نرم افزار پرداخته شده است.

#### 4-2- شبیه‌سازی هندسی توسط نرم افزار Gambit

این یک نرم افزار ساخت هندسه و شبکه بندی آن است که کاربر توسط آن بتواند هندسه مدل مورد نظر خود را با کوچکترین جزئیات و دقت بالا رسم و شبکه‌بندی کند. قدم اول در این نرم‌افزار انتخاب محاسبه‌گر مناسب می‌باشد که محاسبه‌گر انتخاب شده برای کلیه مدل‌های موجود در Fluent مناسب می‌باشد. قدم بعدی ترسیم هندسه مدل‌های موجود با مقیاس‌های از پیش تعیین شده می‌باشد.

برای شبیه‌سازی‌های دو بعدی شبکه‌هایی شامل سلول‌های مثلثی و چهار ضلعی و یا ترکیبی از هر دو استفاده می‌گردد. نرم افزار Gambit در شبیه‌سازی‌های سه بعدی از سلول‌های چهار وجهی، شش وجهی، هرمی، گوه‌ای و یا ترکیبی از این اشکال استفاده می‌کند. اشکال مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های دو بعدی و سه بعدی در شکل زیر نشان داده شده است. انتخاب نوع شبکه بستگی به کاربرد مسئله مورد نظر دارد. در هنگامی که نوع شبکه انتخاب می‌شود باید ملاحظات همچون زمان کارگذاری شبکه و هزینه محاسباتی را مد نظر قرار داد.



شکل (4-1) اشکال هندسی مورد استفاده توسط نرم افزار

### 3-4- مدل کامپیوتری Fluent

Fluent نرم افزاری برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده می باشد. این نرم افزار امکان تغییر شبکه به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه های غیر ساخت یافته برای هندسه های پیچیده را فراهم می سازد. نوع مش های تولید و دریافت شامل شبکه هایی با المان های مثلثی و چهارضلعی برای هندسه های دو بعدی و چهار وجهی و شش وجهی و هرمی یا گوه ای برای هندسه های سه بعدی و شبکه های ترکیبی است. این نرم افزار به زبان برنامه نویسی C نوشته شده است. [23]

برنامه Fluent شامل بخش های زیر است:

Fluent: یک حل کننده است.

Gambit: یک پردازشگر برای مدل سازی هندسه و ایجاد شبکه است.

Tgrid: یک پردازشگر کمکی برای ایجاد شبکه های جمعی از شبکه های مرزی موجود است.

فیلترها: برای وارد کردن و یا خارج کردن فایل ها از نرم افزارهایی چون CAD/CAE بکار می روند.

نرم افزار Fluent قابلیت شبیه سازی و مدل کردن موارد زیر را دارد :

- 1 - جریان در هندسه های پیچیده دو بعدی و سه بعدی
- 2 - جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر
- 3 - تحلیل جریان های پایدار و ناپایدار
- 4 - تحلیل جریان های لزج، آرام و متلاطم
- 5 - سیال نیوتنی و غیر نیوتنی
- 6 - انتقال حرارت شامل انتقال طبیعی و اجباری
- 7 - انتقال حرارت به صورت جابه جایی و همرفت
- 8 - انتقال حرارت به صورت تابشی
- 9 - جریان در محیط های متخلخل
- 10 - جریان دو فازي که شامل کاویتاسیون نیز باشد.
- 11 - جریان های با سطح آزاد با اشکال پیچیده سطح
- 12 - صنایع اتومبیل
- 13 - صنایع هوا و فضا و ...

مراحل حل در Fluent بصورت زیر است :

- 1 - وارد کردن شبکه و چک کردن آن

- 2- تعیین حل کننده (segregated , coupled)
- 3- تعیین نوع مدل (مدل آشفته، مدل های انتقال حرارت، مدل های چند فازی و غیره)
- 4- تعیین خصوصیات مواد (سیال، جامد و مخلوط)
- 5- تعیین شرایط عملیات
- 6- تعیین شرایط مرزی در همه مرزها
- 7- تنظیم پارامترهای کنترل حل
- 8- مقداردهی اولیه به جریان
- 9- تنظیم نمایشگر
- 10- شروع محاسبه و حل مساله
- 11- مشاهده نتایج و بررسی آن
- 12- ذخیره سازی نتایج

روش تجزیه و تحلیل مسائل در نرم افزار Fluent:

به منظور حل مسائل توسط Fluent چهار حالت کلی وجود دارد :

- 1- برای مسائل دو بعدی و محاسبه گر یک دقت (one precision): Fluent 2D
- 2- برای مسائل سه بعدی و محاسبه گر یک دقت Fluent 3D
- 3- برای مسائل دو بعدی و محاسبه گر دو دقت (double precision): Fluent 2ddp
- 4- برای مسائل سه بعدی و محاسبه گر دو دقت Fluent 3ddp

در اغلب موارد محاسبه گر یک دقت از دقت خوبی برخوردار است. اما برای مسائل خاص مانند لوله ای با قطر کم و طول زیاد محاسبه گر دو دقت مناسب تر است. پس از انتخاب دو بعدی یا سه بعدی بودن و نوع دقت به حل مسأله پرداخته می شود. برای حل عددی در Fluent دو روش عددی وجود دارد :

1 - حل Segregated

2- حل کننده coupled که به دو صورت صریح<sup>9</sup> و ضمنی<sup>10</sup> به حل عددی می پردازد.

با انتخاب هر روش، Fluent معادلات دیفرانسیلی را برای بقاء جرم، اندازه حرکت و در صورت نیاز برای انرژی و اغتشاش حل می نماید. اساس هر دو روش بر مبنای حجم کنترل است، یعنی کل منطقه به حجم های کنترل مجزا تقسیم بندی می گردد. هر دو روش تکنیکی مشابه دارند یعنی از روش حجم محدود برای حل بهره می برند اما نحوه حل برای خطی سازی و حل معادلات متفاوت است.

<sup>9</sup> Explicit

<sup>10</sup> Implicit

روش Segregated معادلات را پی در پی حل می‌کند (بعبارتی جدا از یکدیگر) اما روش Coupled معادلات را به طور همزمان و وابسته به یکدیگر حل می‌کند.

#### 1-3-4- روش حل Segregated

به منظور حل باید چندین تکرار صورت گیرد و هر کدام از تکرارها شامل مراحل زیر است:

- 1 - خصوصیات سیال بر اساس حل در هر مرحله بهنگام می‌گردد.
- 2 - معادلات اندازه حرکت بر اساس فشار موجود و نوسانات سطح با بهنگام نمودن سرعت حل می‌گردند.
- 3 - از آنجایی که سرعت به دست آمده ممکن است در معادله پیوستگی صدق نکند داده‌ها چک می‌گردند.
- 4 - پس از این مرحله معادلات به منظور حل اغتشاش، انرژی، نوسانات و غیره حل شده و در آن از مقادیر به هنگام شده قبلی استفاده می‌گردد.
- 5 - محاسبات به منظور فازهای پیوسته و یا مجزا حل می‌گردند.
- 6 - معادلات به منظور بررسی همگرایی چک می‌گردند.

این روش ترجیحاً برای جریان های غیر قابل تراکم و یا به طور ملایم قابل تراکم به کار برده می‌شود.

#### 2-3-4- روش حل Coupled

در این روش به منظور حل عددی مراحل زیر انجام می‌گیرد:

- 1 - خصوصیات جریان بر اساس حل بهنگام می‌گردد.
- 2 - معادلات پیوستگی، انرژی و حالات جریان به طور همزمان حل می‌گردند.
- 3 - پس از این مرحله معادلات به منظور حل اغتشاش، انرژی، نوسانات و غیره حل شده و در آن از مقادیر بهنگام شده قبلی استفاده می‌گردد.
- 4 - معادلات به منظور بررسی همگرایی چک می‌شوند.

در این روش از دو حالت صریح و ضمنی استفاده می‌شود. در روش صریح برای یک پارامتر مشخص، مقدار نامعلوم در هر سلول بوسیله ارتباط برقرار کردن بین داده‌های معلوم محاسبه می‌گردد و بنابراین برای هر پارامتر مشخص یک معادله در سیستم بدست می‌آید و در هر زمان یکی از

معادلات برای مقدار نامعلوم در سلول می‌تواند حل شود. در روش ضمنی برای یک پارامتر مشخص مقادیر نامعلوم در هر سلول به وسیله رابطه برقرار کردن بین مقادیر معلوم و نامعلوم سلول های مجاور محاسبه می‌گردد.

بنابراین یکسری معادله بدست می‌آید که باید همزمان حل شوند. در حالت کلی روش Segregated برای یک متغیر، حل، با استفاده از همه سلول ها صورت می‌گیرد و برای متغیر بعدی دوباره با استفاده از همه سلول‌ها حل صورت گرفته و به همین ترتیب ادامه می‌یابد. بنابراین حل صریح به روش Segregated وجود ندارد. در برخی از مدل‌ها لزوماً باید از شیوه Segregated استفاده شود. مانند مدل‌های چند فازی، مدل‌های احتراق، مدل‌های تشعشعی، مدل جریان های متناوب و مدل های تغییر فاز.

#### 4-4- مدل‌های آشفتگی در نرم افزار

این نرم افزار در تحلیل جریان‌های آشفتنه از پنج مدل آشفتگی زیر استفاده می‌کند که کاربر با توجه به نوع جریان مورد بررسی یکی از آنها را انتخاب می‌کند. از معروفترین و کاربردی ترین مدل‌های دو معادله‌ای، مدل  $k-\varepsilon$  می‌باشد که شکل‌های متفاوتی از آن ارائه شده‌اند. در اعداد رینولدز بالا، نرخ اتلاف انرژی ( $\varepsilon$ ) برابر لزجت مولکولی در نوسانات گردابه‌ای می‌باشد که مدل آشفتگی اولیه  $k-\varepsilon$  توسط پранتل<sup>11</sup> و کلموگرو<sup>12</sup> بدینصورت بیان شد:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad \text{رابطه ( 4-4)}$$

<sup>11</sup> Prandtl

<sup>12</sup> Kolmogorov



$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\delta \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$v_t = c_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$$

لاندر و اسپالدینگ ثابتهای معادلات را بر اساس اطلاعات تجربی مطابق جدول (1-4) ارائه نمودند.

$c_{\mu}$	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$\delta_k$	$\delta_{\varepsilon}$
9.4 %	1.44	1.92	1	1.3

جدول (1-4) ثوابت معادله K-ε

معادلات k-ε برای بسیاری از جریان های شامل لایه مرزی دو بعدی روی دیواره، داخل مجاری، جریان برشی آزاد، جریان های گردابه ای، لایه مرزی سه بعدی و جت ها با موفقیت بکار رفته است. با این همه محدودیت استفاده از این مدل در همسان بودن لزجت گردابه ای برای تمام تنش های رینولدز این مدل می باشد. به همین دلیل در جریان های دارای انحناء و لایه برشی نازک، این مدل ضعیف می باشد ولی بر اساس نتایج تجربی و آزمایشگاهی با متغیر در نظر گرفتن ضریب  $c_{\mu}$  نسبت به  $\frac{P}{\varepsilon}$  ضعف مدل در جریان لایه برشی نازک کاهش قابل ملاحظه ای داشته است.

سه مدل معادلات k-ε شناخته شده وجود دارد که به مدل k-ε استاندارد<sup>13</sup>، مدل k-ε حالت RNG<sup>14</sup> و مدل k-ε محسوس<sup>15</sup> نامیده می شوند. مدل های k-ε دارای شکل یکسانی می باشند، اما تفاوت اساسی آنها در سه موضوع روش محاسبه لزجت گردابه ای<sup>16</sup> ( $\mu_t$ )، اعداد آشفتگی پرانتل<sup>17</sup> که بر معادلات k و ε حاکم می باشند و ترم های چشمه و چاه<sup>18</sup> در معادلات ε می باشد.

#### 4-4-1 مدل k-ε استاندارد

در این مدل که بیشترین کاربرد را در تحلیل جریان های آشفته دارد، ثابتهای معادلات و نیز استخراج خود معادلات توسط Jones و Lander صورت گرفته است. مدل استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل یک روش نیمه تجربی است که معادله k آن دقیقاً از

<sup>13</sup> Standard k-ε Model

<sup>14</sup> Renormalization-group (RNG) k-ε model

<sup>15</sup> Realizable k-ε Model

<sup>16</sup> Turbulent viscosity

<sup>17</sup> Turbulent Prandtl numbers

<sup>18</sup> Generation and Destruction

ترکیب معادلات رینولدز حاکم بر جریان مشتق می‌شود اما معادله  $\varepsilon$  حاکم، بر اساس شواهد تجربی و آزمایشگاهی و روابط ریاضی حاصل می‌گردد. در استخراج این معادلات چنین فرض شده که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز است. معادلات حاکم بر این مدل توسط روابط زیر بیان می‌شود. در این معادلات  $G_k$  و  $G_b$  چشمه معادله  $k$  می‌باشند که به ترتیب اثر شناوری و گرادیان سرعت میانگین را در معادله اعمال می‌کنند.

معادله  $k$  رابطه (4-):

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon$$

معادله  $\varepsilon$ :

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + c_{3\varepsilon} G_b) - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

لزجت  $\mu_t$ :

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

گردابه‌ای

$c_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\delta k$	$\delta \varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1.00	1.30

جدول (2-4) ثوابت معادله  $k$ - $\varepsilon$  استاندارد

ثابت  $c_{3\varepsilon}$  در معادله  $\varepsilon$  اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می‌کند و برابر با  $c_{3\varepsilon} = \tanh|v/u|$  است. بنابراین چنانچه جهت جریان منطبق با جهت ثقل باشد، در لایه برشی این ثابت برابر 1 خواهد شد و اگر جهت جریان عمود بر جهت ثقل باشد این مقدار صفر خواهد بود.

#### 2-4-4- مدل $k$ - $\varepsilon$ حالت RNG

در این روش آشفتگی جریان بر اساس یک تکنیک آماری دقیق و به کمک روابط ریاضی بدست می‌آید. در این مدل در مقایسه با حالت استاندارد یک ترم اضافه در معادله  $\varepsilon$  وارد می‌شود که باعث آشفتگی دقت محاسباتی در جریان کرنشی می‌گردد. این مدل نسبت به حالت استاندارد، در جریان‌های چرخشی کارایی بیشتری دارد و بر خلاف آن به منظور تعیین اعداد آشفتگی پرانتل از رابطه تحلیلی استفاده می‌شود. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین دقت مناسبی دارد و به همین دلیل از این

مدل در تعیین مقادیر آشفته‌گی جریان در میدان‌های دارای انحنا و یا پیچیدگی هندسی، بیشتر استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این مدل بصورت روابط زیر می‌باشند:

$$\text{معادله } k: \quad \rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad \text{رابطه ( 4- )}$$

$$\text{معادله } \varepsilon: \quad \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + c_{3\varepsilon} G_b) - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R$$

$$\text{لزجت مؤثر:} \quad \bar{\nu} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad \text{و} \quad d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon} \mu} \right) = 1.72 \frac{\bar{\nu}}{\sqrt{\bar{\nu} - (1 + c_v)}} d\bar{\nu}$$

گردابه‌ای

مقادیر معکوس عدد پرانتل آشفته‌گی،  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$ ، بر اساس رابطه زیر معین می‌شود:

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.3621} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}}$$

در جریان‌های با رینولدز بالا  $\left( \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \right) \gg 1$  که جریان کاملاً آشفته است مقدار  $\alpha_0 = 1$  بوده و معکوس

اعداد پرانتل آشفته‌گی مقادیر ثابتی دارند؛ یعنی  $\alpha_\varepsilon = \alpha_k = 1.393$ . ترم R اضافه شده به معادله RNG، باعث اصلاح این معادله در نواحی که نرخ کرنش زیاد باشد، شده و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{c_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

که در معادله فوق  $\eta \equiv sk/\varepsilon$ ،  $\eta_0 = 0.48$  و  $K = 0.012$  می‌باشد و s بیانگر مدول نرخ کرنش متوسط می‌باشد که رابطه آن برحسب نرخ کرنش متوسط چنین است:

$$s_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{و} \quad s \equiv \sqrt{2s_0^2}$$

$c_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$c_v$	$\beta$	$\eta_0$
0.0845	1.42	1.68	1.00	0.012	4.38

جدول (3-4) ثابتهای معادله k-ε حالت RNG

#### 3-4-4- مدل k-ε محسوس

در این مدل دو تفاوت عمده نسبت به مدل حالت استاندارد لحاظ شده است تا از ایجاد عدم تعادل در حل معادلات، بخصوص در قسمت زیر لایه ناحیه لایه مرزی که میزان کرنش تولیدی در آن زیاد می باشد، جلوگیری نماید. این تفاوتها عبارتند از تعیین رابطه جدید لزجت گردابه  $\mu_t$  و اضافه نمودن یک ترم چشمه اضافه به معادله  $\varepsilon$  که تغییرات چرخش جریان در آن لحاظ شود. این مدل در جریان های دارای لایه مرزی، جریان چرخشی، جریان تحت گرادیان معکوس فشار، جدایی جریان، جت های صفحه ای و دایروی نسبت به سایر مدل های رایج k-ε نتایج بهتری ارائه نموده است. در معادلات حاکم بر این روش، معادله k حاکم، همان رابطه حالت استاندارد می باشد ولی معادله  $\varepsilon$  به فرم زیر نوشته می شود:

$$\text{معادله } \varepsilon: \quad \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho c_1 s_\varepsilon - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} - c_{1\varepsilon} c_{3\varepsilon} G_b \frac{\varepsilon}{k}$$

رابطه ( 4-4)

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\delta k$	$\delta \varepsilon$
1.44	1.90	1.00	1.20

جدول (4-4) ثابتهای مدل k-ε محسوس

#### 4-4-4- مدل آشفتگی k-ω

بر خلاف معادله k-ε که در آن معادله دوم برای اتلاف و یا نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی بیان می شود، این مدل فقط برای نرخ استهلاک رخ می دهد حل می شود. در این مدل بجای ترم  $\varepsilon$  از متغیر  $\omega$  (فرکانس آشفتگی) استفاده می شود که از نظر ابعادی می توان رابطه زیر را بین پارامترهای موجود در نظر گرفت:

$$\omega \propto \varepsilon/k$$

معادله انتقال فرکانس آشفتگی نیز بصورت زیر نوشته می‌شود:

رابطه (4-)

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\delta\omega} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + P_\omega - D_\omega$$

با ترکیب دو معادله فوق با معادله  $k$ ، معادلات زیر حاصل می‌شوند که تحت عنوان مدل دو معادله‌ای  $k-\omega$  توسط ویلکاکس<sup>۱۹</sup> ارائه شده است:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\delta k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tau_{ij} \hat{\omega} \quad \text{رابطه (4-)}$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\delta\omega} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2$$

$\alpha$	$\beta$	$\beta^*$	$\delta k$	$\delta\omega$
0.556	0.075	0.09	0.5	0.5

جدول (5-4) ثابت‌های مدل آشفتگی  $k-\omega$

#### 5-4-4- مدل RSM<sup>۲۰</sup>

بجز فرض ایزوتروپیک بودن لزجت گردابه‌ای، مدل RSM دستگاه معادلات RANS را با حل معادلات انتقالی برای تنش‌های رینولدز همراه با یک معادله برای نرخ تلفات می‌بندد، که بدین معنی است که 4 معادله انتقالی اضافی در جریان‌های دوبعدی و 7 معادله انتقالی اضافی در جریان‌های سه‌بعدی باید حل شود. چون مدل RSM، اثرات انحنای خط جریان، چرخش و تغییرات سریع در نرخ کرنش را در روش سخت‌تر از مدل‌های یک معادله‌ای و دو معادله‌ای به حساب می‌آورد دارای پتانسیل بالاتری در پیش‌بینی دقیق جریان‌های پیچیده می‌باشد. با این وجود، اعتبار پیش‌بینی‌های مدل RSM هنوز هم محدود به فرض‌های اعمال شده در مدل کردن عبارت‌های مختلف در معادلات انتقالی دقیق برای

<sup>19</sup> Wilcox

<sup>20</sup> The Reynolds Stress Model

تنش‌های رینولدز می‌باشد. رابطه کلی حاکم بر این مدل بصورت زیر است که شامل ترم‌های انتقال، پخش، تولید و استهلاك انرژی جنبشی آشفته‌گی می‌باشد. رابطه (4-7)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k' u_i' u_j'}) = & -\frac{\partial}{\partial x_k}[\overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + p(\delta_{kj} \overline{u_i'} + \delta_{ik} \overline{u_j'})] + \\ \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u_i' u_j'}) \right] - \rho \left( \overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta (g_i \overline{u_j' \theta} + g_j \overline{u_i' \theta}) \\ + p \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u_j' u_m'} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i' u_m'} \varepsilon_{jkm}) + s_{user} \end{aligned}$$

این مدل از نظر توانایی برای همه مدل‌های آشفته کلاسیک حالت عمومی داشته و فقط شرایط اولیه و یا مرزی در آن باید تضمین شود. همچنین امکان محاسبه خیلی دقیق میدان جریان متوسط و تنش‌های رینولدز برای جریان‌های ساده و خیلی پیچیده شامل فواره‌ها، جریان در مجراهای متقارن دایره‌ای و کانال غیردایره‌ای و جریان‌های قوس‌دار از جمله مزایای آن می‌باشند. قیمت خیلی بالایی محاسبات و کاربردی نبودن مدل به گستردگی مدل‌های طول مخلوط و  $k-\varepsilon$  از جمله معایب آن اعلام شده است.

#### 4-5- روش‌های مدل‌سازی جریان دوفازی

سه روش جهت آنالیز جریان دوفازی در نرم افزار Fluent به نام کسر حجمی سیال (Volume of Fluid)، مدل مخلوط (Mixture) و مدل اولر (Eulerian Model) وجود دارند. روش کسر حجمی سیال (VOF) برای دو یا چند سیال که با هم مخلوط نمی‌شوند و موقعیت سطح جدایی بین سیالات هدف تحقیق می‌باشد بکار می‌رود. کاربرد این مدل در مطالعه و پیش‌بینی حرکت حباب‌های بزرگ در مایع، حرکت آب بعد از شکست سد و آنالیز دائمی و غیر دائمی هرگونه سطح جدایی بین مایع و گاز می‌باشد.

روش مخلوط (Mixture) توانایی دارد که دو فاز (مایع-مایع، مایع-گاز و جامد-مایع) را مدل کند. معادله مومنتوم و پیوستگی برای فاز مخلوط، معادله کسر حجمی برای فاز دوم و عبارت جبری برای سرعت نسبی حل می‌شوند. کاربرد خاص این روش در مدل‌سازی رسوبگذاری در آب و حرکت حباب‌های هوا در آب می‌باشد. در مواردی که پخش ذرات موجود در دو فاز وسیع بوده، قوانین بین فازها نامشخص و پایداری آنها نیز مورد بحث و بررسی باشد مدل مخلوط بهترین جواب‌ها را به دست می‌دهد. محدودیت‌های این مدل عبارتند از اینکه هر سلول محاسباتی می‌تواند از هر کدام از فازها بطور کامل پر شده و یا اینکه ترکیبی از آنها را در خود داشته باشد. (شرط اولیه خلاء موجود

نمی باشد). همچنین تغییر فاز و یخ زدگی قابل مدلسازی نبوده و جریان باید غیرقابل تراکم باشد. مدل مخلوط دو فرق اساسی با مدل کسر حجمی دارد:

- بر خلاف مدل کسر حجمی، مدل مخلوط فرض می‌کند که یک سطح جدایی مشخص بین دو فاز آب و هوا وجود ندارد، لذا به فازها این اجازه را می‌دهد که در همدیگر نفوذ داشته باشند.
- مدل مخلوط اجازه می‌دهد دو فاز با سرعت متفاوت نسبت به هم حرکت نمایند، لذا امکان مدلسازی لغزش در جریان دو فاز که در تجزیه و تحلیل پایداری جریان دوفاز در لوله های انتقال نفت و گاز مطرح است وجود دارد.

مدل چند فازی اولر برای مدلسازی فازهای جداگانه و همچنین اندرکنش فازها که می‌توانند مایع، گاز، جامد و یا ترکیبی از آنها باشند به کار می‌رود. مدل اولر بیشترین ترکیب را از مدل‌های چند فازی در فلوننت دارا می‌باشد و برای هر فاز دستگاهی از  $n$  معادله پیوستگی و مومنتوم را حل می‌کند. استفاده از مدل اولر زمانی که نیروهای درآگ در سطح مشترک فازها وجود دارند نتایج دقیق تری می‌دهد. همچنین در صورتیکه فاز پخش شده (Dispersed Phases) در یک بخش تمرکز یابند باید از مدل اولر استفاده شود. ولی اگر فازهای پخش شده در پهنای وسیع تری وجود داشته باشند، از مدل مخلوط استفاده می‌گردد. اگر در حل مساله دقت حل از راحتی محاسبات مهمتر باشد مدل اولر مناسب تر است، زیرا در این مدل معادلات بیشتری حل میشوند. این مدل دارای محدودیتهایی نیز می‌باشد، از جمله آنکه فقط از مدل دو معادله ای  $k-\epsilon$  برای مدلسازی آشفتگی استفاده می‌نماید و جریان نباید پریودیک، تراکم پذیر و غیرلزج باشد. همچنین پدیده ذوب و انجماد و انتقال حرارت قابل مدلسازی نمی‌باشد. [24],[25],[26]

#### 4-5-1- مجزا سازی معادله پیوستگی

معادلات حاکم بر جریان هم از طریق اجزای محدود و هم از طریق اختلاف محدود قابل حل می‌باشند، لکن روش برگزیده در این تحقیق روش اختلاف محدود بر اساس روش پیزو (Piso) است. در این روش با استفاده از معادله پیوستگی توزیع فشار نسبی بدست می‌آید. در نرم افزار فلوننت از یک تکنیک حجم کنترل جهت تبدیل معادلات حاکم به معادلات جبری استفاده نموده تا از روش های عددی حل گردند. این تکنیک شامل بیان معادلات حاکم برای هر یک از حجم های کنترل می‌باشد که منجر به معادلات مجزایی می‌گردد که بقای هر کمیت روی حجم کنترل پایه را ارضا می‌نماید.

با استفاده از روش حل پیوسته معادلات حاکم بر جریان شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی بطور همزمان حل خواهند شد (یعنی به یکدیگر پیوسته اند). از آنجایی که معادلات حاکم (ناویر استوکس)

خطی نیستند (و پیوسته اند) چندین تکرار در حلقه فرآیند حل قبل از بدست آوردن حل همگرا باید انجام گیرد. لازم به ذکر است که شیوه حل تفکیکی ترجیحاً برای جریان های غیر قابل تراکم بکار برده می شود. اما شیوه حل پیوسته اختصاصاً برای جریان های قابل تراکم با سرعت بالا طرح شده است. [27]

فلوئنت این اختیار را به کاربر می دهد تا از یکی از سه الگوریتم سیمپل (SIMPLE)، سیمپل سی (SIMPLEC) و پیزو (PISO) جهت ارتباط سرعت و فشار انتخاب کند.

الگوریتم سیمپل از رابطه بین اصلاحات فشار و سرعت استفاده می کند تا قانون بقا جرم را ارضا و میدان فشار را بدست بیاورد. روش سیمپل سی مشابه روش سیمپل می باشد، منتهی عبارت بکار رفته برای اصلاح نرخ جریان متفاوت می باشد. استفاده از معادله تصحیح، شتاب قابل ملاحظه ای را در همگرایی مسائلی که در ارتباط سرعت و فشار مانع اصلی حل شدن است، نشان خواهد داد.

یکی از محدودیتهای الگوریتمهای سیمپل و سیمپل سی آن است که پس از حل معادله اصلاح فشار مقادیر سرعت جدید و دبی های مربوط به آن در تعادل مومنتوم صدق نمی کند. در نتیجه محاسبات تا زمانی که تعادل برقرار شود باید تکرار گردد. برای بهبود کارایی این محاسبات، الگوریتم پیزو دو اصلاح اضافی انجام می دهد. ایده اصلی الگوریتم پیزو انتقال محاسبات تکراری مورد نیاز سیمپل و سیمپل سی به درون حل معادله اصلاح فشار می باشد. لذا پس از یک یا چند حلقه اضافی، سرعت های اصلاح شده بطور دقیق تری در معادلات مومنتوم و پیوستگی صدق می کنند. به این فرآیند تکرار اصلاح مومنتوم، اصلاح همجوار (Neighbor) گفته میشود و می تواند بطور قابل توجهی تعداد تکرارهای مورد نیاز برای همگرایی را خصوصاً برای مسایل گذرا کاهش دهد. برای شبکه هایی که رابطه تقریبی بین اصلاح دبی جرمی در صفحه سلول و اختلاف اصلاحات فشار در سلول های کناری بسیار کم دقت است. از آن جا که مؤلفه های تغییرات فشار در طول صفحات سلول مجهول می باشد، یک فرآیند تکرار مشابه اصلاح همجوار که در بالا توضیح داده شد نیاز است. پس از آنکه برای اولین بار معادله اصلاح فشار حل شد، تغییرات اصلاح فشار مجدداً محاسبه و برای تجدید مقادیر اصلاح دبی جرمی استفاده می گردد. این فرآیند که به اصطلاح کج (Skewness) معروف است، بطور قابل ملاحظه ای مشکلات همگرایی که با شبکه های تغییر یافته همراه است را کاهش می دهد. الگوریتم انتخابی در این مسأله، الگوریتم پیزو می باشد. [28]



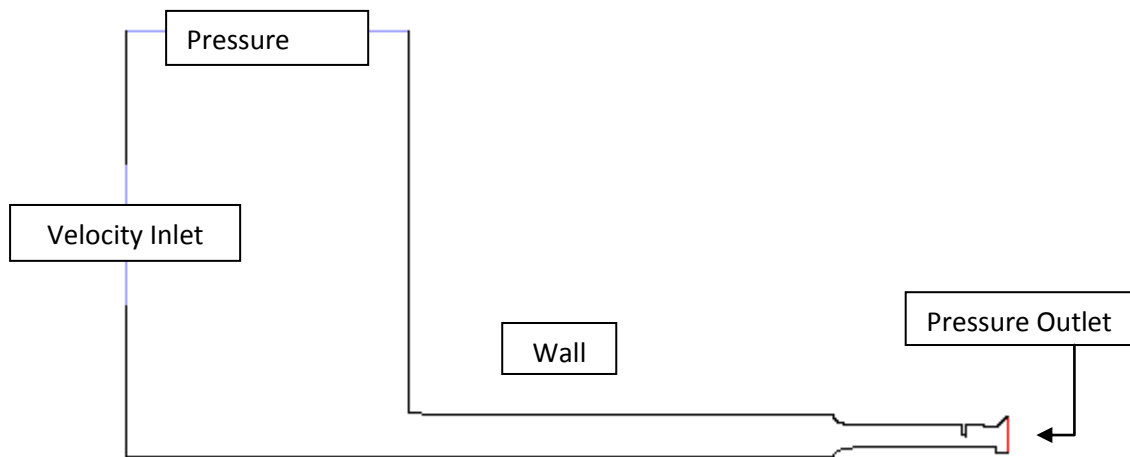


## 4-6- معرفی مدل عددی

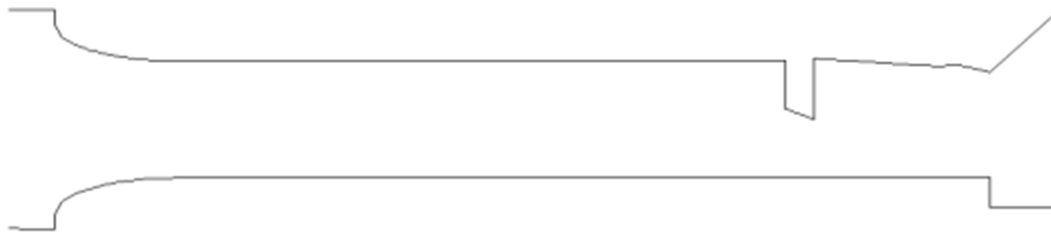
در این تحقیق با استفاده از نرم افزار حجم محدود Fluent، جریان دو فاز آب و هوا در تخلیه کننده تحتانی در حالت عدم هوادهی در پایین دست دریچه کنترل دبی آنالیز شده است. در ابتدای کار با استفاده از نرم افزار پیش پردازنده Gambit، هندسه مدل عددی دو بعدی ترسیم گردیده است. (شکل 2-4)

### 4-6-1- شرایط مرزی

شرایط مرزی مورد توجه شامل شرط مرزی ورودی برای سیال آب، شرط مرزی خروجی برای آب و هوا می باشد. مهمترین قابلیت نرم افزار فلونت این است که می تواند فشار را به عنوان شرط مرزی در نظر بگیرد و با استفاده از الگوریتم های قوی بکار رفته در آن نظیر سیمپل، سیمپل سی و پیزو، میدانهای فشار و سرعت را بدست آورد. لذا ارتفاع آب در مخزن سد بعنوان شرط مرزی ورودی برای سیال آب منظور می شود. برخلاف سایر نرم افزارها مانند Ansys و Nisall که توانایی در نظرگرفتن فشار بعنوان شرط مرزی را ندارند و یا در صورت پذیرش با مشکل زیاد همگرا می شوند، نرم افزار Fluent قادر است با الگوریتم های قوی تصحیح فشار، کوپل میدان سرعت و فشار را با همگرایی بالایی حل کند. در شکل (3-4)، نمای واضح تری از مجرا و دریچه در حالت بازشدگی 50% قابل مشاهده است.



شکل (2-4) نمای کلی از هندسه مدل عددی



شکل (3-4) تصویری نزدیکتر از اطراف دریچه در مدل عددی

نکته مهم و حائز اهمیت در شرط خروجی فشار ثابت، شرط جریان برگشتی در خروجی می باشد که برای هوا، کسر حجمی یک و برای آب کسر حجمی صفر وارد شده است. در روی دیواره ها هم شرط عدم لغزش (No slip shear condition) دیواره و سرعت صفر در کلیه جهات منظور گردیده است.

معیار همگرایی برای معادلات فشار، سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی و پخش آن و همچنین معادله پیوستگی خطای باقیمانده برابر  $10^{-5}$  می باشد.

#### 4-6-2- انتخاب مش بندی

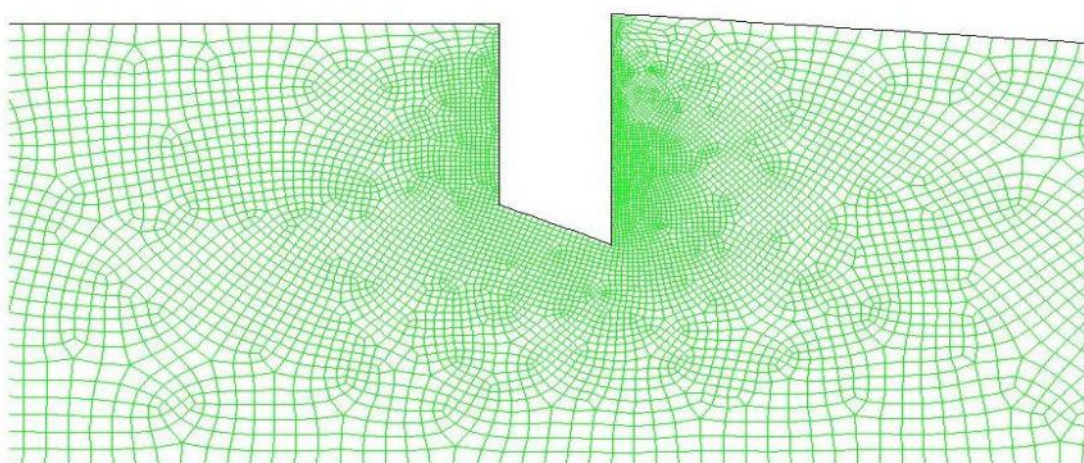
جهت گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان، هندسه مدل به شبکه غیر ساخت یافته متشکل از المان های چهار وجهی تبدیل شده است. در شکل (4-4) مش بندی در اطراف دریچه با بازشدگی % 50 نشان داده شده است. بهینه سازی شبکه از آن جهت اهمیت دارد که در هر مساله دینامیک سیالات

محاسباتی نیاز است که جوابهای بدست آمده مستقل از شبکه بندی هندسی باشد. این شرط با تغییر اندازه شبکه مشخص می شود و لذا شبکه در هر مرحله نسبت به مرحله قبل ریزتر شده تا زمانی که در دو مرحله پیاپی جواب های بدست آمده اختلاف نامحسوسی نسبت بهم داشته باشند. در این حالت جواب مستقل از

شبکه بندی به دست آمده است. بدین منظور از روش سعی و خطا استفاده شده، بدین صورت که معیار ریزی شبکه المان بندی، نسبت تغییرات خروجی ها به نسبت تغییرات اندازه شبکه قرار داده شده. لذا برای مساله مورد نظر ابتدا مساله با یک شبکه اولیه حل شده و نتایج آن با حل مدل با شبکه ریزتر مقایسه شده

است. در صورت اختلاف بیش از ۰/۵ درصد دوباره هندسه با المان بندی ریزتر آنالیز شده است. این کار تا جایی ادامه پیدا کرده است که نتایج بدست آمده کمتر از ۰/۵ درصد اختلاف یابند. [27]

همانطور که شکل (۴-۴) شبکه بندی مورد استفاده در این تحقیق را نشان میدهد شبکه بندی در قسمتهایی که میدان فشار و سرعت تغییرات زیادی دارند و دقت بالاتر مورد نیاز است (مانند زیر و اطراف دریچه) ریزتر و در قسمتهای با تغییرات کم، جهت کاهش در مدت زمان اجرای برنامه، مش بندی بزرگتر استفاده شده است.



شکل (4-4) مش بندی اطراف دریچه

#### 4-6-3- خصوصیات سیال

سیالات بکار رفته جهت مدلسازی جریان دو فازی، آب و هوا می باشند. مقادیر چگالی و ویسکوزیته آب بترتیب برابر  $998/2 \text{ kg/m}^3$  و  $0/001 \text{ kg/m.s}$  و برای هوا معادل  $1/225$  و  $1/789 \times 10^{-5}$  در نظر گرفته شده است. قطر ذرات آب با دستگاه پراب لیزری در آزمایشگاه اندازه گیری شده و برابر  $1 \text{ mm}$  منظور شده است. همچنین با توجه به اینکه عدد ماخ  $M=V/c$  کمتر از  $0/3$  است (  $v$  سرعت سیال و  $c$  سرعت صوت در هوا)، لذا سیال آب بعنوان غیرقابل تراکم فرض می شود. سرعت هوا نیز همواره کمتر از  $90$  متر بر ثانیه است در نتیجه عدد ماخ کمتر از  $0/3$  شده و شرط غیر قابل تراکم بودن هوا نیز صحیح می باشد. [27]

برای مدلسازی جریان دو فاز آب و هوا، از مدل عددی Mixture استفاده شده است و برای حل معادلات فشار- سرعت الگوریتم PISO انتخاب گردیده است. با توجه به محاسبات انجام شده، عدد

رینولدز همواره از  $10^5$  بزرگتر بوده، لذا جریان کاملاً آشفته است. [29] برای مدلسازی تنش های رینولدز ابتدا از روش k-epsilon استفاده شد ولی مدل واگرا گردید. سپس مدل با استفاده از روش RSM تحلیل شد که نتایج این مدل با مدل آزمایشگاهی دارای تطابق خوبی گردید. در نتیجه برای حل معادلات آشفتگی، به علت دقت بالاتر جواب ها از مدل آشفتگی Reynolds پنج معادله ای استفاده شده است. در گسسته سازی معادلات مومنتوم، کسر حجمی<sup>۲۱</sup>، انرژی جنبشی آشفتگی<sup>۲۲</sup> و پخش انرژی<sup>۲۳</sup> همواره از روش دقت مرتبه 2 و از حل کننده تفکیکی<sup>۲۴</sup> استفاده بعمل آمده است. این روش ترجیحاً برای جریان های غیر قابل تراکم و یا به طور ملایم قابل تراکم به کار برده می شود. [30]

---

<sup>21</sup> Volume Fraction

<sup>22</sup> Turbulent Kinetic Energy

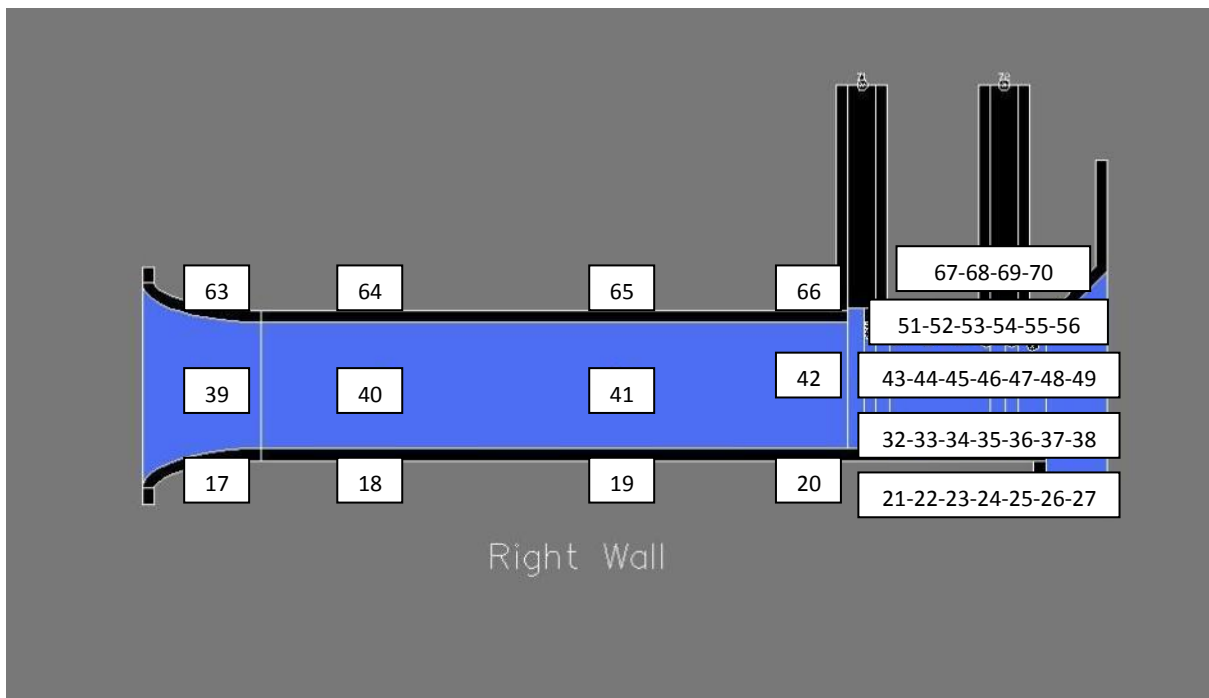
<sup>23</sup> Turbulent Dissipation Rate

<sup>24</sup> Segregated Solver

#### 4-6-4- توزیع مکانی پیزومترها

با توجه به شکل زیر قرارگیری پیزومترها به این صورت می باشد:

پیزومترهای	17 الی 27 در کف مجرا
پیزومترهای	32 الی 38 در جداره و در قسمت پایین مجرا
پیزومترهای	39 الی 49 در جداره و در قسمت میانی مجرا
پیزومترهای	51 الی 56 در جداره و در قسمت بالای مجرا
پیزومترهای	63 الی 70 در سقف مجرا



شکل (4-5) توزیع مکانی پیزومترها

#### 4-6-5- جمع بندی

در این فصل شرح مختصری از شیوه عملکرد نرم افزار فلونت و فرآیند روش حل عددی استفاده شده در این تحقیق بیان شد. همانطور که اشاره گردید در مدل حاضر از روش حل تفکیکی و

الگوریتم پیزو برای مدلسازی استفاده شده است. برای مدلسازی جریان دو فاز آب و هوا، از مدل عددی Mixture استفاده گردیده است. همچنین برای مدلسازی تنش های رینولدز بدلیل دقت بالاتر جواب ها از مدل آشفتگی Reynolds پنج معادله ای استفاده شده است. البته بعلت گستردگی مطالب در این زمینه، تنها به تفسیر مطالبی که بطور مستقیم با موضوع پروژه ارتباط دارند پرداخته شد.

# فصل پنجم

## ارائه نتایج



## 5-1-1- مقدمه

نتایج این تحقیق در دو مرحله ارزیابی می شوند. مرحله اول شامل صحت سنجی و کالیبره نمودن مدل عددی با استفاده از نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی است. در مرحله دوم زمانی که از صحت نتایج مدل عددی اطمینان حاصل شد به توسعه و گسترش آن پرداخته و نتایج برای دیگر حالات استخراج می شود. در این پایان نامه، ابتدا در گام اول با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی برای حالت هد آب 2 متر و بازشدگی 90%، نتایج مدل عددی کنترل و کالیبره گردید.

## 5-2- نتایج مدل

در این بخش نتایج فشار استاتیک مدل با زاویه 22/5 و بازشدگی 90% و هد 2 متر ارائه می شود. جدول (5-1) نتایج مدل عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد. در این جدول ستون شماره 1 نتایج روش حل Basic، ستون شماره 2 نتایج روش حل Piso، ستون شماره 3 نتایج روش حل Coupled، ستون شماره 4 نتایج روش حل Piso با مش های ریزتر و ستون شماره 5 روش حل Piso با مش های بسیار ریز را نشان می دهند. همانطور که از جدول فوق و بررسی میزان خطاها ملاحظه می شود، روش حل پیزو (Piso) با تعداد مش های بسیار ریز، مناسب ترین جواب ها را می دهد. بنابراین در ادامه و برای سایر حالات فقط نتایج این روش مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

جدول (5-1) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه 22/5 و بازشدگی 90% و هد 2 متر

Piez. No.	Static Pressure (m)		Error%
	Experimental	Numerical	

		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17	1.2	0.55	0.54	0.5	0.57	0.62	53	54	58	52	47
18	0.8	0.48	0.55	0.51	0.59	0.67	41	33	38	28	18
19	0.8	0.44	0.53	0.49	0.57	0.58	46	35	40	30	29
20	0.8	0.34	0.43	0.39	0.46	0.49	56	45	50	41	37
21	0.6	0.23	0.3	0.26	0.33	0.37	58	45	53	40	33
22	0.5	0.17	0.24	0.19	0.26	0.39	62	47	58	42	13
23	0.3	0.13	0.19	0.14	0.2	0.27	57	37	53	33	10
24	0.3	0.1	0.16	0.11	0.17	0.28	68	48	65	45	10
25	0.3	0.07	0.14	0.09	0.15	0.19	74	48	67	44	30
26	0.2	0.03	0.11	0.07	0.12	0.18	86	50	68	45	18
27	0.2	-0.02	0.06	0.02	0.07	0.09	113	63	88	56	44
32	0.3	0.21	0.29	0.24	0.31	0.34	16	16	4	24	36
33	0.3	0.16	0.22	0.18	0.24	0.28	52	34	46	28	16
34	0.3	0.11	0.17	0.12	0.18	0.27	68	51	65	48	22
35	0.3	0.09	0.14	0.09	0.15	0.25	69	53	69	49	15
36	0.4	0.06	0.12	0.08	0.14	0.18	84	67	78	62	51
37	0.1	0.02	0.1	0.06	0.11	0.14	85	26	56	19	4
38	0.2	-0.01	0.05	0.02	0.06	0.09	104	78	91	73	61
39	1.1	0.71	0.73	0.7	0.8	0.79	37	35	38	29	30
40	0.6	0.4	0.46	0.43	0.5	0.56	38	28	33	22	13
41	0.4	0.36	0.44	0.41	0.48	0.49	3	19	11	30	32
42	0.7	0.31	0.4	0.36	0.44	0.49	57	44	50	39	32
43	0.5	0.13	0.2	0.16	0.22	0.28	71	56	64	51	38
44	0.1	0.02	0.07	0.03	0.08	0.13	86	50	79	43	7
45	0.2	-0.01	0.02	-0.03	0.02	0.15	105	90	115	90	25
46	0.1	0.03	0.06	0.0	0.07	0.14	77	54	100	46	8
47	0.2	0.05	0.1	0.04	0.11	0.16	69	38	75	31	0
48	0.1	0.04	0.1	0.06	0.12	0.15	50	25	25	50	88
49	0.2	0.03	0.08	0.05	0.09	0.17	88	64	77	59	23
50	0.3	0.13	0.15	0.12	0.17	0.19	53	45	56	38	31
51	-0.1	-0.5	-0.5	-0.5	-0.55	-0.5	0	0	0	0	0
52	-0.2	-0.3	-0.4	-0.47	-0.45	-0.17	43	90	124	114	19
53	-0.2	0.04	-0.6	-0.16	-0.05	0.14	0	0	0	0	0
54	-0.2	0.09	0.14	0.08	0.16	0.2	0	0	0	0	0

جدول (1-5) (دنباله): نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه 22/5 و بازشدگی 90% و هد 2

متر

Piez. No.	Static Pressure (m)		Error%
	Experimental	Numerical	

		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
55	-0.1	0.11	0.2	0.15	0.22	0.25	0	0	0	0	0
56	-0.2	0.04	0.1	0.07	0.12	0.14	0	0	0	0	0
63	1.0	0.46	0.43	0.39	0.48	0.48	55	58	62	53	53
64	1.0	0.33	0.39	0.35	0.43	0.44	67	61	65	57	56
65	0.7	0.29	0.37	0.33	0.41	0.49	57	46	51	40	28
66	0.8	0.38	0.5	0.45	0.54	0.58	51	36	42	31	26
67	0.1	-0.5	-0.5	-0.54	-0.6	-0.6	0	0	0	0	0
68	0.1	-0.33	-0.4	-0.47	-0.4	-0.18	0	0	0	0	0
69	0.1	0.06	-0.6	-0.15	-0.05	0.11	0	0	0	0	0
70	0.1	0.1	0.12	0.08	0.2	0.2	0	0	0	0	0
Average							63	46	59	43	29

لازم به توضیح است که پیزومترهای شماره 50 الی 56 و 67 الی 70 در ناحیه جریان مخلوط آب و هوا قرار دارند، از این رو نتایج آنها در محاسبه درصد خطا منظور نشده است. در ادامه به ارائه نتایج مدل عددی در سایر شرایط اقدام می‌گردد و تلاش می‌گردد تا حتی المقدور با نتایج آزمایشگاهی در دسترس مورد مقایسه قرار گیرند.

### 3-5- ارائه نتایج

#### 3-5-1- ارائه نتایج زاویه 22/5 درجه

در این بخش نتایج فشار استاتیک مدل عددی با زاویه 22/5 و بازشدگی های 50%، 70% و 90% با هد 2 و 5 متر، ارائه می‌گردد.

بررسی جدول های (2-5) الی (5-5) که برای بازشدگی های 70% و 50% تهیه گردیده است، نشاندهنده عملکرد مدل با محدوده خطای قابل قبول می‌باشد. در این ارتباط اگرچه خطاهای در محدوده 30% الی 50% نیز ملاحظه می‌گردد، (که آنها عمدتاً در پیزومترهایی واقع شده که در آنها جریان در سطح جدایش مایع و حبابهای هوا است) ولی اکثریت خطاهای محاسباتی در محدوده 10% الی 20% می‌باشد (میانگین درصد خطای نسبی کلیه جداول در همین محدوده است) که عملکرد مناسب مدل عددی را تأیید می‌نماید. کمترین محدوده خطا در قسمت بالای مجرا و بیشترین آن در قسمت میانی مجرا مشاهده می‌گردد. محاسبات خطای میانگین بین مدل و آزمایش نیز انجام گرفته که نتایج در انتهای هر جدول ارائه شده است. چنانچه از جدول های زیر و همچنین شکل (5-5)

1) ملاحظه می گردد، میزان خطای محاسباتی فشار در بازشدگی 90% بزرگتر از بازشدگی های 70% و 50% می باشد.

برای هد 2 متر با افزایش میزان بازشدگی از 50% به 70% تغییر محسوسی در درصد خطا مشاهده نمی شود. همچنین با افزایش هد از 2 متر به 5 متر در بازشدگی 50% درجه تغییرات خاصی در خطا مشاهده نگردید.

#### • محاسبه درصد خطای نسبی:

در کلیه جداول، خطاهای محاسبه شده، درصد خطای نسبی می باشند، که طبق رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\text{Error \%} = \left| \frac{\text{Experimental} - \text{Numerical}}{\text{Experimental}} \right| \times 100 \quad \text{رابطه ( 5-)}$$

جدول (2-5) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه 22/5 و بازشدگی 50% و هد 2 متر

Position	Piez.No.	Static Pressure (m)		Error%
		Experimental	Numerical	
Bottom	17	1.76	1.79	2
	18	1.61	1.70	6
	19	1.67	1.70	2
	20	1.42	1.43	1
	21	0.77	0.76	1
	22	0.47	0.47	0
	23	0.20	0.24	20
	24	0.15	0.13	13
	25	0.14	0.09	36
	26	0.08	0.06	25
Center	27	0.05	0.04	20
	32	0.68	0.72	6
	33	0.27	0.43	62
	34	0.21	0.21	2
	35	0.14	0.11	19
	36	0.10	0.06	40
	37	0.06	0.05	18
	38	0.19	0.02	89
	39	1.75	1.78	2
	40	1.74	1.70	2
	41	1.65	1.70	3
	42	1.52	1.56	3
	43	0.42	0.00	0
44	0.00	0.00	0	
45	0.00	0.00	0	
46	-0.01	0.00	0	
47	0.01	0.00	0	
48	0.00	0.00	0	
49	0.00	0.00	0	
Top	63	1.61	1.63	2
	64	1.47	1.60	9
	65	1.53	1.60	5
	66	1.66	1.80	8
			Average:	12.3

جدول (3-5) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه 22/5 و بازشدگی 70% و هد 2 متر

Position	Piez.No.	Static Pressure (m)		Error %
		Experimental	Numerical	
Bottom	17	1.40	1.25	11
	18	1.25	1.24	1
	19	1.30	1.23	5
	20	1.10	1.00	9
	21	0.70	0.67	4
	22	0.56	0.54	4
	23	0.30	0.33	10
	24	0.27	0.25	7
	25	0.22	0.19	14
	26	0.14	0.12	14
	27	0.11	0.09	18
Center	32	0.30	0.55	83
	33	0.33	0.43	32
	34	0.34	0.30	10
	35	0.24	0.19	21
	36	0.17	0.13	24
	37	0.12	0.10	17
	38	0.05	0.05	10
	39	1.40	1.30	7
	40	1.25	1.16	7
	41	1.25	1.15	8
	42	1.10	1.04	5
	43	0.43	0.43	0
	44	0.17	0.20	18
45	0.11	0.10	9	
46	0.06	0.05	17	
47	0.04	0.04	13	
48	0.02	0.02	0	
49	0.06	0.05	17	
Top	63	1.34	1.20	10
	64	1.18	1.10	7
	65	1.16	1.08	7
	66	1.38	1.37	1
			Average:	12.7

جدول (4-5) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه 22/5 و بازشدگی 50% و هد 5 متر

Position	Piez.No.	Static Pressure (m)		Error %
		Experimental	Numerical	
Bottom	17	4.34	4.11	5
	18	3.75	4.1	9
	19	4.06	4	1
	20	3.33	3.2	4
	21	1.86	1.69	9
	22	1.11	1	10
	23	0.51	0.48	6
	24	0.23	0.23	0
	25	0.18	0.14	22
	26	0.1	0.08	20
27	0.08	0.04	50	
Center	32	1.565	1.63	4
	33	0.615	0.93	51
	34	0.465	0.42	10
	35	0.285	0.19	33
	36	0.215	0.12	44
	37	0.095	0.06	37
	38	0.495	0.01	98
	39	4.29	4.2	2
	40	3.99	4	0
	41	4.01	4	0
	42	3.71	3.68	1
	43	0.84	0.7	17
	44	-0.11	-0.001	0
45	0.01	-0.001	0	
46	-0.02	-0.002	0	
47	0.02	-0.003	0	
48	0.01	-0.004	0	
49	0.04	0.03	25	
Top	63	4.215	4	5
	64	3.94	4	2
	65	3.92	3.94	1
	66	4.27	4.5	5
			Average:	14.3

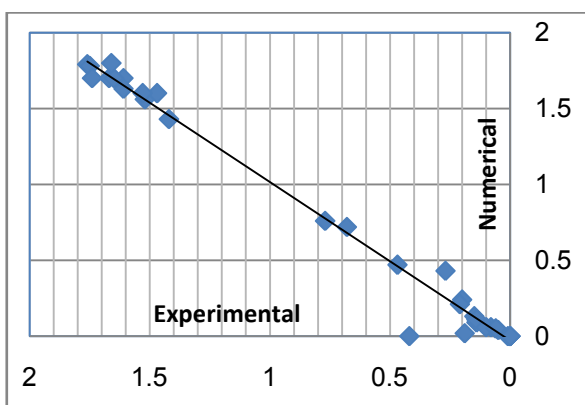
جدول (5-5) : نتایج مقادیر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی مدل با زاویه 22/5 و بازشدگی 70% و هد 5 متر

Position	Piez.No.	Static Pressure (m)	Error %
----------	----------	---------------------	---------

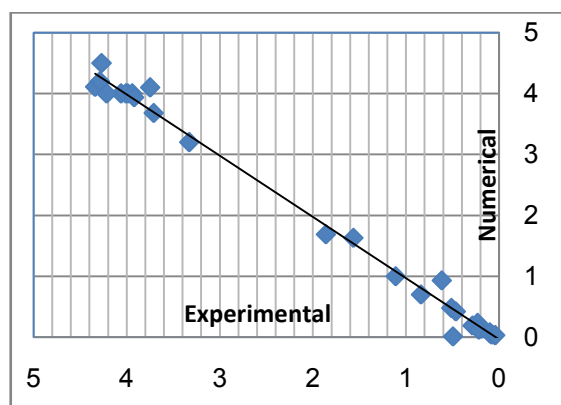
		Experimental	Numerical	
<i>Bottom</i>	17	3.71	3.10	16.4
	18	3.08	3.03	1.6
	19	3.22	3.00	6.8
	20	2.61	2.40	8.0
	21	1.68	1.54	8.3
	22	1.21	1.11	8.3
	23	0.71	0.69	2.8
	24	0.41	0.41	0.0
	25	0.29	0.26	10.3
	26	0.21	0.15	28.6
	27	0.14	0.11	21.4
<i>Center</i>	32	1.51	1.50	0.3
	33	0.82	1.00	22.0
	34	0.72	0.65	9.1
	35	0.53	0.37	29.5
	36	0.31	0.22	29.0
	37	0.15	0.12	17.2
	38	0.68	0.05	92.6
	39	3.71	3.20	13.7
	40	3.13	2.90	7.3
	41	3.18	2.90	8.8
	42	2.86	2.50	12.6
	43	1.32	1.00	24.2
	44	0.02	0.50	0.0
45	0.26	0.20	23.1	
46	0.07	0.08	14.3	
47	0.20	0.03	85.0	
48	0.04	0.01	75.0	
49	0.39	0.00	0.0	
<i>Top</i>	63	3.11	2.90	6.8
	64	3.13	2.87	8.3
	65	3.09	2.85	7.8
	66	3.69	3.63	1.6
			Average:	18.21

جهت مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی فشار روی بدنه مجرای تخلیه کننده به ازای بازشدگی 50% و هد 2 متر و با زاویه لبه 22/5 درجه در اشکال (1-5) الی (4-5) آورده شده است. میانگین درصد خطای نسبی تمامی نمونه ها حدود 14% گردید که قابل قبول به نظر می رسد.

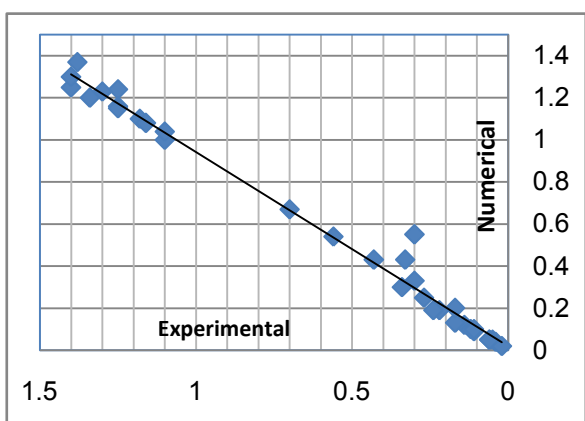




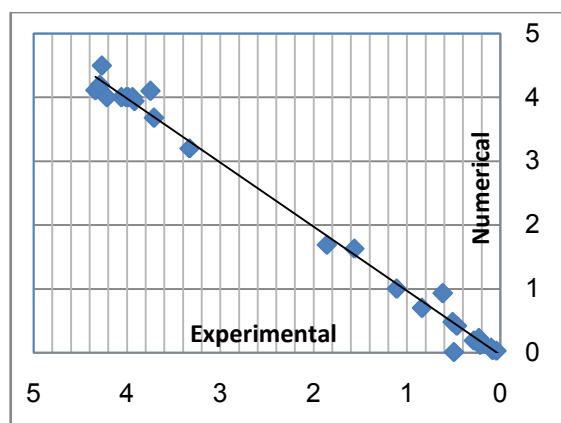
شکل (2-5) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای حالت هد 2متر و بازشدگی 50% و زاویه لبه 22/5 درجه



شکل (1-5) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای حالت هد 5متر و بازشدگی 50% و زاویه لبه 22/5 درجه



شکل (4-5) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای حالت هد 2متر و بازشدگی 70% و زاویه لبه 22/5 درجه



شکل (3-5) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای حالت هد 5متر و بازشدگی 70% و زاویه لبه 22/5 درجه

### 2-3-5- نتایج زاویه 45 درجه:

در این بخش و پس از مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی و اطمینان از صحت نتایج و قابل اتکا بودن مدل، توسعه مدل عددی برای شرایط جدید میدان ارائه می شود. در این مرحله برای زاویه لبه

45 درجه مدل عددی، شبیه سازی صورت گرفته و برای هدهای آب 2 و 5 متر و درصد بازشدگی های 50% و 70% میدان جریان مورد بررسی قرار می گیرد. جدول های (5-6) الی (5-9) نتایج فشار و سرعت را در مدل عددی و برای بازشدگی های 50% و 70%، هدهای 2 و 5 متر با زاویه لبه دریچه 45 درجه نشان می دهد.

جدول (5-6) : نتایج عددی میدان سرعت و فشار با زاویه لبه دریچه 45 و بازشدگی 50% و هد 2 متر

Position	Piez.No.	Pressure (m)	Velocity (m/s)
Bottom	17	1.89	2.35
	18	1.88	2.26
	19	1.88	2.16
	20	1.65	2.99
	21	1.1	4.48
	22	0.71	5.25
	23	0.35	5.86
	24	0.17	6.11
	25	0.1	6.19
	26	0.06	6.20
	27	0.03	6.21
Center	32	1.07	4.64
	33	0.67	5.42
	34	0.31	6.04
	35	0.14	6.32
	36	0.07	6.42
	37	0.04	6.47
	38	0.01	6.5
	39	1.87	2.19
	40	1.8	2.46
	41	1.8	2.47
	42	1.72	2.76
	43	0.87	4.83
	44	0	0.75
45	0	1.08	
46	0	0.58	
47	0	0.45	
48	0	0.75	
49	0	1.1	
Top	63	1.72	2.32
	64	1.73	2.28
	65	1.72	2.21
	66	1.9	0.72

جدول (7-5) : نتایج عددی میدان سرعت و فشار با زاویه لبه دریچه 45 و بازشدگی 70% و هد 2 متر

Position	Piez.No.	Pressure (m)	Velocity (m/s)
Bottom	17	1.56	3.40
	18	1.56	3.36
	19	1.55	3.31
	20	1.35	3.74
	21	0.97	4.68
	22	0.73	5.05
	23	0.47	5.54
	24	0.29	5.83
	25	0.18	5.98
	26	0.12	6.06
	27	0.06	5.93
Center	32	0.95	4.84
	33	0.71	5.31
	34	0.44	5.78
	35	0.26	6.08
	36	0.16	6.24
	37	0.09	6.34
	38	0.04	6.41
	39	1.6	3.13
	40	1.47	3.5
	41	1.47	3.51
	42	1.39	3.7
	43	0.83	4.97
	44	0.35	5.83
45	0.11	6.22	
46	0.03	6.32	
47	0.01	6.35	
48	0.003	6.37	
49	-0.002	6.37	
Top	63	1.42	3.22
	64	1.4	3.33
	65	1.39	3.33
	66	1.62	2.38

جدول (8-5) : نتایج عددی میدان سرعت و فشار با زاویه لبه دریچه 45 و بازشدگی 50% و هد 5 متر

Position	Piez.No.	Pressure (m)	Velocity (m/s)
Bottom	17	4.8	3.87
	18	4.8	3.73
	19	4.78	3.58

	20	4.2	4.88
	21	2.7	7.26
	22	1.75	8.49
	23	0.83	9.46
	24	0.35	9.71
	25	0.17	9.75
	26	0.087	9.70
	27	0.03	9.63
Center	32	2.7	7.49
	33	1.6	8.74
	34	0.74	9.73
	35	0.3	10.17
	36	0.12	10.33
	37	0.05	10.4
	38	0.006	10.43
	39	4.8	3.54
	40	4.7	3.96
	41	4.7	3.97
	42	4.5	4.42
	43	2.26	7.82
	44	-0.002	1.27
	45	-0.002	1.79
	46	-0.002	0.94
	47	-0.002	0.76
	48	-0.002	1.31
49	-0.001	1.96	
Top	63	4.66	3.73
	64	4.64	3.72
	65	4.63	3.65
	66	5.1	1.47

جدول (9-5) : نتایج عددی میدان سرعت و فشار با زاویه لبه دریچه 45 و بازشدگی 70% و هد 5 متر

Position	Piez.No.	Pressure (m)	Velocity (m/s)
Bottom	17	3.37	5.38
	18	3.40	5.31
	19	3.38	5.16
	20	2.93	5.92

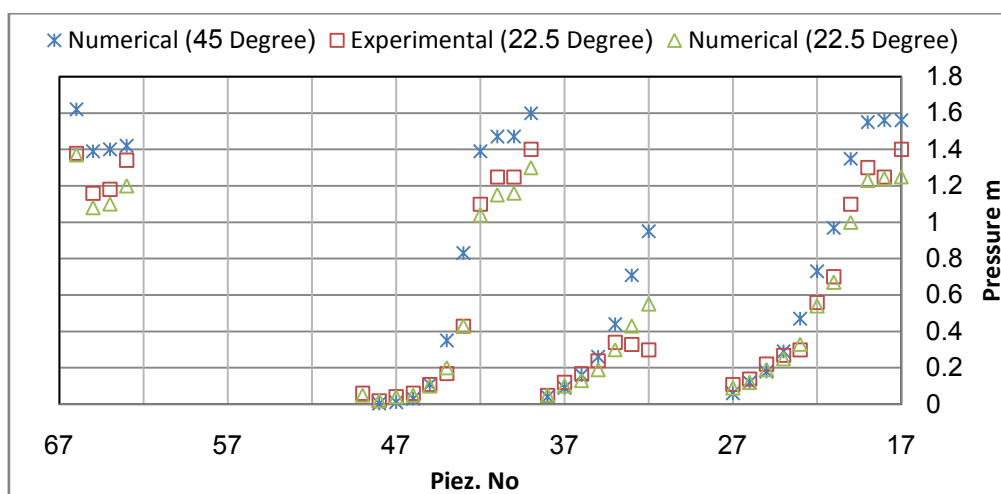
	21	2.00	6.82
	22	1.55	7.54
	23	0.96	8.00
	24	0.55	8.38
	25	0.33	8.54
	26	0.20	8.58
	27	0.12	8.60
Center	32	2.05	7.32
	33	1.50	8.02
	34	0.91	8.71
	35	0.51	9.15
	36	0.30	9.37
	37	0.17	9.5
	38	0.10	9.57
	39	3.60	4.7
	40	3.30	5.26
	41	3.30	5.29
	42	3.10	5.57
	43	1.80	7.48
	44	0.77	8.77
	45	0.23	9.35
	46	0.07	9.5
	47	0.02	9.54
	48	0.01	9.57
49	-0.01	9.57	
Top	63	3.31	4.82
	64	3.25	5.01
	65	3.33	4.61
	66	3.76	3.51

#### 4-5- مقایسه نتایج

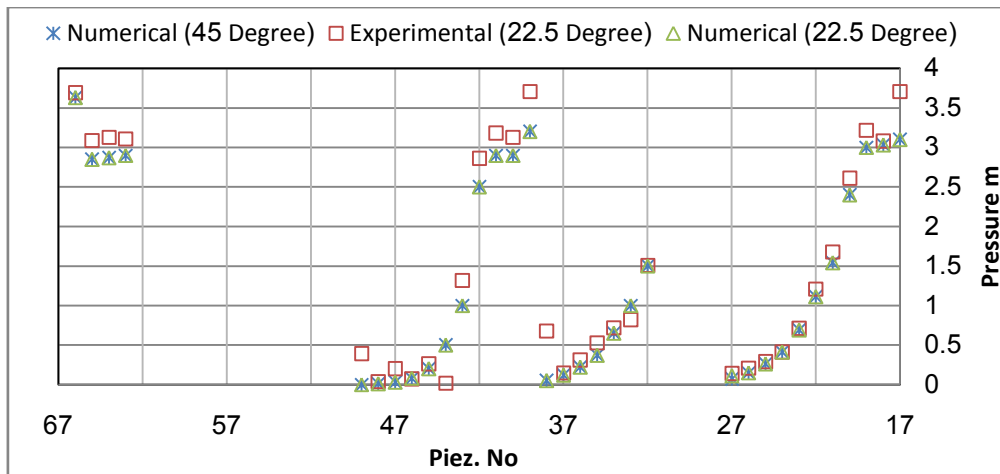
در این قسمت جهت رسیدن به نتایج کلی و بررسی تأثیر زاویه لبه دریچه بر پارامترهای سرعت و فشار و دبی و اندیس کاویتاسیون و اعداد رینولدز و فرود در پایین دست دریچه به مقایسه نتایج برای حالت‌های زاویه لبه 22/5 و 45 درجه، در قالب نمودار می پردازیم.

#### 1-4-5- توزیع فشار

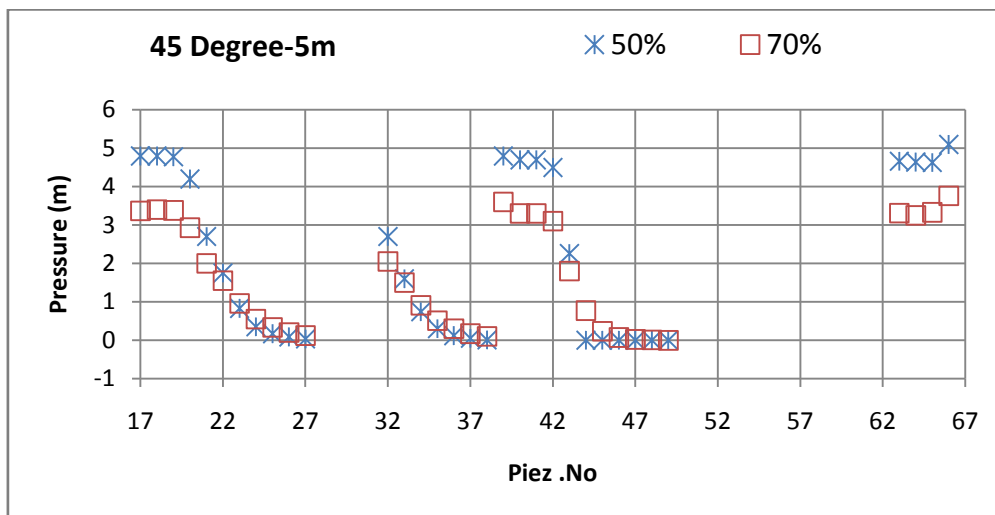
شکل (5-5) تغییرات فشار در هد 2 متر و بازشدگی 70% را برای دو زاویه 22/5 و 45 درجه نشان می دهد. در این شکل نتایج آزمایش مربوط به زاویه 22/5 درجه نیز ارائه شده است. یادآور می شود زاویه لبه دریاچه نسبت به افق مد نظر می باشد. با توجه به شکل ملاحظه می گردد که در اکثر نقاط مجرا، مقادیر فشار در زاویه 45 درجه نسبت به زاویه 22/5 درجه بزرگتر می باشد. این نتیجه بخصوص در بالادست دریاچه نمایان تر می باشد. در پائین دست دریاچه در محدوده پیزومترهای نزدیک دریاچه نیز قابل مشاهده بوده ولی در فواصل دور پائین دست اختلاف قابل توجهی مشاهده نمی گردد. با افزایش هد مطابق شکل (5-6) این نتیجه با وضوح بیشتر قابل ملاحظه می باشد. در این شکل هد آب معادل 5 متر و بازشدگی معادل 50% می باشد که نتایج عددی دو زاویه 45 و 22/5 درجه را مقایسه نموده است. در شکل (5-7) نتایج دو بازشدگی 50% و 70% در هد 5 متر برای زاویه 45 درجه مقایسه شده است. مطابق شکل ملاحظه می شود که مقادیر فشار در بازشدگی 50% نسبت به بازشدگی 70% در نقاط مختلف مجرا بزرگتر می باشد. این روند در قسمت بالا دست دریاچه نمود بیشتری دارد و در قسمت پائین دست نزدیک دریاچه کم رنگ تر و در فاصله دور اختلافی مشاهده نمی شود.



شکل (5-5) تغییرات فشار در طول مجرا با دو زاویه لبه دریاچه و هد 2m و بازشدگی 70%



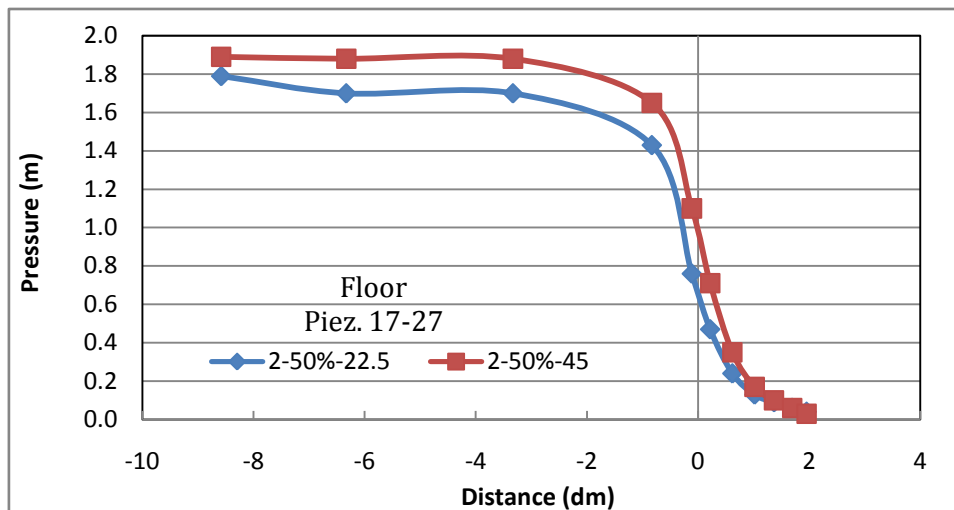
شکل (6-5) تغییرات فشار در طول مجرا با دو زاویه لبه دریچه و هد 5m و بازشدگی 50%



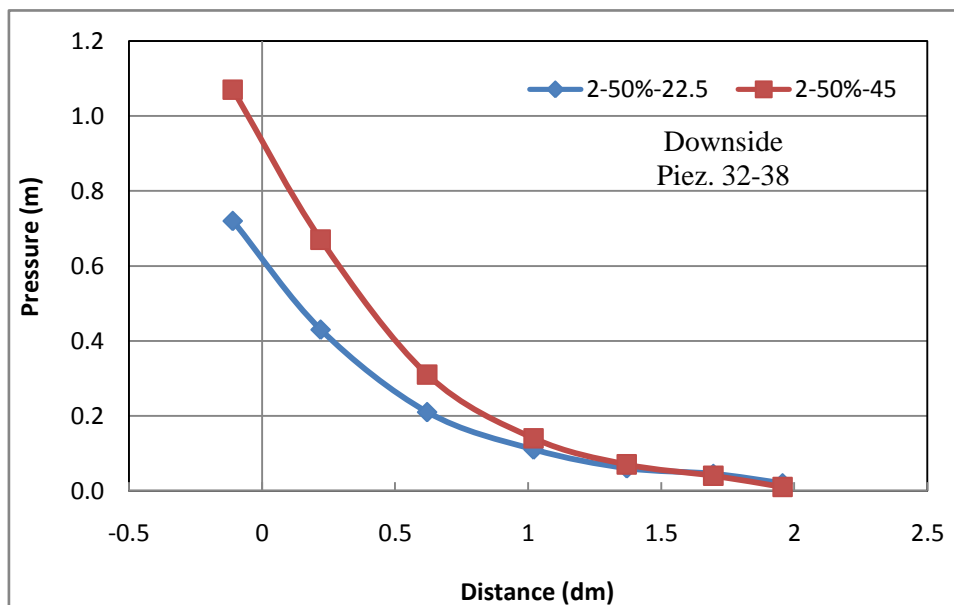
شکل (7-5) تغییرات فشار در طول مجرا در دریچه با زاویه لبه  $45^\circ$  و هد 5m با بازشدگی 50% و 70% در ادامه جهت ارائه تصویر بهتر از میدان جریان، تغییرات فشار بصورت جزئی مقایسه گردیده اند. شکل‌های (8-5) الی (11-5) تغییرات فشار به ترتیب در پیزومترهای 17 الی 27 واقع در کف، پیزومترهای 32 الی 38 واقع در پائین دیواره، پیزومترهای 39 الی 49 واقع در میانه دیواره و پیزومترهای 63 الی 70 واقع در سقف مجرا را نشان می دهند. در این شکل ها نتایج فشار نقاط مختلف با دو زاویه لبه دریچه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$  درجه، با هد 2 متر و بازشدگی 50% مورد مقایسه قرار گرفته است. در کلیه نقاط مجرا نتایج فشار با زاویه  $45^\circ$  تا حدود 10% بزرگتر از نتایج زاویه  $22/5^\circ$  درجه می باشد. در محدوده پائین دست دریچه و روی دیواره که تأثیر لبه دریچه بخصوص بر شکل‌گیری لایه برشی مؤثرتر می باشد، این افزایش فشار از حدود 50% نیز فراتر رفته است. شکل‌های (12-5) الی (15-5) نیز تغییرات فشار به ترتیب در پیزومترهای فوق را نشان می دهند. در هر شکل نتایج فشار نقاط مختلف با دو زاویه لبه دریچه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، با هد 2 متر ولی بازشدگی 70% مورد مقایسه قرار گرفته است. در این بازشدگی مشابه حالت بازشدگی 50%، در کلیه نقاط

مجرا نتایج فشار با زاویه  $45^\circ$  بزرگتر از نتایج زاویه  $22/5$  درجه می باشد. این افزایش بزرگتر از حالت قبل و تا حدود 25% در نقاط مختلف مجرا بوده، اما در محدوده پائین دست دریچه و روی دیواره که تأثیر لبه دریچه بخصوص بر شکل گیری لایه برشی مؤثرتر می باشد، این افزایش فشار تا حدود 70% نیز فراتر رفته است.

در تمامی جداول زیر محور افقی نشاندهنده فاصله از لبه دریچه و برحسب دسی متر می باشد.

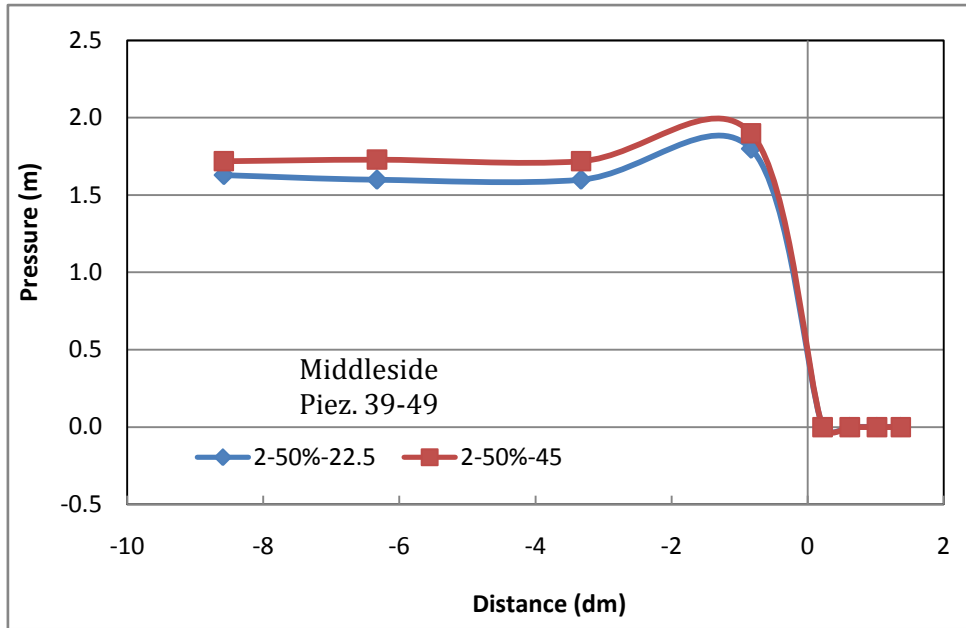


شکل (8-5) تغییرات فشار در پیزومترهای 17 الی 27 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 50%

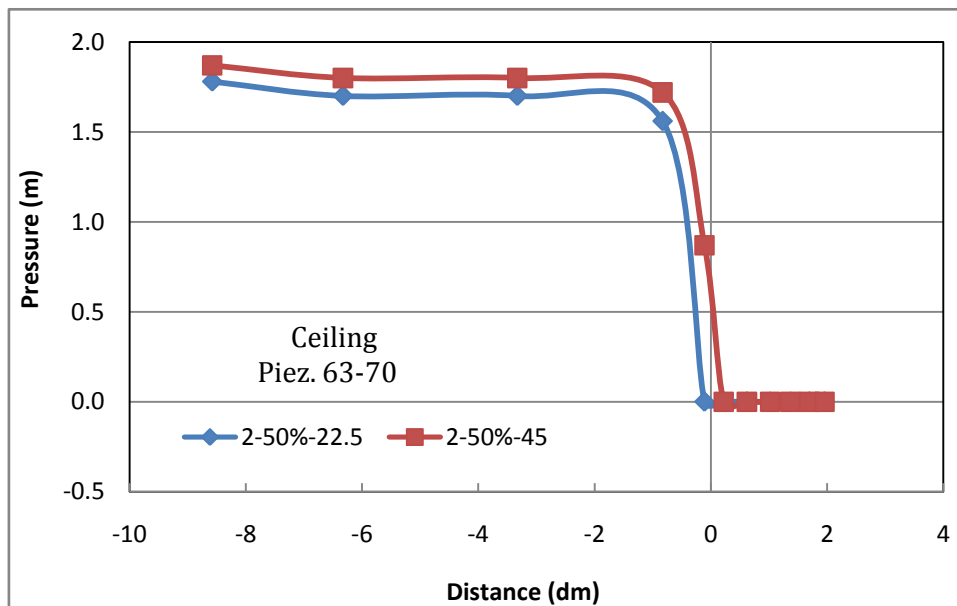


شکل (9-5) تغییرات فشار در پیزومترهای 32 الی 38 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 50%

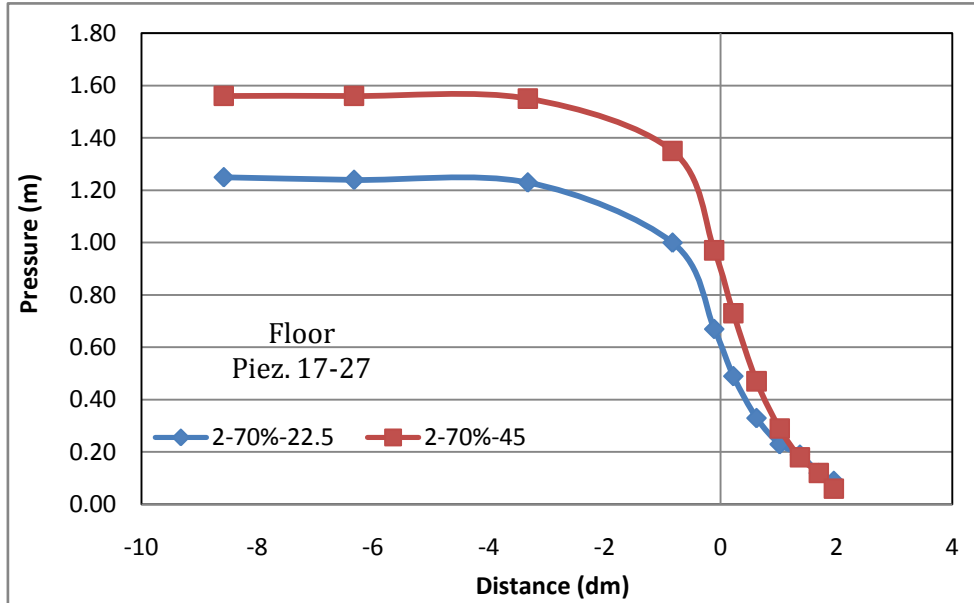




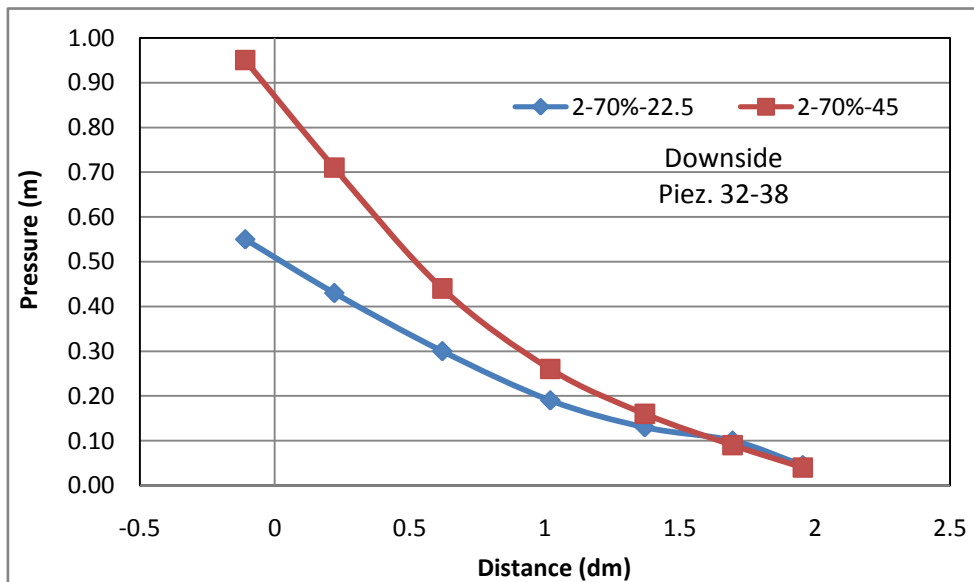
شکل (10-5) تغییرات فشار در پیزومترهای 39 الی 49 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 50%



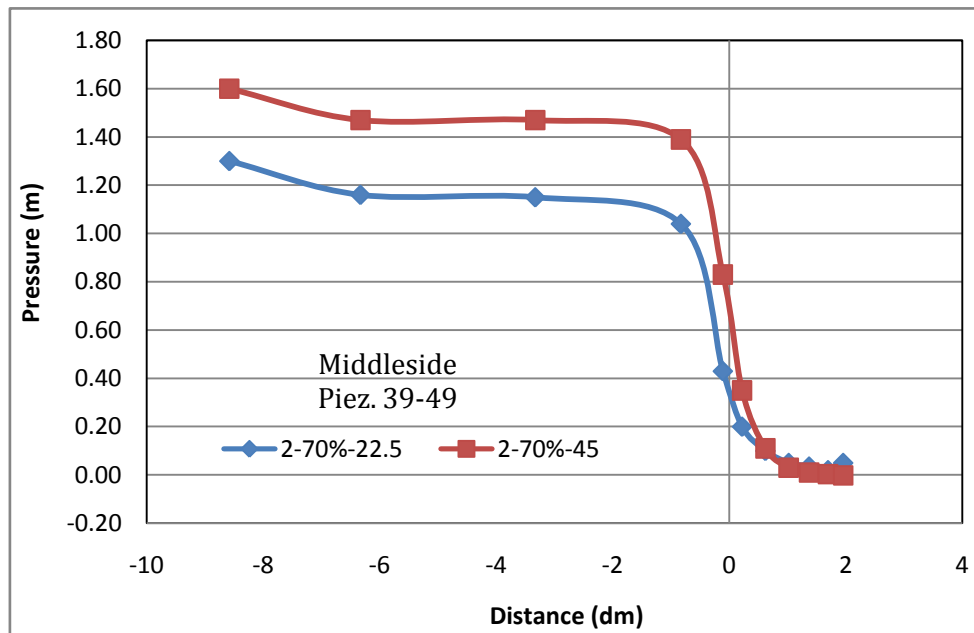
شکل (11-5) تغییرات فشار در پیزومترهای 63 الی 70 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 50%



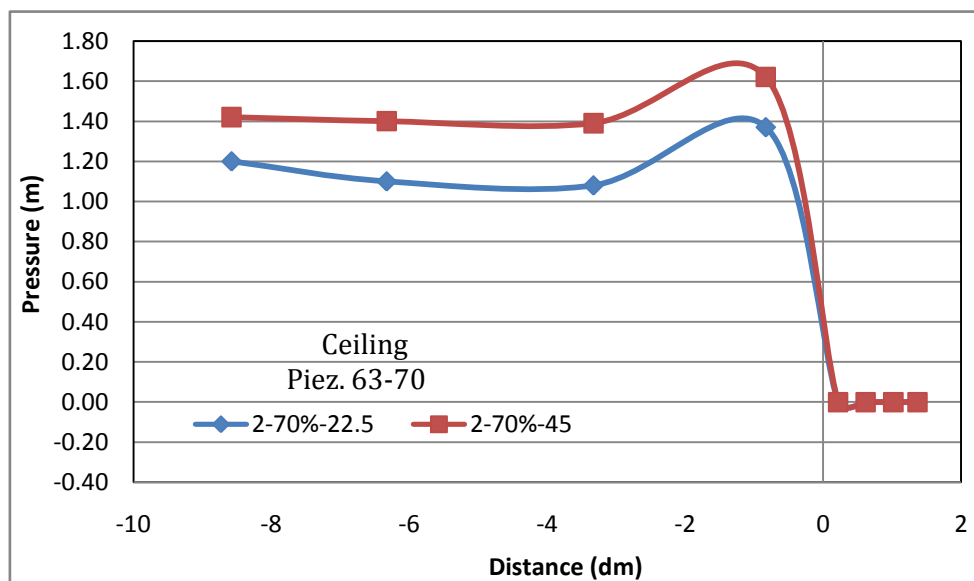
شکل (12-5) تغییرات فشار در پیزومترهای 17 الی 27 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 70%



شکل (13-5) تغییرات فشار در پیزومتر 32 الی 38 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 70%



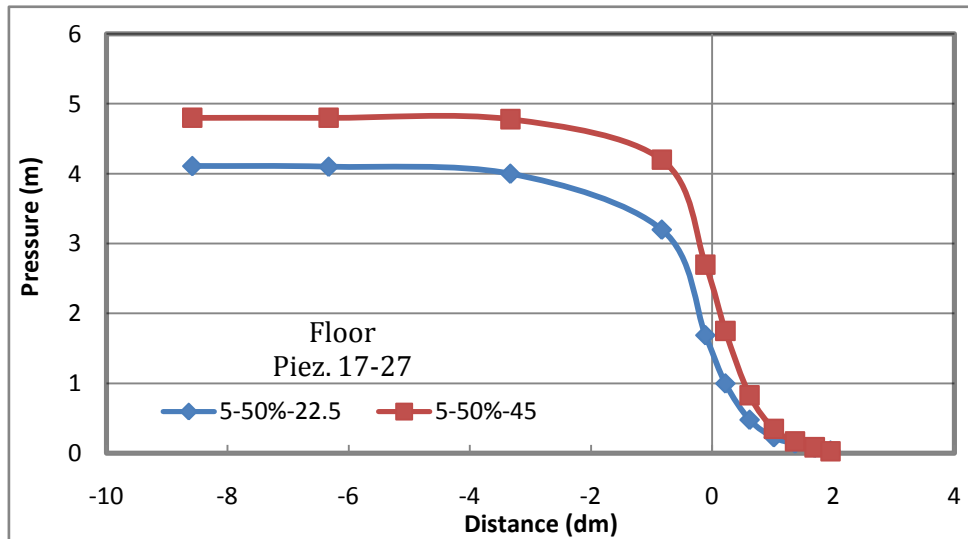
شکل (14-5) تغییرات فشار در پیزومتر 39 الی 49 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 70%



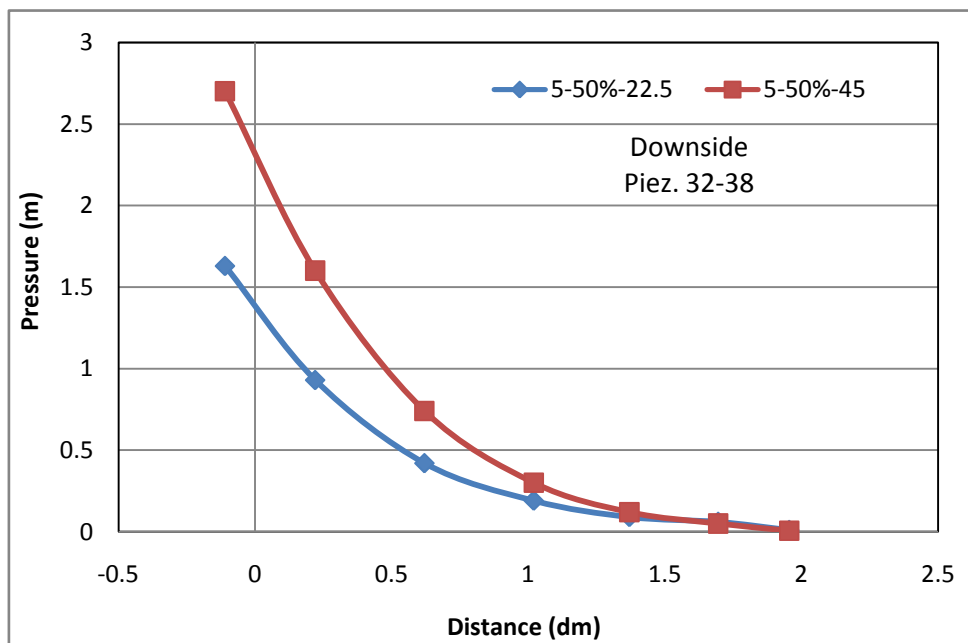
شکل (15-5) تغییرات فشار در پیزومتر 63 الی 70 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 70%

شکل‌های (16-5) الی (23-5) تغییرات فشار به ترتیب در پیزومترهای 17 الی 27 واقع در کف، پیزومترهای 32 الی 38 واقع در پائین دیواره، پیزومترهای 39 الی 49 واقع در میانه دیواره و پیزومترهای 63 الی 70 واقع در سقف مجرا را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها نتایج فشار نقاط مختلف جهت بررسی تأثیر زاویه لبه با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، با هد 5 متر و بازشدگی 50% و

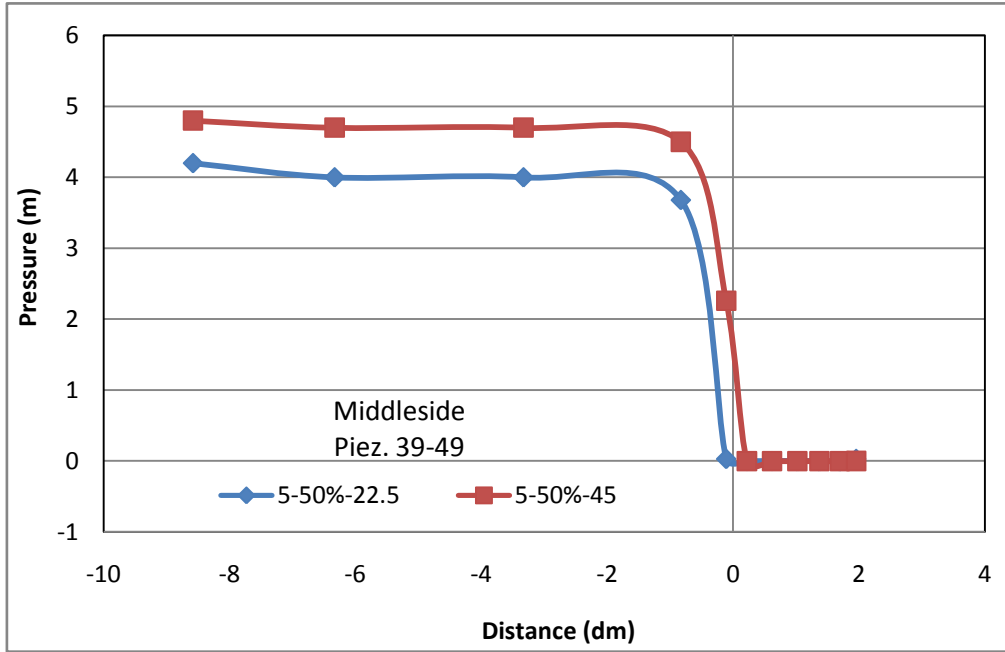
سپس 70% مورد مقایسه قرار گرفته است. در کلیه نقاط مجرا نتایج فشار با زاویه 45 تا حدود 15% الی 20% بسته به درصد بازشدگی، بزرگتر از نتایج زاویه 22/5 درجه می باشد. در محدوده پائین دست دریچه و روی دیواره که تأثیر لبه دریچه بخصوص بر شکل گیری لایه برشی مؤثرتر می باشد، این افزایش فشار تا حدود 40% الی 60% بسته به درصد بازشدگی، فراتر رفته است.



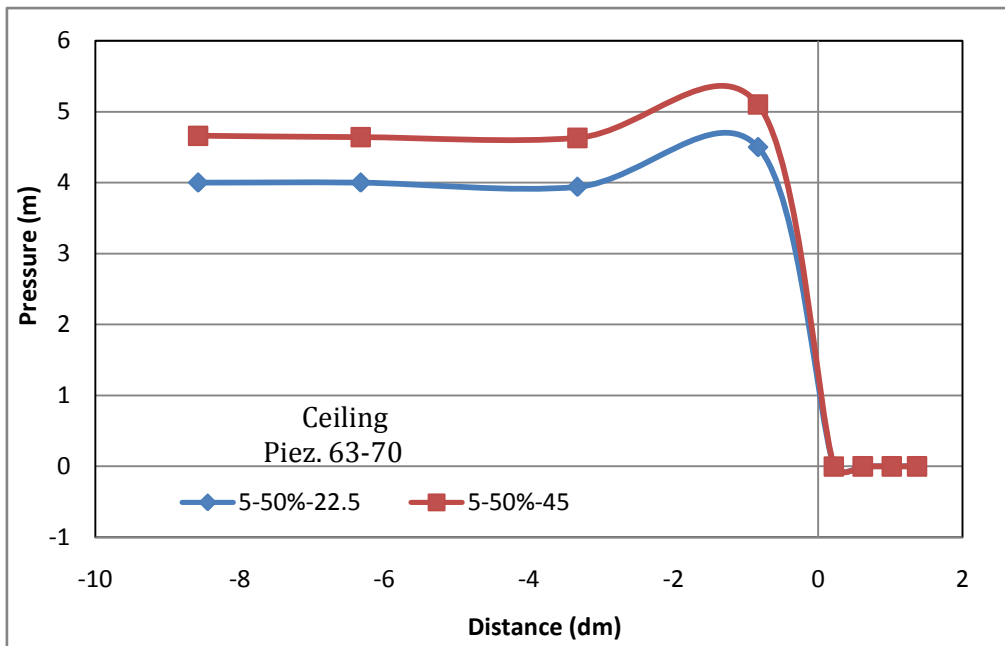
شکل (5-16) تغییرات فشار در پیزومتر 17 الی 27 با دو زاویه 22/5° و 45°، هد 5 متر و بازشدگی 50%



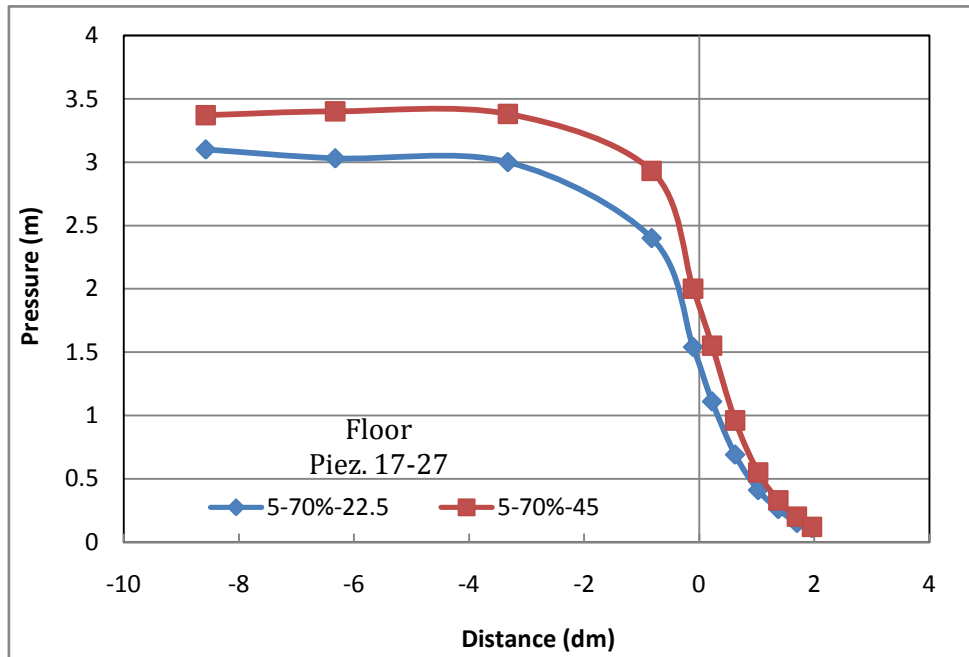
شکل (5-17) تغییرات فشار در پیزومتر 32 الی 38 با دو زاویه 22/5° و 45°، هد 5 متر و بازشدگی 50%



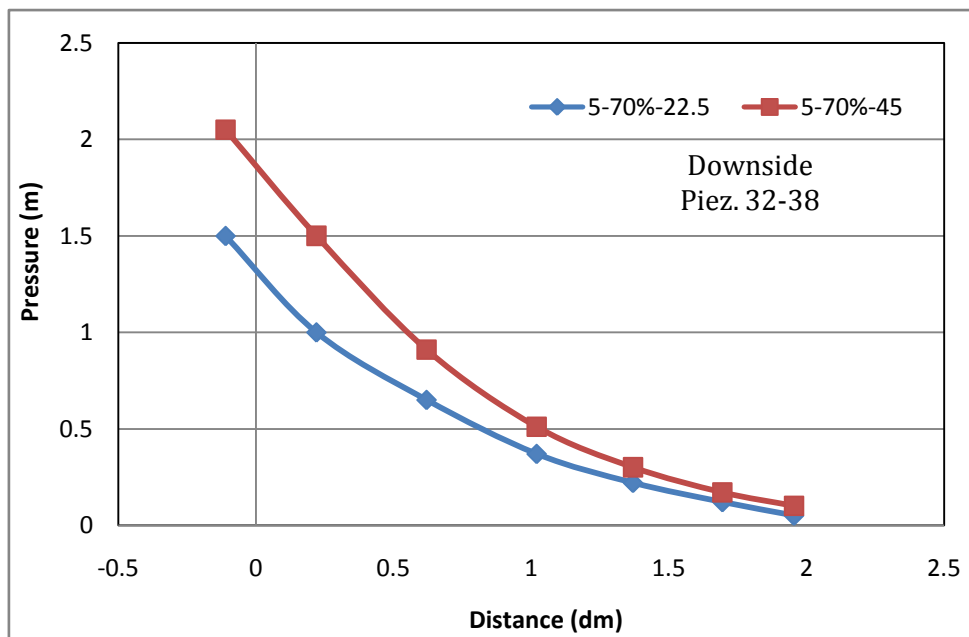
شکل (18-5) تغییرات فشار در پیزومتر 39 الی 49 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$  ، هد 5 متر و بازشدگی 50%



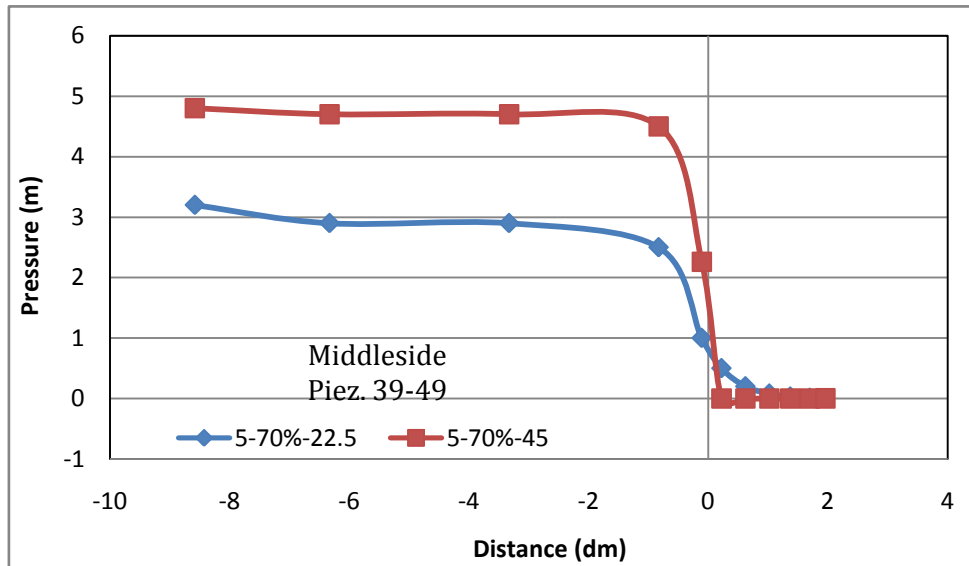
شکل (19-5) تغییرات فشار در پیزومتر 63 الی 70 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$  ، هد 5 متر و بازشدگی 50%



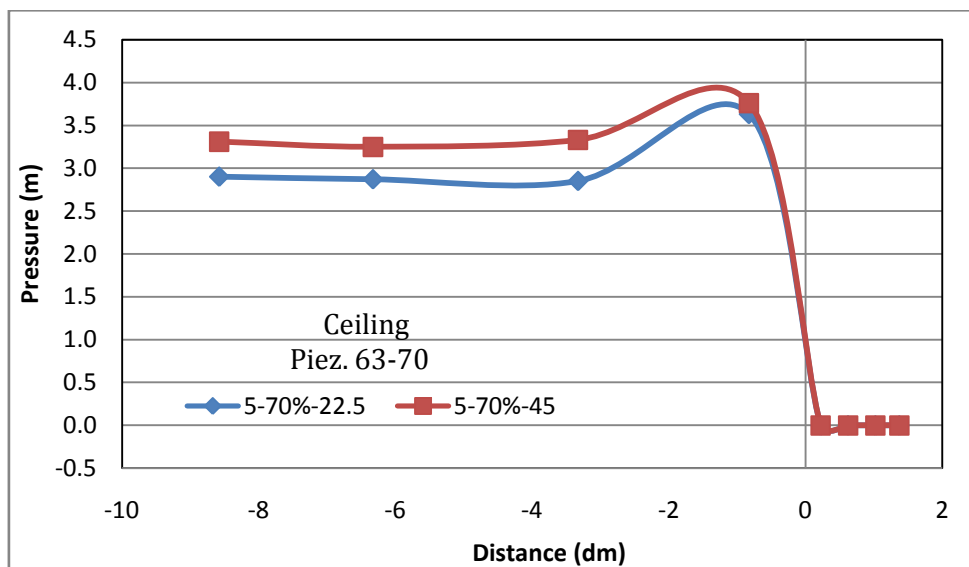
شکل (5-20) تغییرات فشار در پیزومتر 17 الی 27 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 5 متر و بازشدگی 70%



شکل (5-21) تغییرات فشار در پیزومتر 32 الی 38 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 5 متر و بازشدگی 70%



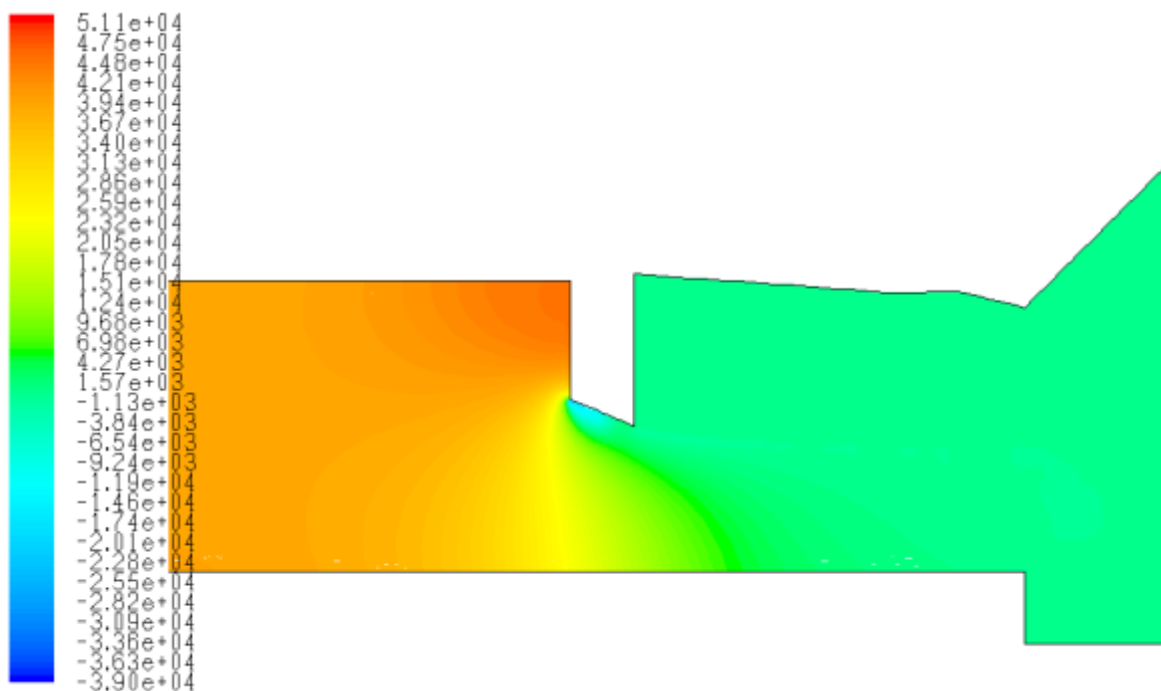
شکل (22-5) تغییرات فشار در پیزومتر 39 الی 49 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 5 متر و بازشدگی 70%



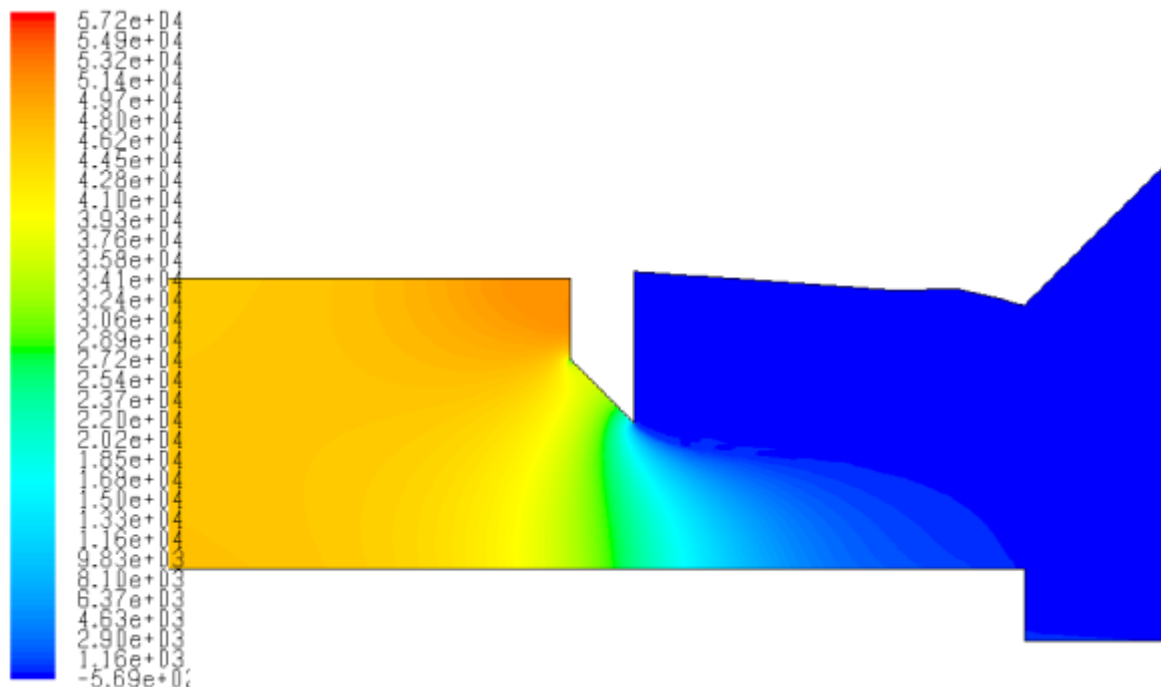
شکل (23-5) تغییرات فشار در پیزومتر 63 الی 70 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 5 متر و بازشدگی 70%

بعنوان نمونه، حالت هد 5 متر و بازشدگی 50% برای دو زاویه لبه  $22/5$  و  $45$  درجه، میدان فشار در شکل های (24-5) و (25-5) نشان داده شده است. توزیع فشار پیرامون لبه دریچه که مطمئناً بر عملکرد و میدان جریان پائین دست مؤثر خواهد بود، از نکات بسیار حائز اهمیت این دو شکل می باشد. چنانچه ملاحظه می شود مقدار فشار در زیر لبه بالادست دریچه  $22/5$  درجه دارای مقدار منفی شده است که از نقطه نظر کاویتاسیون و نیروهای وارد بر دریچه فوق العاده مهم می باشد. در شکل دوم جریان عبوری از زیر و اطراف دریچه با زاویه لبه  $45$  درجه مشاهده می شود. در این

حالت فشار منفی در اطراف دریچه دیده نمی‌شود، ولی در پایین دست دریچه فشار منفی قابل مشاهده است که گویای عملکرد بهتر این دریچه در هوادهی است.



شکل (۵-۲۴) میدان فشار در مجرا با زاویه  $22/5^\circ$  و هد 5 متر و بازشدگی 50%

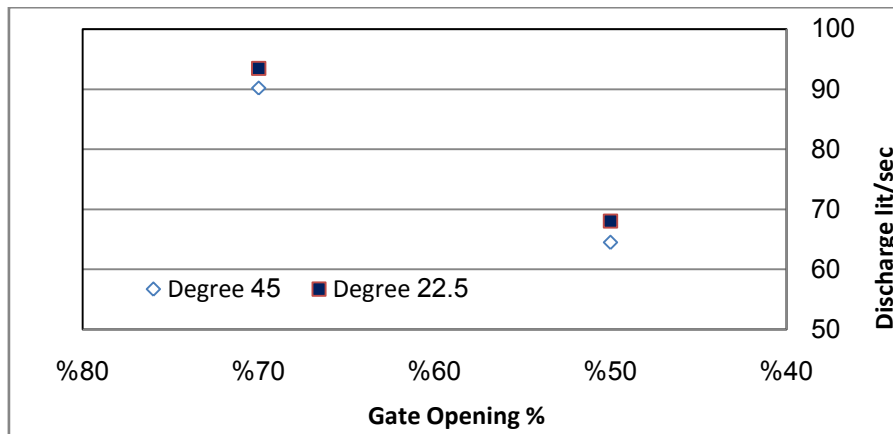


شکل (۵-۲۵) میدان فشار در مجرا با زاویه  $45^\circ$  و هد 5 متر و بازشدگی 50%



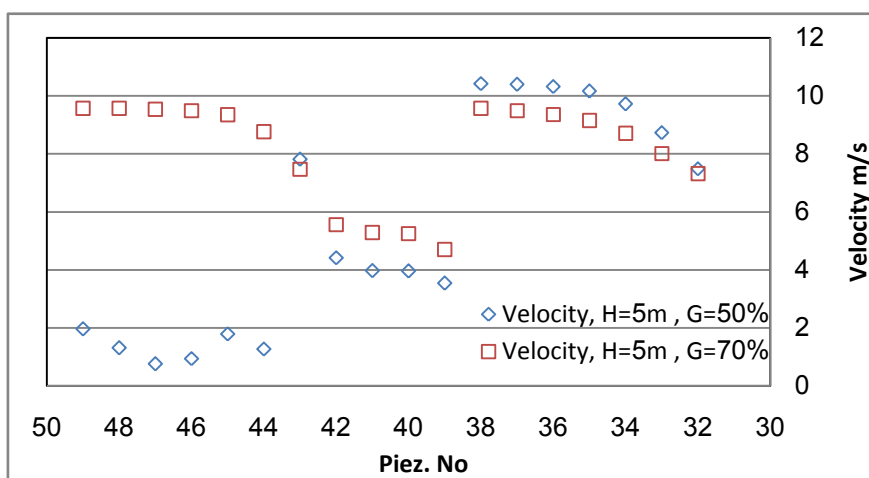
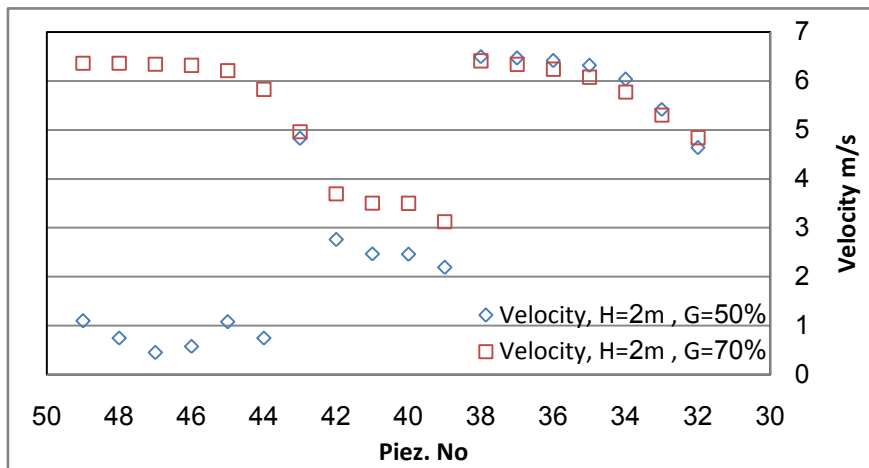
## 2-4-5 - توزیع سرعت

در این بخش به بررسی تأثیر زاویه لبه دریاچه بر میدان سرعت پائین دست دریاچه پرداخته می شود. بر همین اساس مدل عددی با دو زاویه 45 و 22/5 درجه اجرا گردید و نتایج میدان سرعت جریان به ازای هر زاویه با دو هد و دو بازشدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در هد 2 متر با تغییر زاویه، تغییر محسوس در دبی ملاحظه نگردید ولی در هد 5 متر تغییر زاویه باعث تغییر محسوس دبی عبوری از مجرا گردید. شکل (5-26) تغییرات دبی بر حسب زاویه را نشان می دهد. بر حسب نتایج بدست آمده دبی زاویه 22/5 درجه نسبت به زاویه 45 درجه بزرگتر می باشد. این افزایش در بازشدگی 50% حدود 5/6% و در بازشدگی 70% حدود 3/7% می باشد و لذا افزایش بازشدگی کاهش اثرات زاویه لبه دریاچه بر دبی را به همراه دارد که منطقی بنظر می رسد.



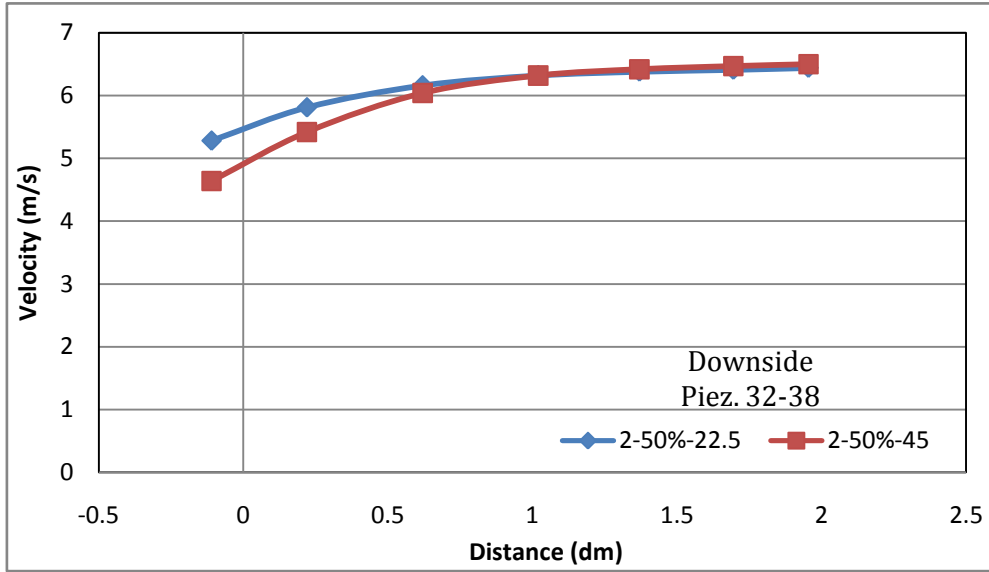
شکل (5-26) تغییرات دبی عبوری از مجرا بر حسب زاویه لبه دریاچه، هد 5 متر و بازشدگی مختلف

شکل (5-27) نتایج شبیه سازی برای میدان سرعت در دو هد 2 و 5 متر، با دو بازشدگی در زاویه لبه دریاچه 45 درجه را مقایسه نموده است. نتایج میدان سرعت در پائین دست دریاچه با لبه 45 درجه در پیژومترهای 32 الی 38 که در محدوده لایه برشی پائین دست قرار دارند، دارای مقادیر سرعت بالاتری در بازشدگی 50% نسبت به بازشدگی 70% هستند و این افزایش با افزایش هد از 2 متر به 5 متر محسوس تر گردیده است. برای سایر نقاط همانطور که مشاهده می شود، سرعتهای بازشدگی 70% نسبت به بازشدگی 50% مقادیر بزرگتری دارند.

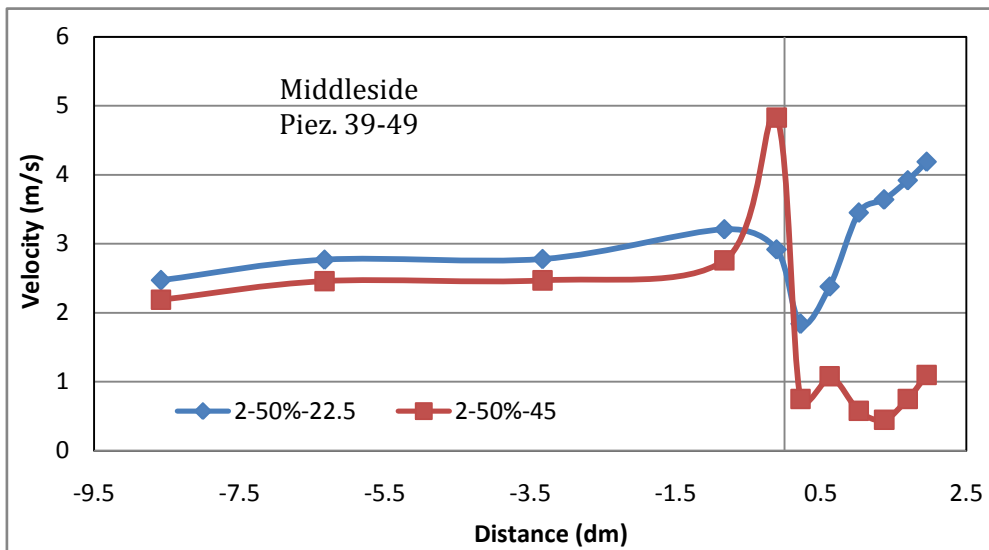


شکل (27-5) تغییرات سرعت در مجرا با زاویه  $45^\circ$  لبه دریچه، هد 2 و 5 متر و بازشدگی 50% و 70%

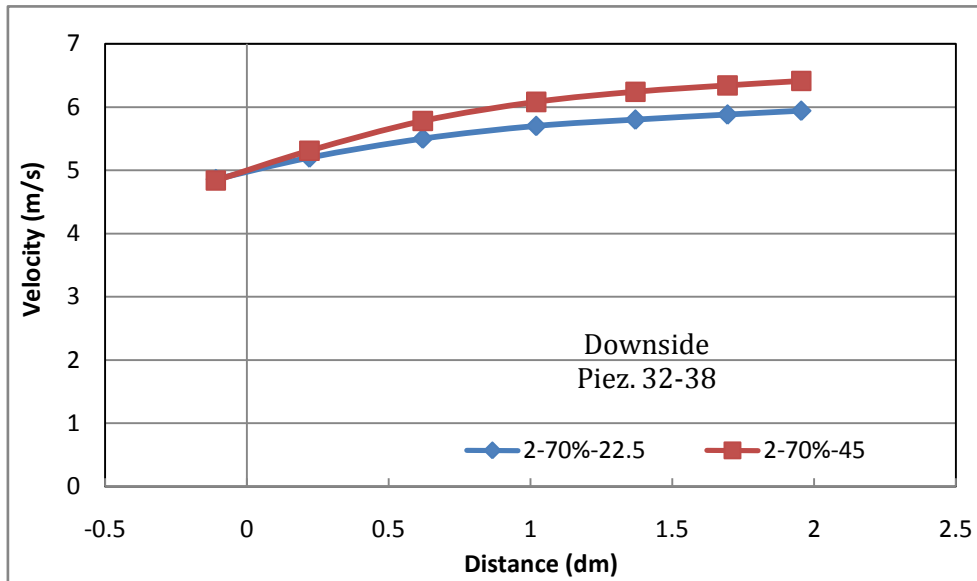
جهت ارائه نتایج دقیق و جزئی تر، مقادیر سرعت در نقاط مختلف مجرا به تفکیک در شکل های (28-5) الی (37-5) نشان داده شده اند. مطابق شکل (30-5) در پائین دست دریچه با لبه 22/5 درجه سرعت نسبتاً بزرگتر از 45 درجه است و با فاصله گرفتن از دریچه سرعت تقریباً یکسان می گردد. این اختلاف سرعت در پیزومترهای میانی در شکل (31-5) نیز قابل مشاهده است. چنین رفتاری با وضوح بهتر در شکل های (31-5) و (32-5) برای بازشدگی 70% و همچنین شکل های (34-5) و (35-5) برای بازشدگی 50% با هد 5 متر و شکل های (36-5) و (37-5) با هد 5 متر و بازشدگی 70% قابل ملاحظه است.



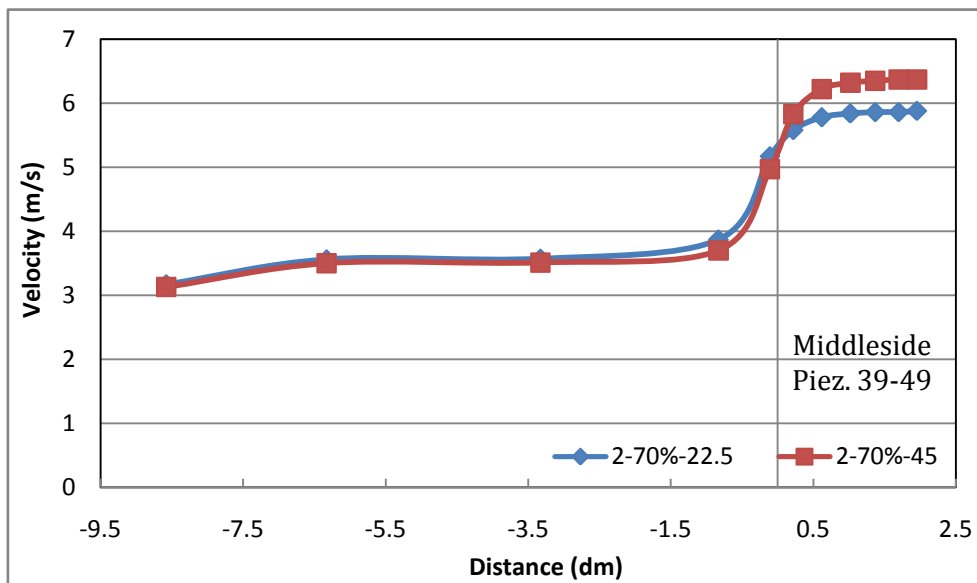
شکل (28-5) تغییرات سرعت در پیزومتر 32 الی 38 با زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 50%



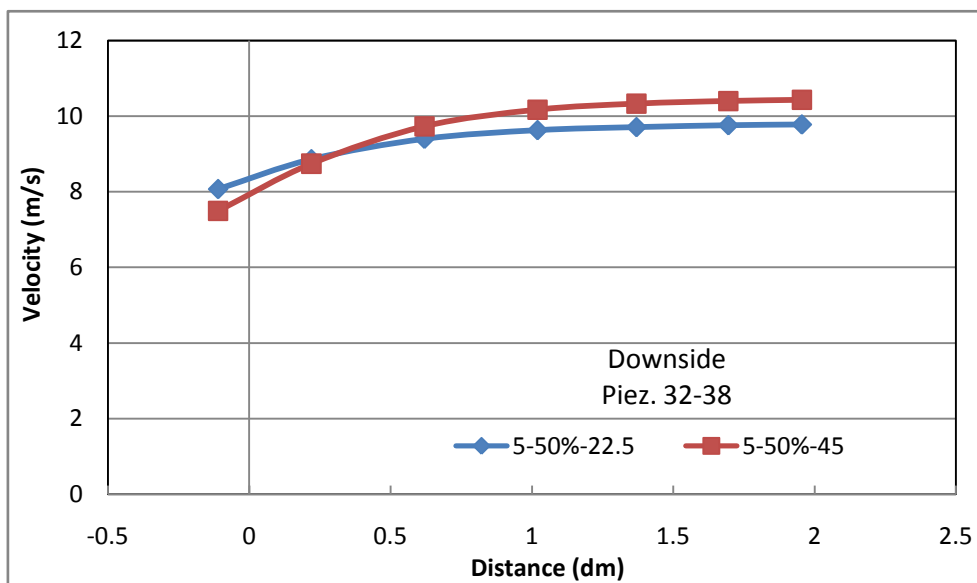
شکل (29-5) تغییرات سرعت در پیزومتر 39 الی 49 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 50%



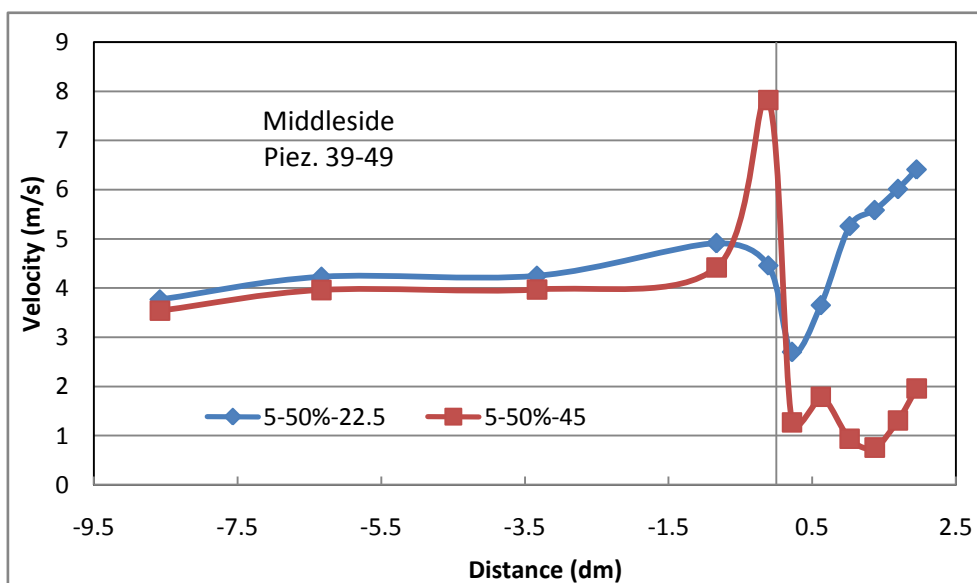
شکل (30-5) تغییرات سرعت در پیزومتر 32 الی 38 با زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 70%



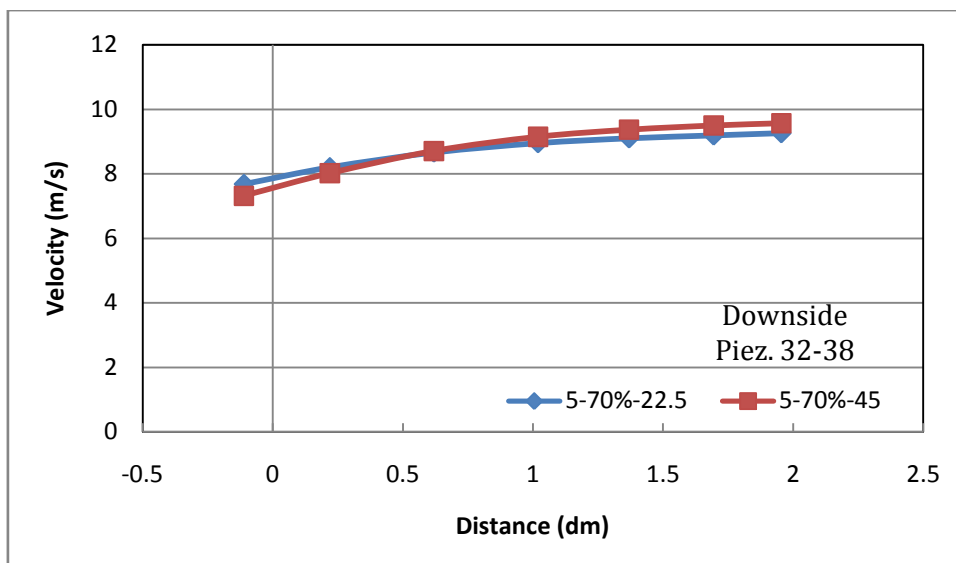
شکل (31-5) تغییرات سرعت در پیزومتر 39 الی 49 با زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 2 متر و بازشدگی 70%



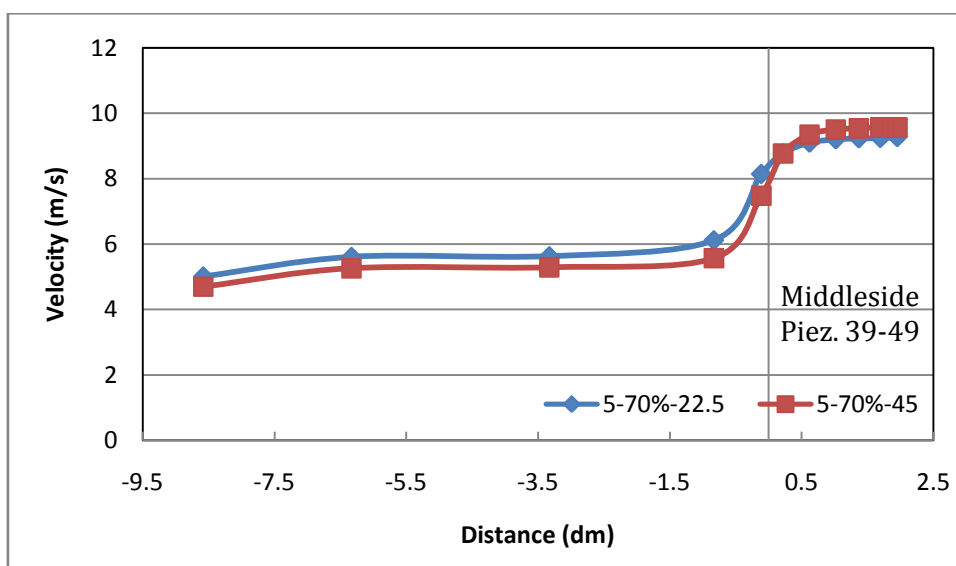
شکل (32-5) تغییرات سرعت در پیزومتر 32 الی 38 با زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 5 متر و بازشدگی 50%



شکل (33-5) تغییرات سرعت در پیزومتر 39 الی 49 با زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 5 متر و بازشدگی 50%



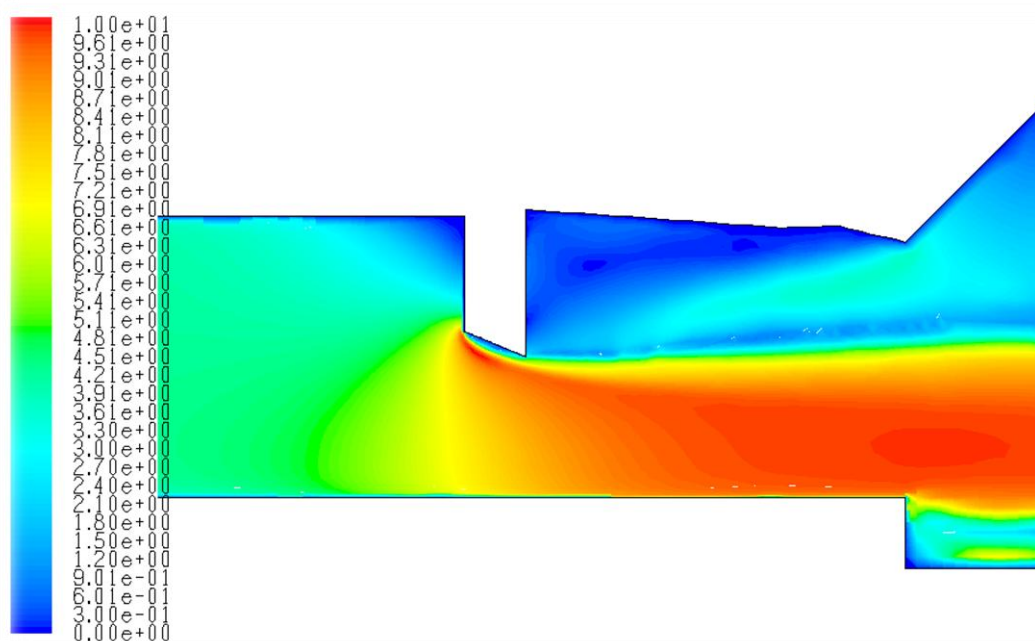
شکل (5-34) تغییرات سرعت در پیزومتر 32 الی 38 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 5 متر و بازشدگی 70%



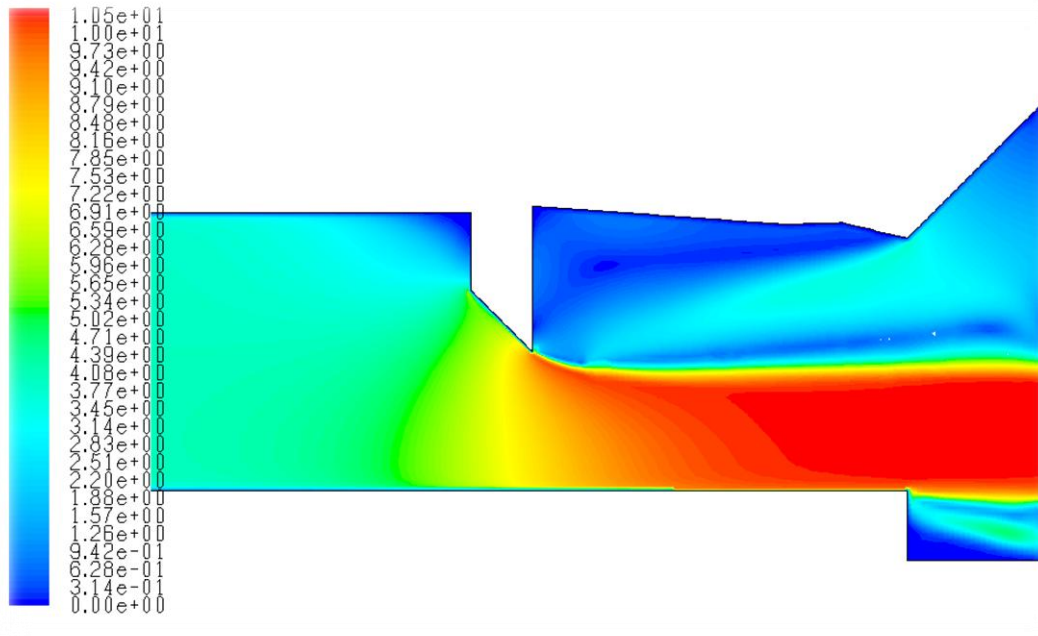
شکل (5-35) تغییرات سرعت در پیزومتر 39 الی 49 با دو زاویه  $22/5^\circ$  و  $45^\circ$ ، هد 5 متر و بازشدگی 70%

بعنوان نمونه و جهت مقایسه بهتر، حالت هد 5 متر و بازشدگی 50% برای دو زاویه لبه  $22/5$  و  $45$  درجه، میدان سرعت در شکل های (5-36) و (5-37) نشان داده شده است. توزیع سرعت پیرامون لبه دریچه که مطمئناً " بر عملکرد و میدان جریان پائین دست مؤثر خواهد بود، از نکات بسیار حائز اهمیت این دو شکل می باشد. چنانچه ملاحظه می شود جریان عبوری از زیر دریچه با زاویه لبه  $22/5$  درجه با جدائی جریان از لبه بالادست همراه گردیده است. در حالت دوم جریان

عبوری از زیر دریچه با زاویه لبه 45 درجه با جدائی جریان از لبه پائین دست همراه می باشد. این موضوع مطمئناً بر میدان فشار زیر دریچه و ارتعاش آن مؤثر می باشد. لایه برشی در حالت زاویه 22/5 درجه گسترش عمقی در پائین دست داشته ولی در حالت زاویه 45 درجه ضخامت و گسترش آن کمتر می باشد. قاعدتاً توزیع عمقی سرعت در پائین دست در حالت زاویه 22/5 درجه بیشتر از حالت زاویه 45 درجه می باشد که از جنبه هوادهی عملکرد مناسب تری را نشان می دهد. لازم به ذکر است که در مطالعات کلاسیک معمولاً لبه دریچه با زاویه 45 درجه به جهت عملکرد هیدرولیکی توصیه گردیده است که عموماً به موضوع ارتعاش دریچه و نیروی هیدرودینامیک وارد بر آن اشاره داشته و کمتر به توزیع سرعت پائین دست اهمیت داده است.



شکل (36-5) میدان سرعت در مجرا با زاویه 22/5° و هد 5 متر و بازشدگی 50%



شکل (5-37) میدان سرعت در مجرا با زاویه 45° و هد 5 متر و بازشدگی 50%

### 3-4-5- اندیس کاویتاسیون

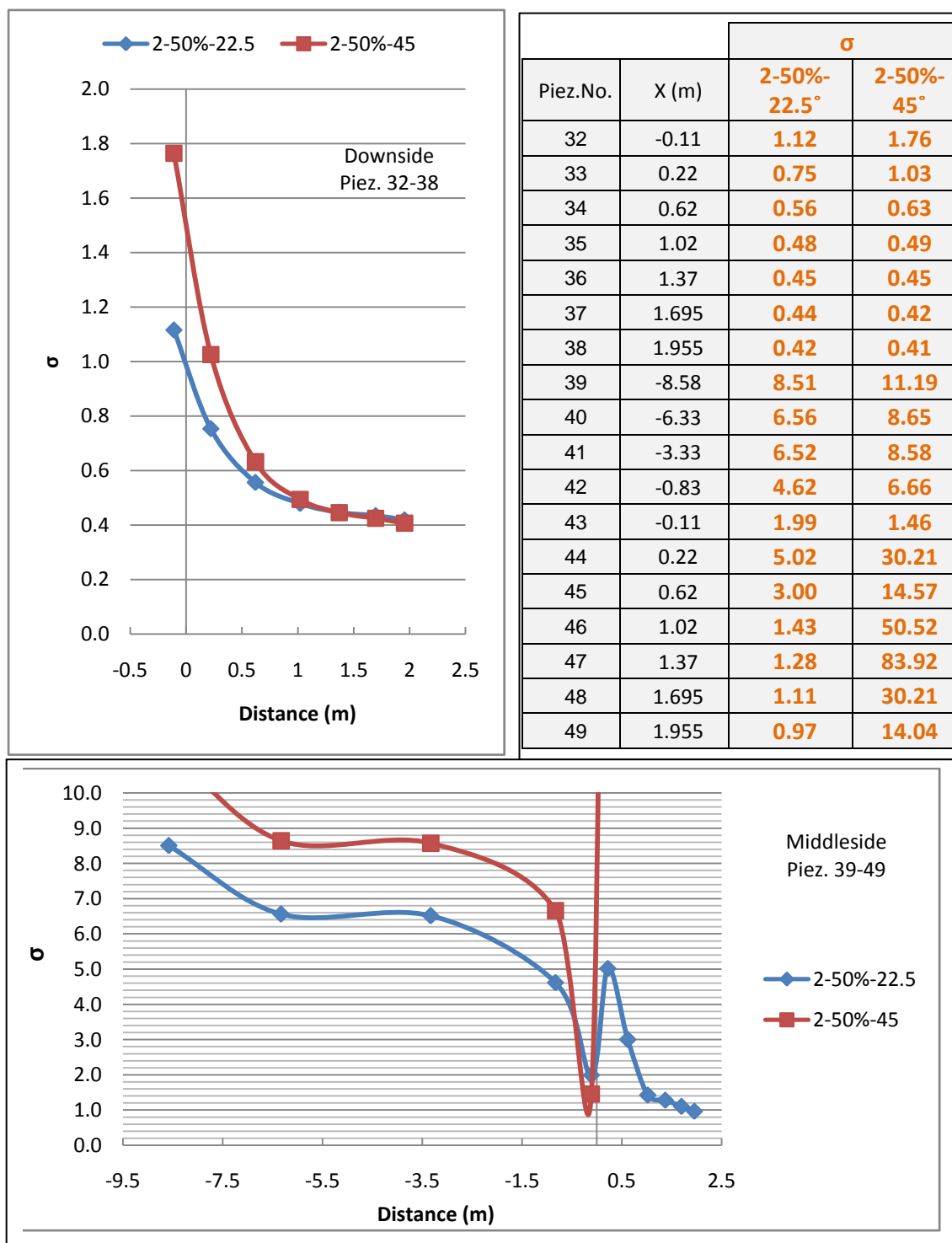
در این بخش نتایج مدل عددی اندیس کاویتاسیون ارائه می شود. با توجه به ارزیابی های انجام گرفته در ارتباط با میدان فشار و سرعت، مقادیر اندیس کاویتاسیون بر اساس رابطه زیر امکان پذیر می باشد.

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{u^2}{2g}} \quad \text{رابطه ( 5-5)}$$

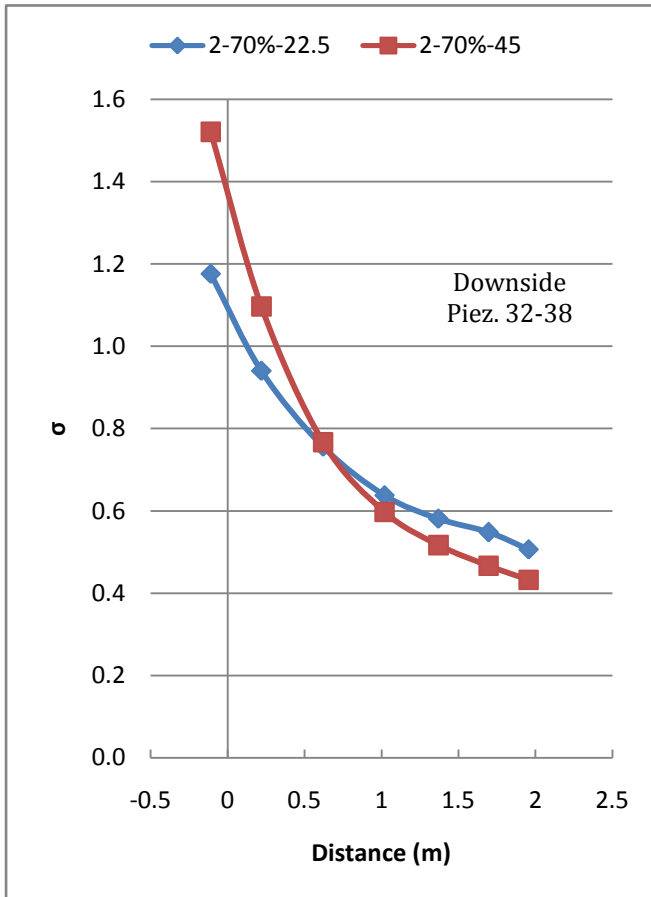
در این رابطه  $p$  معرف فشار موضعی و  $u$  سرعت متوسط موضعی جریان می باشند و  $p_v$  نیز فشار بخار است. شکل های (5-38) الی (5-41) تغییرات اندیس کاویتاسیون برای هر دو زاویه لبه 22/5 و 45 درجه، به ترتیب برای هد 2 متر و بازشدگی 50% و 70% و هد 5 متر و بازشدگی 50% و 70% را نشان می دهند. همانگونه که انتظار می رود به دلیل بزرگتر بودن مقادیر سرعت در لبه های با زاویه 22/5 درجه، مقادیر اندیس این لبه ها کوچکتر می باشد. تنها در حالت 45 درجه با هد 5 متر و بازشدگی 50% به دلیل سرعت جریان بالاتر اندیس این حالت از حالت مشابه با زاویه 22/5 درجه بزرگتر می باشد.



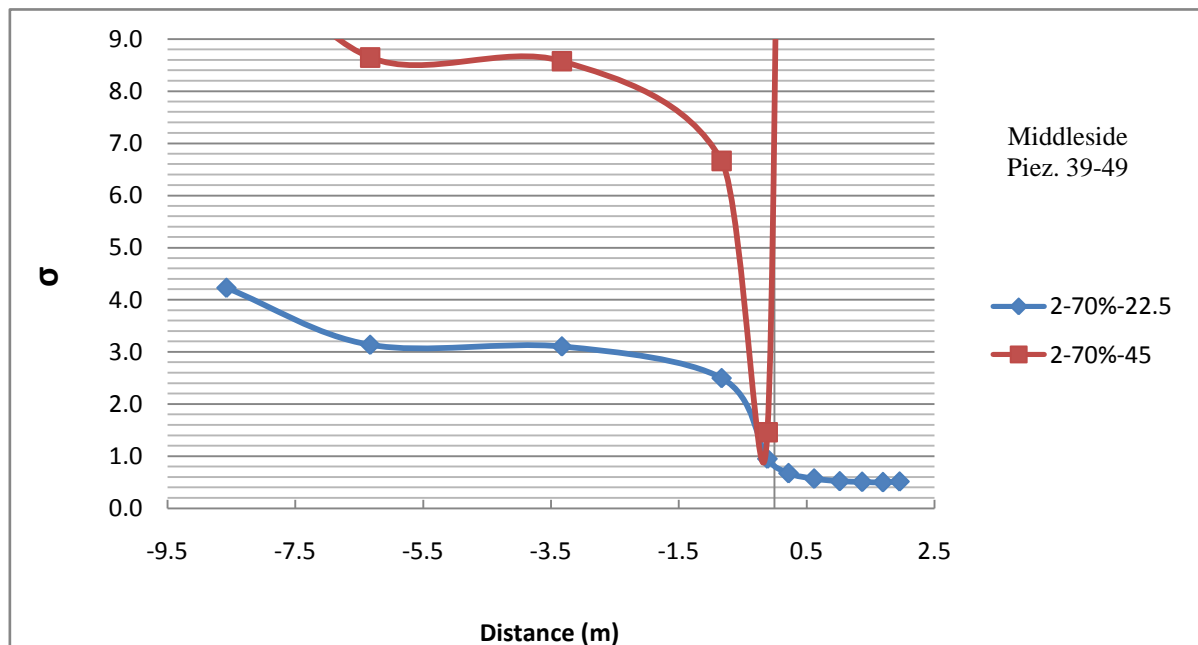
یادآوری می شود که اندیس کاویتاسیون مربوط به پروتوتایپ است. از این رو مقادیر محور افقی بر حسب متر مقیاس بندی شده اند.



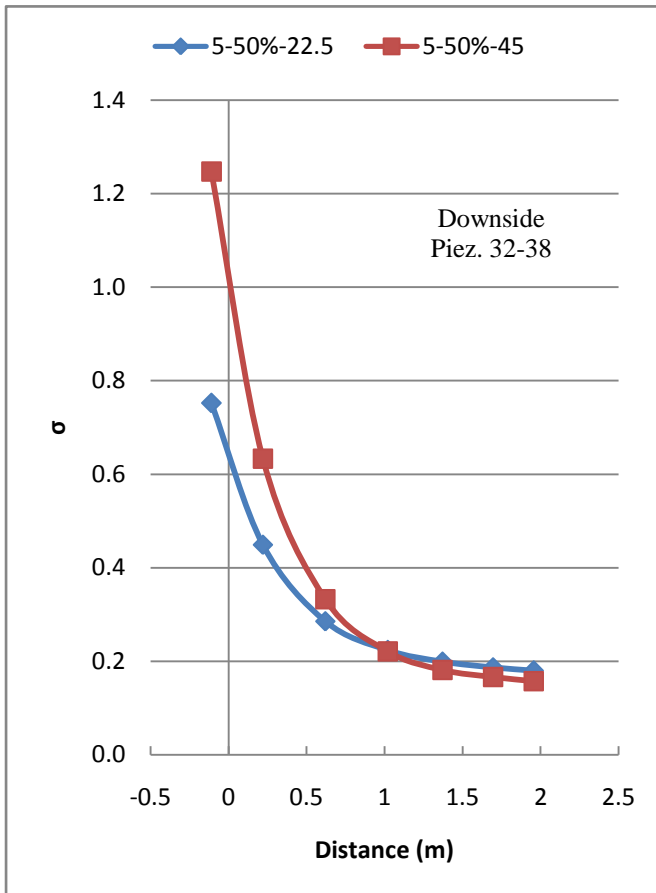
شکل (5-38) تغییرات اندیس کاویتاسیون در مناطق مختلف مجرا در هد 2 متر و بازشدگی 50%



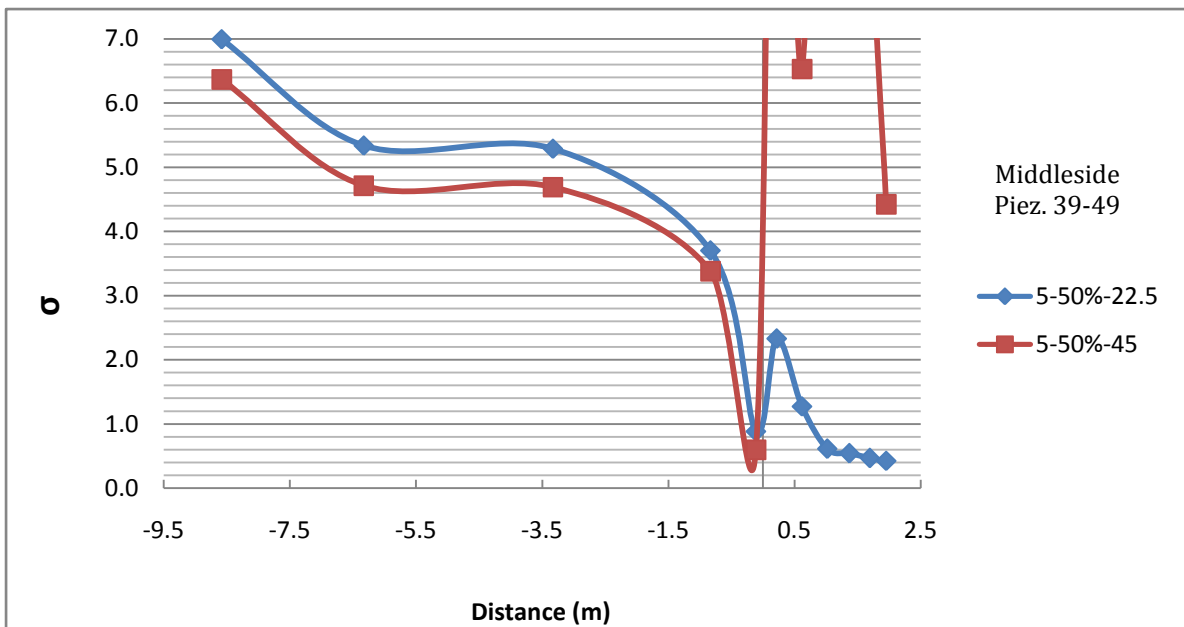
Piez.No.	X (m)	$\sigma$	
		2-70%-22.5	2-70%-45
32	-0.11	1.18	1.52
33	0.22	0.94	1.10
34	0.62	0.76	0.77
35	1.02	0.64	0.60
36	1.37	0.58	0.52
37	1.695	0.55	0.47
38	1.955	0.51	0.43
39	-8.58	4.23	4.94
40	-6.33	3.14	3.74
41	-3.33	3.10	3.72
42	-0.83	2.50	3.23
43	-0.11	0.95	1.35
44	0.22	0.67	0.70
45	0.62	0.57	0.50
46	1.02	0.53	0.44
47	1.37	0.51	0.43
48	1.695	0.51	0.42
49	1.955	0.52	0.42



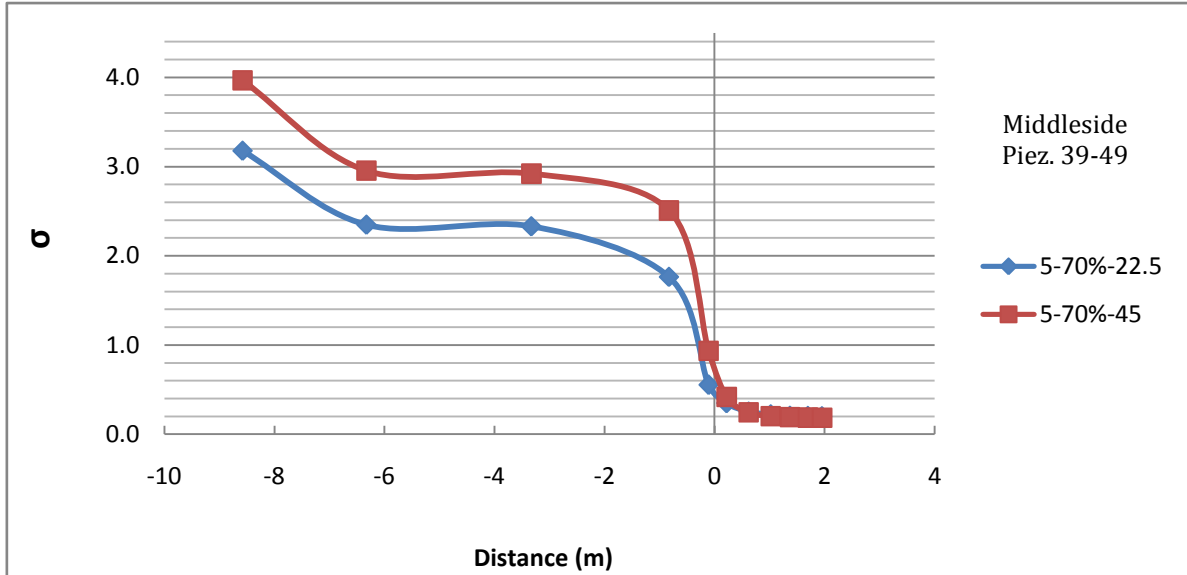
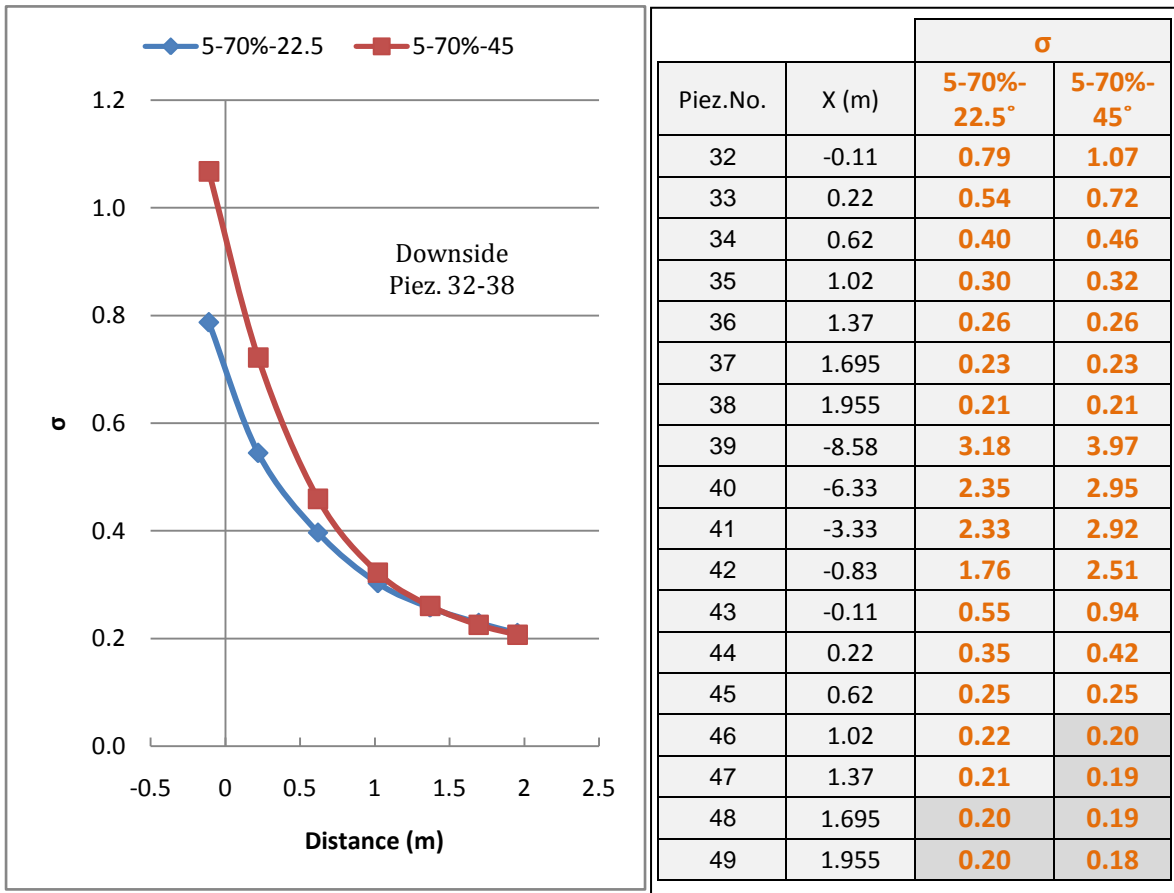
شکل (5-39) تغییرات اندیس کاویتاسیون در مناطق مختلف مجرا در هد 2 متر و بازشدگی 70%



Piez.No.	X (m)	$\sigma$	
		5-50%-22.5	5-50%-45
32	-0.11	0.75	1.25
33	0.22	0.45	0.63
34	0.62	0.29	0.33
35	1.02	0.22	0.22
36	1.37	0.20	0.18
37	1.695	0.19	0.17
38	1.955	0.18	0.16
39	-8.58	6.99	8.87
40	-6.33	5.34	6.97
41	-3.33	5.29	6.93
42	-0.83	3.70	5.39
43	-0.11	0.88	1.00
44	0.22	2.33	10.51
45	0.62	1.27	5.29
46	1.02	0.61	19.19
47	1.37	0.54	29.35
48	1.695	0.47	9.88
49	1.955	0.43	4.42



شکل (40-5) تغییرات اندیس کاویتاسیون در مناطق مختلف مجرا در هد 5 متر و بازشدگی 50%



شکل (5-41) تغییرات اندیس کاپیتاسیون در مناطق مختلف مجرا در هد 5 متر و بازشدگی 70%

#### 4-4-5- پروفیل جریان، اعداد رینولدز و فرود

مقادیر پروفیل جریان، اعداد رینولدز و فرود در پایین دست دریچه و نسبت به فاصله از لبه پایین دست دریچه محاسبه شده اند. جدول (10-5) و شکل های (42-5) الی (45-5) نتایج محاسبات پروفیل سطح آب و شکل های (46-5) و (47-5) تغییرات عدد فرود و عدد رینولدز را نشان می دهد.

جدول (10-5) تغییرات طولی عدد فرود و رینولدز و عمق آب

2-50%-22.5°				
x(cm)	y(cm)	v(m/s)	Re(y)	Fr
0.25	7.5014	4.155	311691	4.84
0.65	7.3137	4.733	346165	5.59
1.05	7.0937	5.166	366468	6.19
1.4	7.0339	5.32	374198	6.4
1.725	7.0496	5.459	384824	6.56
1.985	6.7585	5.719	386501	7.02

2-50%-45°				
x(cm)	y(cm)	v(m/s)	Re(y)	Fr
0.25	6.9639	5.753	400662	6.96
0.65	6.2711	6.234	390921	7.95
1.05	5.9762	6.354	379737	8.3
1.4	5.9718	6.352	379340	8.3
1.725	5.9707	6.372	380476	8.33
1.985	5.9541	6.399	381012	8.37

2-70%-22.5°				
x(cm)	y(cm)	v(m/s)	Re(y)	Fr
0.25	10.5632	4.263	450349	4.19
0.65	10.1696	4.771	485154	4.78
1.05	9.8858	5.034	497603	5.11
1.4	9.948	4.913	488739	4.97
1.725	9.8071	5.09	499208	5.19
1.985	9.7663	5.159	503869	5.27

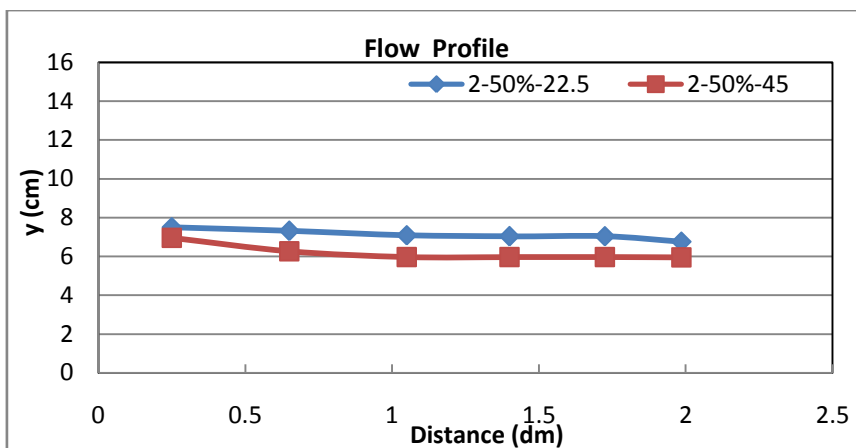
2-70%-45°				
x(cm)	y(cm)	v(m/s)	Re(y)	Fr
0.25	10.1335	5.578	565219	5.59
0.65	9.3825	6.027	565482	6.28
1.05	9.0412	6.131	554330	6.51
1.4	8.8709	6.231	552736	6.68
1.725	8.739	6.269	547872	6.77
1.985	8.7948	6.277	552061	6.76

5-50%-22.5°				
x(cm)	y(cm)	v(m/s)	Re(y)	Fr
0.25	7.5014	6.414	481150	7.48
0.65	7.3137	7.231	528871	8.54
1.05	7.0937	7.887	559508	9.46
1.4	7.0339	8.129	571784	9.79
1.725	7.0496	8.348	588501	10.04
1.985	6.7585	8.756	591766	10.75

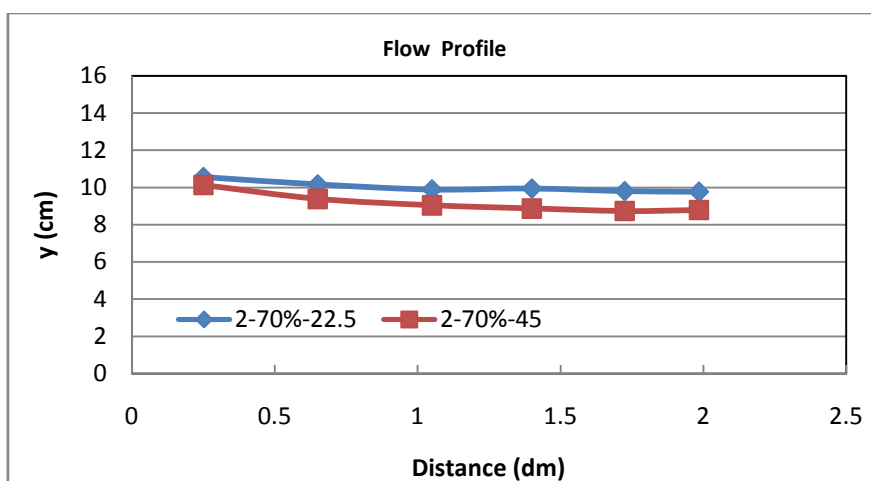
5-50%-45°				
x(cm)	y(cm)	v(m/s)	Re(y)	Fr
0.25	6.9639	9.312	648488	11.27
0.65	6.2711	10.08	632158	12.85
1.05	6.2782	9.81	615918	12.5
1.4	5.9718	10.278	613811	13.43
1.725	5.9707	10.315	615908	13.48
1.985	5.9541	10.355	616559	13.55

5-70%-22.5°				
x(cm)	y(cm)	v(m/s)	Re(y)	Fr
0.25	10.5632	6.921	731126	6.8
0.65	10.1696	7.564	769238	7.57
1.05	9.8858	7.981	788993	8.1
1.4	9.948	7.759	771934	7.85
1.725	9.8071	8.073	791767	8.23
1.985	9.7663	8.192	800124	8.37

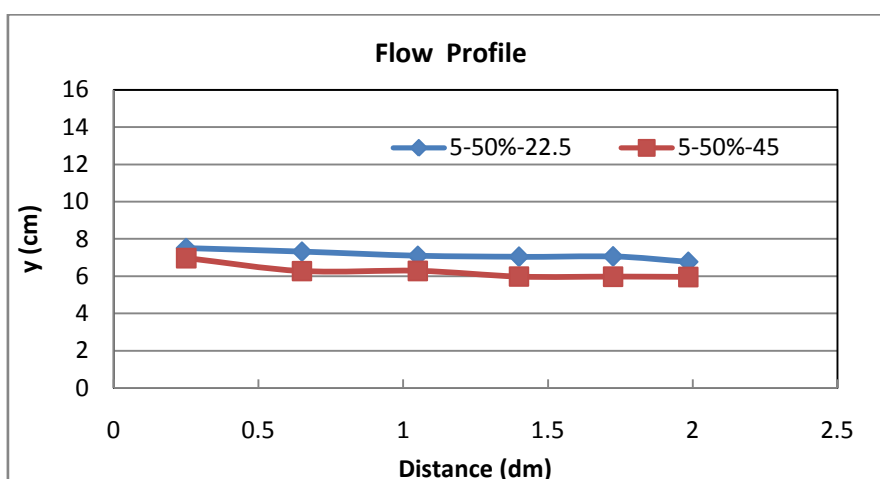
5-70%-45°				
x(cm)	y(cm)	v(m/s)	Re(y)	Fr
0.25	10.1335	8.3171	842817	8.34
0.65	9.3825	9.019	846226	9.4
1.05	9.0412	9.172	829263	9.74
1.4	8.8709	9.335	828137	10.01
1.725	8.739	9.396	821175	10.15
1.985	8.7948	9.405	827224	10.13



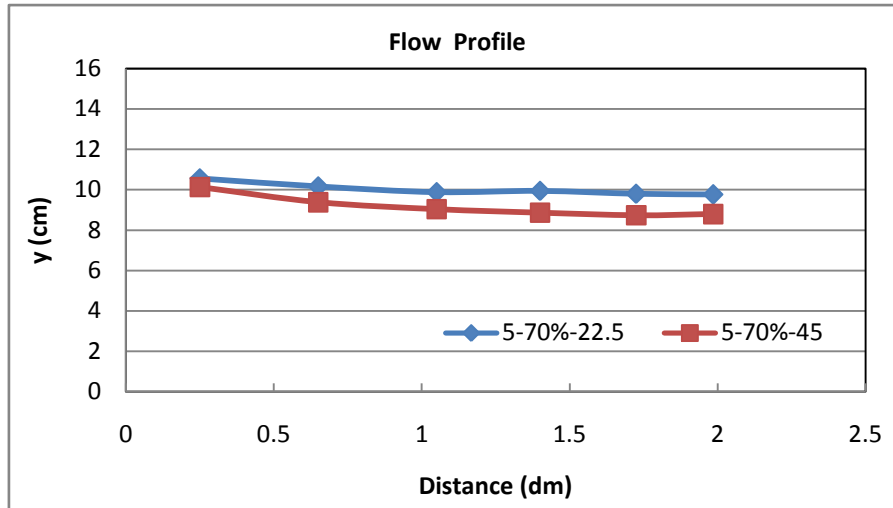
شکل (42-5) تغییرات طولی پروفیل سطح آب در بازشدگی 50% و عمق 2 متر



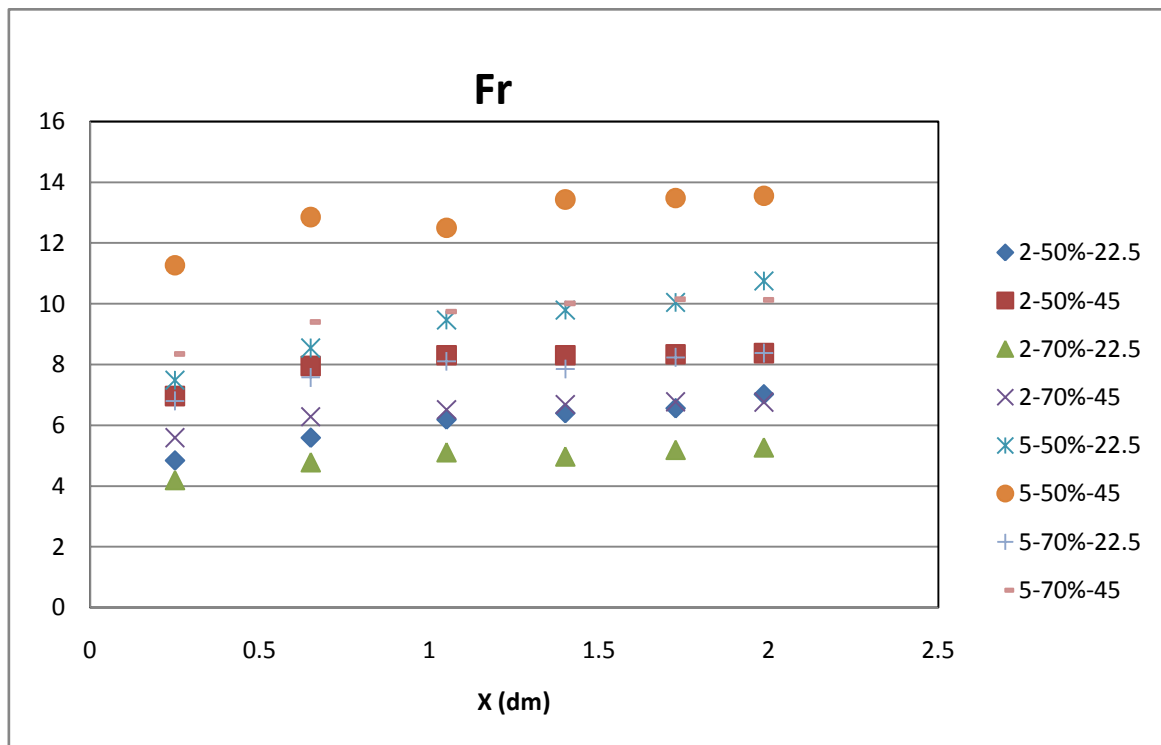
شکل (43-5) تغییرات طولی پروفیل سطح آب در بازشدگی 70% و عمق 2 متر



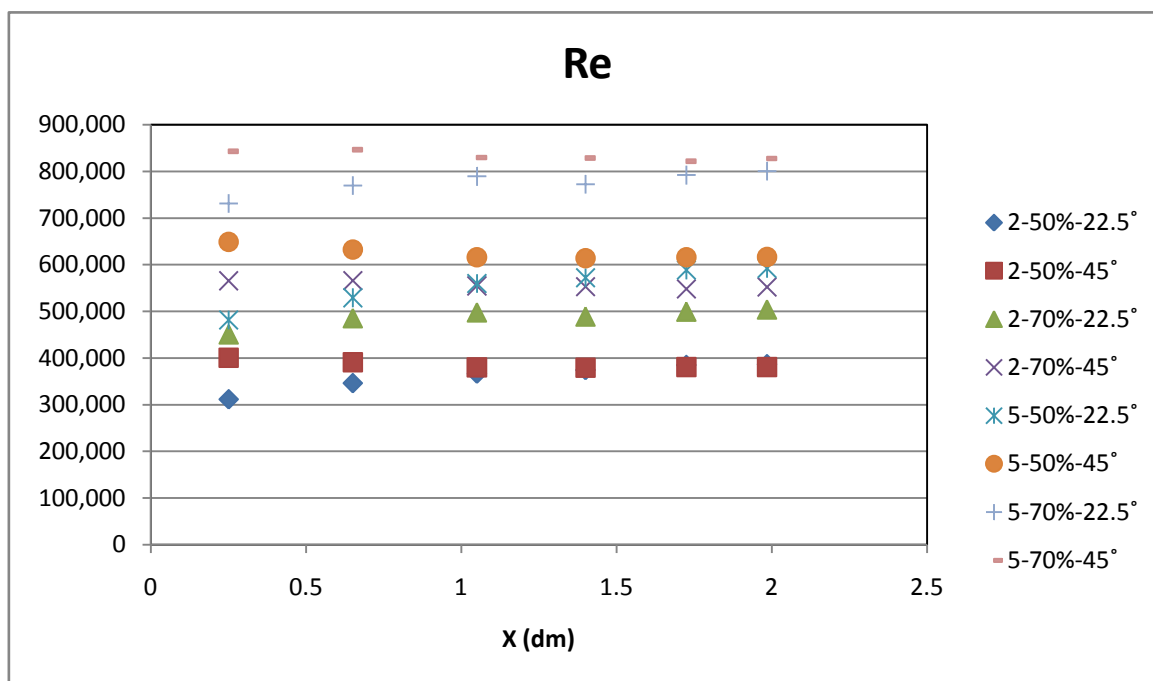
شکل (44-5) تغییرات طولی پروفیل سطح آب در بازشدگی 50% و عمق 5 متر



شکل (45-5) تغییرات طولی پروفیل سطح آب در بازشدگی 70% و عمق 5 متر



شکل (46-5) تغییرات طولی عدد فرود جریان در بازشدگی و هدهای مختلف



شکل (47-5) تغییرات طولی عدد رینولدز جریان در بازشدگی و هدهای مختلف

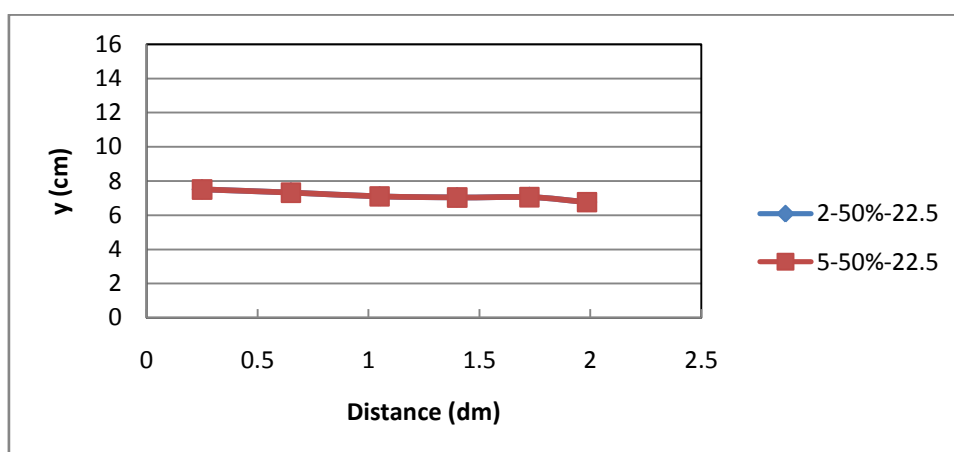
عدد رینولدز بر حسب عمق و از رابطه  $Re = \frac{v \cdot y}{\nu}$  بدست می آید. با توجه به جداول و نمودارها، محدوده تغییرات عدد فرود در شکل (46-5) بین 4 الی 14 و محدوده عدد رینولدز در شکل (47-5) بین  $3 \times 10^5$  تا  $9 \times 10^5$  را در بر می گیرد. در کلیه حالات فوق ملاحظه می گردد که پروفیل سطح آب آهنگ نزولی داشته و به آرامی به حالت حدی نزدیک می گردد که قاعدتاً منطبق بر فیزیک جریان و رسیدن جریان به مقطع تنگ شدگی می باشد. مقایسه نتایج همچنین نشان از عمق کوچکتر جریان در خروج از دریچه با لبه 45 درجه نسبت به زاویه 22/5 درجه دارد. این تأثیر منطقی که با نتایج تحقیقات قبل نیز همخوانی دارد بر مقادیر عدد فرود و رینولدز جریان فوق نیز مؤثر می باشد. با توجه به فشردگی بیشتر جریان در دریچه با زاویه لبه 45 درجه، سرعت جریان افزایش یافته و در نتیجه عدد فرود و عدد رینولدز جریان نیز در مقایسه با لبه با زاویه 22/5 درجه افزایش می یابد. قاعدتاً افزایش عدد رینولدز جریان منجر به توربولانس و آشفتگی بیشتر جریان فوق در پائین دست دریچه با زاویه لبه 45 درجه شده که تبعات معمول آن هوادهی و اختلاط بیشتر آب و هوا در شرایط فوق است که از نقطه نظر کاویتاسیون مثبت تلقی می گردد. ملاحظه شکل (46-5) و (47-5) همچنین نشان می دهد که با افزایش فاصله مقادیر عدد رینولدز و عدد فرود در هر حالت به مقداری حدی نزدیک می شوند که می تواند معرف محدوده مقطع تنگ شدگی بعد از دریچه باشد.



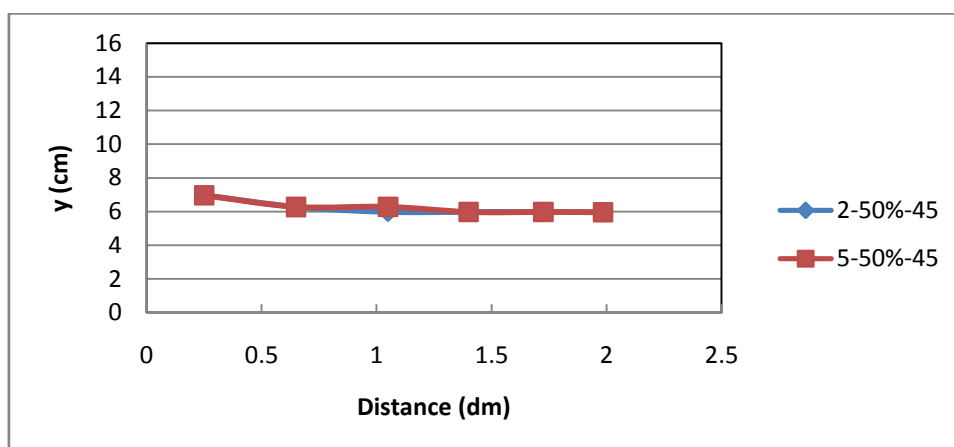
مشاهده نمودارهای پروفیل سطح آب همچنین نشان می دهد که این پروفیل از شکل لبه دریچه تبعیت می کند. با تغییر زاویه لبه از 22/5 به 45 درجه، پروفیل جریان عمق کمتری پیدا نموده یا بعبارت دیگر مترکم تر شده که خود نشان دهنده کاهش مقدار آبگذری تحت این زاویه می باشد. افزایش فشار بالادست تحت زاویه 45 درجه نیز از دیگر نتایج این تغییر زاویه از 22/5 درجه به 45 درجه است.

#### 5-4-5- مقایسه پروفیل جریان با توجه به هد آب:

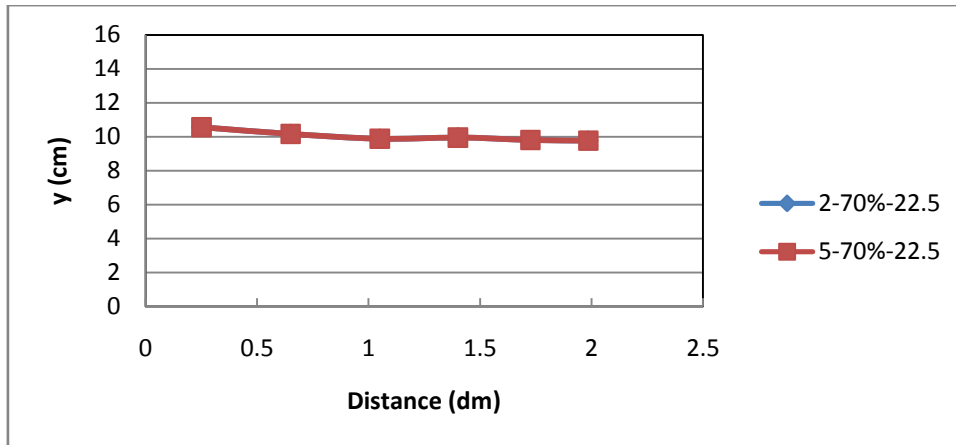
با مشاهده شکل‌های (5-48) الی (5-51) دیده می شود که پروفیل سطح آب از شکل لبه دریچه تبعیت می کند و به مقدار هد آب بستگی ندارد. با تبدیل زاویه لبه از 22/5 به 45 درجه، پروفیل جریان عمق کمتری پیدا نموده یا بعبارت دیگر مترکم تر شده که خود نشان دهنده کاهش مقدار آبگذری تحت این زاویه می باشد. افزایش مقادیر فشار تحت زاویه 45 درجه نیز از دیگر نتایج این تبدیل است.



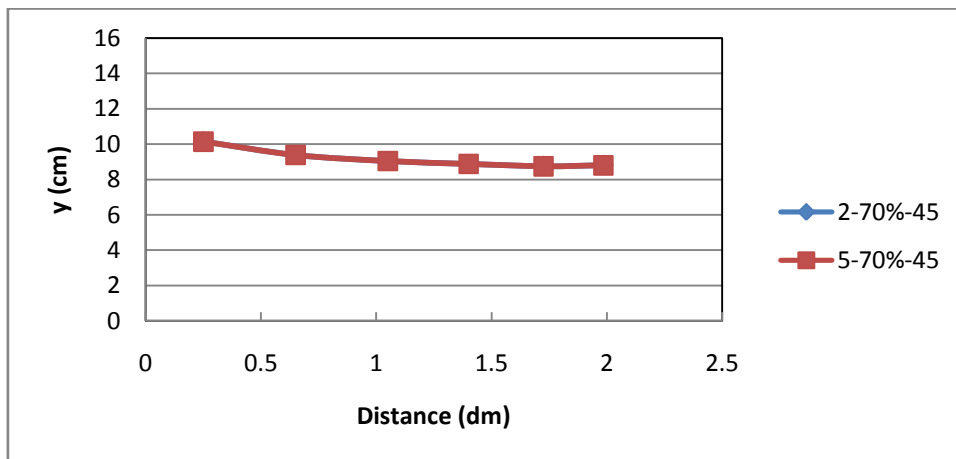
شکل (5-48) تغییرات پروفیل جریان در بازشدگی 50% و زاویه دریچه 22/5°



شکل (5-49) تغییرات پروفیل جریان در بازشدگی 50% و زاویه دریچه 45°



شکل (50-5) تغییرات پروفیل جریان در بازشدگی 70% و زاویه دریچه  $22/5^\circ$



شکل (51-5) تغییرات پروفیل جریان در بازشدگی 70% و زاویه دریچه  $45^\circ$

#### 5-4-6- ضریب انقباض<sup>۲</sup>

با توجه به مقادیر پروفیل جریان در پایین دست دریچه نتایج زیر حاصل می شود:

$$y_c = C_c \cdot W$$

میدانیم که:

$y_c$ : عمق انقباض یافته جریان بعد از دریچه

$C_c$ : ضریب انقباض

$W$ : مقدار عمق آب دقیقاً در زیر دریچه

جدول (5-11): مقادیر طول و عرض پروفیل سطح آب و محاسبه ضریب انقباض

H - Opening	2,5m -50%	2,5m -70%
-------------	-----------	-----------

<sup>25</sup> Contraction Coefficient

Angle (Degree)	22.5	45	22.5	45
y (cm)	7.0339	5.9718	9.8858	8.739
X (cm)	1.4	1.4	1.05	1.725
$C_c$	<b>0.86042</b>	<b>0.7305</b>	<b>0.86377</b>	<b>0.76356</b>
W(cm)	8.175		11.445	

همانطور که دیده می شود ضریب انقباض برای زاویه لبه 22/5 درجه بیشتر از زاویه 45 درجه می باشد. ولی با توجه به  $x$  ها مشاهده می شود که محل وقوع انقباض برای زاویه 22/5 درجه نزدیکتر به دریچه است.

#### 7-4-5- بررسی نیروهای وارد بر دریچه

با استفاده از نمودار توزیع فشار زیر دریچه می توان نیروی پایین کشنده خالص وارد بر دریچه را بدست آورد. این نیرو متناسب با افزایش هد و سرعت عبوری از زیر دریچه افزایش پیدا می کند. این نیرو باید با اعمال ضریب اطمینان مناسب جهت تعیین نیروی لازم برای بالا بردن دریچه استفاده شود زیرا که روی ارتعاش دریچه و تأسیسات وابسته نظیر جکهای بالابرنده بسیار مؤثر می باشد. [31]

جهت محاسبه نیروی قائم وارد بر لبه دریچه، لبه دریچه را به پنج قسمت مساوی تقسیم نموده و در هر قسمت مقدار فشار هیدروستاتیک متناظر قرائت گردید. سپس با ضرب مقادیر فشارها در سطوح وارده، مقادیر نیروی وارد بر هر قسمت دریچه محاسبه شد. همانطور که از شکل (5-52) دیده می شود مقادیر فشار زیر دریچه با زاویه لبه 22/5 درجه، از لبه بالادست آن تا حدود 80% زیر دریچه، مقادیر منفی است. ولی برای زاویه 45 درجه فشار از ابتدا تا انتها مثبت است. ولی برخلاف 22/5 درجه که منحنی فشار صعودی است، برای 45 درجه فشار سیر نزولی طی کرده است.

جدول (5-12): مقادیر فشار و نیروی ناشی از آن در زیر دریچه با هد 5 متر و بازشدگی 50% و 70%

5-50%-22.5°		
x (cm)	P (m)	F (N)
0	-2.603	-142.562
0.7	-1.470	-87.799
1.4	-1.039	-51.384
2.1	-0.430	-6.945
2.8	0.231	10.466
3.5	0.068	0.0
		-278.224

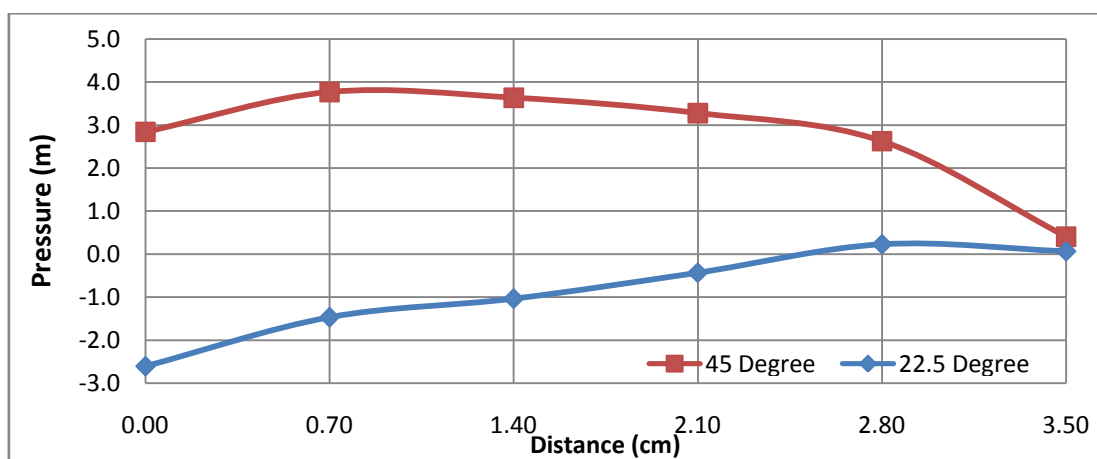
5-50%-45°		
x (cm)	P (m)	F (N)
0	2.843	231.459
0.7	3.771	259.207
1.4	3.635	241.982
2.1	3.278	206.694
2.8	2.627	106.148
3.5	0.406	0.0
		1045.489

5-70%-22.5°		
x (cm)	P (m)	F (N)
0	-1.395	-76.419
0.7	-0.789	-24.431
1.4	0.091	26.015
2.1	0.653	44.432
2.8	0.617	24.884
3.5	0.094	0.0
		-5.519

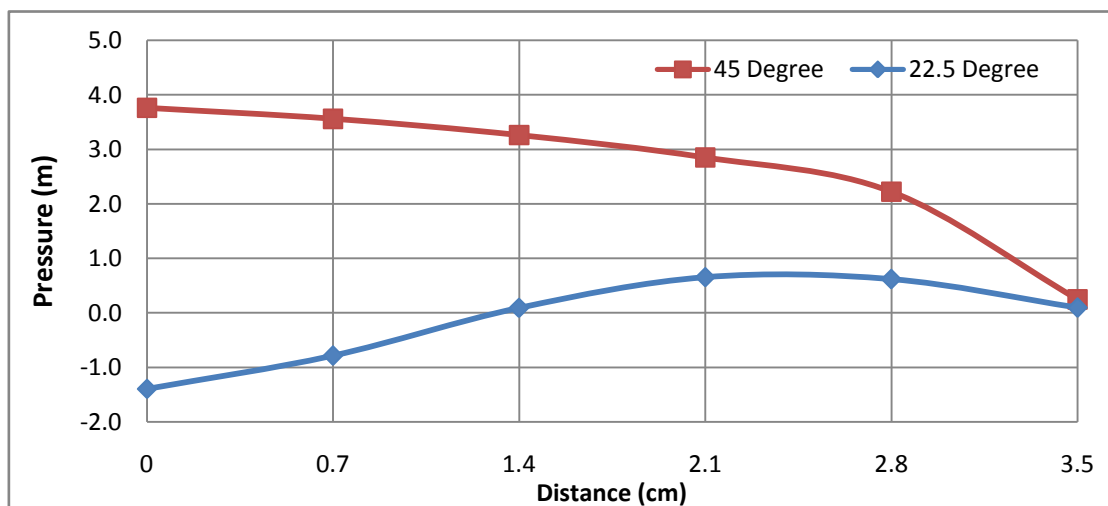
5-70%-45°		
x (cm)	P (m)	F (N)
0	3.761	256.211
0.7	3.559	238.693
1.4	3.260	213.903
2.1	2.851	177.562
2.8	2.222	86.381
3.5	0.246	0.0
		972.750

با توجه به جدول (5-11) و شکل (5-52) ملاحظه می گردد که با تغییر زاویه از 22/5 به 45 درجه نیروی پایین کشنده که در اثر فشار منفی در زیر دریچه ایجاد شده است تبدیل به نیروی

بالابرنده می‌گردد که از اثرات مثبت زاویه 45 درجه بحساب می‌آید. زیرا عموماً زاویه لبه دریچه نسبت به کاهش نیروهای پایین‌کننده در به حداقل رساندن ارتعاشات (لرزش‌ها) و کاویتاسیون تأثیر بسزایی دارد. زیرا نیروهای پایین‌کننده در ارتعاشات دریچه و تأسیسات وابسته تأثیر مخرب داشته و عمر مفید بهره‌برداری از آنها را بشدت کاهش می‌دهد. با توجه به جدول (5-11) ملاحظه می‌گردد که حداکثر نیروی پایین‌کننده و حداکثر نیروی بالابرنده مربوط به بازشدگی 50% می‌باشد.



شکل (52-5) تغییرات فشار زیر دریچه در بازشدگی 50% و هد 5 متر



شکل (53-5) تغییرات فشار زیر دریچه در بازشدگی 70% و هد 5 متر

## فصل ششم

### نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

## 6-1- خلاصه نتایج بدست آمده

پایان نامه حاضر، شامل دو مرحله آزمایش بر روی مدل فیزیکی و آزمایش بر روی مدل عددی می باشد. پس از انجام آزمایشات بر روی مدل فیزیکی ساخته شده در مرکز تحقیقات آب ایران، مدل عددی با استفاده از نرم افزار حجم محدود فلوننت تهیه گردید. در گام اول با مقایسه نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی، بر روی مدل عددی صحت سنجی و کالیبراسیون صورت گرفت. در گام دوم زمانی که از صحت نتایج مدل ریاضی اطمینان حاصل شد به گسترش مدل عددی برای حالات جدید پرداخته شد. در گام اول کلیه حالت ها برای زاویه لبه  $22/5$  درجه آزمایش گردید. در گام دوم بدین جهت که تأثیر شکل لبه دریاچه را بر میدان جریان پایین دست دریاچه های تحتانی بدست بیاوریم، آزمایشات مدل عددی بر روی زاویه لبه  $45$  درجه صورت پذیرفت. در نهایت نتایج در قالب جدول و نمودار استخراج گردید که در فصل پنجم به تفصیل آورده شده اند.

با بررسی نتایج و توجه به روند تغییرات هر یک از پارامترهای دخیل در جریان، نتایج زیر حاصل می شود:

- فشار سیال در صفحه بالادست دریاچه مثبت است و هرچه از بالادست دریاچه به سمت پایین دست حرکت می کنیم از مقدار این فشار کاسته می شود. علت این است که در بالادست دریاچه جریان تحت فشار است. دقیقاً " در محل قرارگیری دریاچه سرعت در حال افزایش است در نتیجه بازای انرژی ثابت، هد فشار کاهش خواهد یافت.
- در کلیه نقاط مجرا، مقادیر فشار در زاویه  $45$  درجه نسبت به زاویه  $22/5$  درجه بزرگتر می باشد. این نتیجه بخصوص در بالادست دریاچه نمایان تر است. در پائین دست دریاچه در محدوده پیرومترهای نزدیک دریاچه نیز قابل مشاهده بوده ولی در فواصل دور پائین دست اختلاف قابل توجهی مشاهده نمی گردد. با افزایش هد این نتیجه با وضوح بیشتر قابل ملاحظه است. برای بازشدگی های متفاوت نیز ملاحظه می شود که مقادیر فشار در بازشدگی  $50\%$  نسبت به بازشدگی  $70\%$  در نقاط مختلف مجرا بزرگتر می باشد.
- بررسی نمودارهای پروفیل سطح جریان نشان می دهد که این پروفیل از شکل لبه دریاچه تبعیت می کند. با تغییر زاویه لبه از  $22/5$  به  $45$  درجه، پروفیل جریان عمق کمتری پیدا نموده یا بعبارت دیگر متراکم تر شده که خود نشان دهنده کاهش مقدار آبگذری تحت این زاویه می باشد. و همچنین ملاحظه می شود که شکل پروفیل جریان پایین دست دریاچه از شکل لبه

دریچه تبعیت می کند و به مقدار هد آب مخزن بستگی ندارد، زیرا با تغییر هد آب از 2 به 5 متر، تغییری در شکل پروفیل دیده نمی شود.

- بر حسب نتایج بدست آمده، دبی عبوری از مجرا با دریچه دارای زاویه لبه  $22/5$  درجه نسبت به  $45$  درجه بزرگتر می باشد. این افزایش در بازشدگی  $50\%$  حدود  $5/6\%$  و در بازشدگی  $70\%$  حدود  $3/7\%$  می باشد و لذا افزایش بازشدگی کاهش اثرات زاویه لبه دریچه بر دبی را به همراه دارد.

- با توجه به نتایج میدان سرعت دیده میشود که در بالا دست دریچه و برای تمامی حالات، مقادیر سرعت برای دریچه با زاویه لبه  $22/5$  درجه بزرگتر از دریچه با زاویه لبه  $45$  درجه هستند. در پایین دست دریچه، سرعتها برای هر دو زاویه روند افزایشی می یابند که با توجه به عمق کمتر جریان بعد از زاویه  $45$  درجه، افزایش سرعت تحت این زاویه روند قابل ملاحظه تری یافته است

- با توجه به فشردگی بیشتر جریان در دریچه با زاویه لبه  $45$  درجه، سرعت جریان افزایش یافته و در نتیجه عدد فرود و عدد رینولدز جریان نیز در مقایسه با لبه با زاویه  $22/5$  درجه افزایش می یابد. قاعدتاً افزایش عدد رینولدز جریان منجر به توربولانس و آشفتگی بیشتر جریان فوق در پائین دست دریچه با زاویه لبه  $45$  درجه شده که تبعات معمول آن هوادهی و اختلاط بیشتر آب و هوا در شرایط فوق است که از نقطه نظر کاویتاسیون مثبت تلقی می گردد.

- با افزایش زاویه دریچه، روند کلی حاکم بر تغییرات اندیس کاویتاسیون، روند افزایشی است.
- با توجه به مقادیر اندیس کاویتاسیون دیده می شود که بحرانی ترین مقطع وقوع کاویتاسیون لبه و زیر دریچه می باشد. و با توجه به مقادیر اندیس کاویتاسیون که بازای سرعت های بالاتر از  $30$  متر بر ثانیه از مقدار بحرانی  $0/2$  کمتر شده است، لذا همواره باید از هوادهی استفاده گردد.

- همانطور که از جدول ضریب انقباض قابل مشاهده است، ضریب انقباض برای زاویه لبه  $45$  درجه بیشتر از زاویه  $22/5$  درجه می باشد. ولی با توجه به  $x$  ها مشاهده می شود که محل وقوع انقباض برای زاویه  $22/5$  درجه نزدیکتر به دریچه است.

- با بررسی تغییرات فشار هیدروستاتیک در زیر دریچه و تبدیل آن به مقادیر نیروی هیدروستاتیک ملاحظه می گردد که با تغییر زاویه از  $22/5$  به  $45$  درجه، نیروی پایین کشنده که در اثر فشار منفی در زیر دریچه ایجاد شده است تبدیل به نیروی بالابرنده می گردد



که از اثرات مثبت زاویه 45 درجه بحساب می آید. زیرا نیروهای پایین کشنده در ارتعاشات دریاچه و تأسیسات وابسته تأثیر مخرب داشته و عمر مفید بهره برداری از آنها را بشدت کاهش می دهد. ملاحظه می گردد که حداکثر نیروی پایین کشنده و حداکثر نیروی بالابرنده مربوط به بازشدگی 50% می باشد.

## 2-6- پیشنهادات برای ادامه مطالعه

- پیشنهاد می شود مدل‌های عددی دیگری با زوایای لبه 30، 60، 75 و 90 درجه ساخته شود و تحت هدما و بازشدگی های مختلف مورد بررسی بیشتری قرار گیرد. چرا که با بررسی موارد بیشتر زاویه لبه میتوان به ارزیابی جامع تری راجع به تأثیر آن بر میدان جریان دست یافت. و نیز جهت بررسی دقیق جریان تحت فشار در پایین دست دریچه از مدل‌هایی استفاده شود که طول مجرای بعد از دریچه آنها بلندتر از مدل مورد آزمایش باشد.
- پیشنهاد می شود وجود گردشگی در وجه بالادست دریچه بررسی شود. چرا که باعث جلوگیری از جدشدگی جریان از بدنه دریچه شده و انتظار می رود تأثیرات مثبتی بر سرعت و فشار و کاویتاسیون در زیر دریچه داشته باشد.
- در آزمایش های انجام شده بدلیل بالا بودن سرعت، وسایل معمولی نظیر لوله پیتو یا سرعت سنج مولینه جهت برداشت سرعت جریان قابل استفاده نبودند. از طرفی سرعت سنج های پیشرفته تر بسیار گران قیمت بوده که برای پروژه حاضر توجیه اقتصادی نداشتند. ولی برای آزمایش های با اهمیت بالاتر پیشنهاد می شود سرعت ها در محل آزمایشگاه برداشت گردند.

## منابع:

- [1] جلیل ابریشمی، ناصر وهاب رجایی، (۱۳۸۶) "سدهای بتنی" چاپ سوم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، ص ۱۱
- [2] فیروز تربیت، (۱۳۶۳) "هیدرولیک" چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران
- [3] روابط عمومی شرکت مدیریت منابع آب، (۱۳۸۷) "کتاب سد: جستاری در حوزه سد و سدسازی در ایران" چاپ اول، نشر مکت، تهران، ص ۹
- [4] میری، م. (1388)، پایان نامه ارشد، "بررسی عددی و آزمایشگاهی عملکرد هواده ها در سرریز های آزاد"، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
- [5] Sagar B.T.A. (1999) "*Gate Lip Hydraulic*", IAHR Proceeding
- [6] امامی سیدمحمد کاظم و کاویانپور محمدرضا، "کاربرد مدل عددی سه بعدی در تحلیل جریان دوفازی در مجرای تخلیه کننده تحتانی سد احمدبیگلو"
- [7] گزارش نهایی آزمایشهای هیدرولیکی تونل تخلیه کننده تحتانی سد گیلانغرب، مرکز تحقیقات آب ایران، اردیبهشت 1378، نشریه شماره 51
- [8] مقیمی، م. (1387)، پایان نامه ارشد، "بررسی پارامترهای هیدرولیکی و خلا زایی جریان بر روی سرریزهای تندآب و پایانه های کاهنده انرژی"، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
- [9] خسروجردی امیر و کاویانپور محمدرضا، "بررسی مسائل هیدرولیکی و مقایسه مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی تخلیه کننده تحتانی سدها در ایران"
- [10] بیرامی محمدکریم (1385) "سازه های انتقال آب" چاپ ششم، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ص 205
- [11] زارعی علیرضا و عطاری جلال "پایش هیدرولیکی تخلیه کننده های تحتانی" ششمین کنفرانس هیدرولیک، دانشگاه شهرکرد
- [12] Falvey, H.T. (1990) "*Cavitation in Chutes and Spillways*" Engineering Monograph 42. USBR PP29-47
- [13] Arnt, Reger E.A. (1981) "*Cavitation in Fluid Machinery Hydraulic Structures*" J.Fluid Mech.13, 273-328.
- [14] Jean Pierre France and Jean Marie Michel Kluwer (2004) "*Fundamentals of Cavitation*" Academic Publisher
- [15] Chow, V.T. (1959) "*Open Channel Hydraulics*" Mc Graw Hill. New York
- [16] حسینی سیداحمد و حبیبی مهدی و پاره کار منصور "بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون در مجاری تخلیه کننده تحتانی سدها (مطالعه موردی تخلیه کننده تحتانی سد نرماشیر)"
- [17] Volkart, P.U. (1994) "*Prototype Investigation of High Velocity Flow in the High Head Tunnel*"

Outlet of Panix Dam" 18<sup>th</sup> Congress International Commission on Large Dam. Durban. PP 535-553

[18] J.Talai, L.Changeng, L.Xiaomei (1988) "Cavitation Inception of Gate Slots" Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research

[19] Peterka A.J. "The effect of entrained on cavitation pitting", Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convention, U.S.A

[20] Borden E.C., Colgate D., Legas J., and Selander C.E. "Documentation of Operation, damage, repair, and testing of Yellowtail Dam Spillway", Bureau of reclamation. Report REC-ERC-71-23

[21] Acker P. (1989) "Spillways: design, modeling and operation", Water power and dam construction, 41, 56

[22] گزارش نهایی مدل هیدرولیکی تخلیه کننده سد ژاوه، مرکز تحقیقات آب ایران

[23] نیما جمشیدی و دامون افکاری، (1382) "آموزش نرم افزار Gambit و Fluent" دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[24] Fluent Inc.(2005). FLUENT User's guid.

[25] Rudman, M.J.(1997). "Volume tracking methods for interfacial flows", Int. J. Numer Methods. Fluids, pp.671-691

[26] Mikko Manninen and Veikko Taivassalo. (1996). "On the mixture model for multiphase flow", Sirpa Kallio, Abo Akademi, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.

[27] معظمی، ص. (1386)، پایان نامه ارشد، "تحلیل عددی جریان دوفازی آب و هوا در تونل های تخلیه کننده تحتانی" دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

[28] مهندس سلطانی، مهندس رحیمی، (1383) "دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم افزار Fluent"، نشر طراح

[29] Fluent team, (2000) "Manual and user guide of Fluent Software", Fluent Inc. Centera resource park 10 Cavendish Court Lebanon, NH 0376

[30] سلیمان زاده روح الله و شمسایی ابوالفضل، ( 1385 ) "تحلیل عددی جریان دو فاز آب و هوا در اطراف دریچه کشویی تخلیه کننده تحتانی" هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

[31] Naudascher. E. (1991), 'Hydrodynamic Forces', A.A.Balkema. Rotterdam.

## Abstract

Outlet gates have attracted a great attention in dam engineering and related industry. In this regard, the tasks of many investigations are focused on providing the discussion and solutions of related problems for such structures. Increasing the velocity and pressure reduction are the common problems in high head conduits, which lead to cavitation formation. Cavitation is the main factor of sever damages in outflow tunnels downstream of gates; therefore, it is necessary to decrease or eliminate its destructive impacts on the structures.

The main aim of this research is to study the effects of gate lip on flow domain downstream of outlet gates in no-aeration condition. Experimental studies are utilized to calibrate the numerical model of flow around outlet gates. The physical model was the Dam of Zhaveh-Iran, constructed and tested at Water Research Institute of Iran. Then, a numerical model was provided and calibrated by experimental results. To take into account the effect of gate lip on cavitation of outlet gates, gate lip angles of 22.5 and 45 degrees with gate openings of %50 and %70 were simulated, numerically. Two heads of 2m and 5m were also used to determine the velocity and pressure field. The results showed the reasonable agreements between the numerical and experimental information. It is also concluded that, increasing the gate lip angle has significant effects and changes the flow characteristics and thus, cavition index of flow around the outlet gates.

**Keywords:** Bottom outlet gates- No aeration- Gate lip angle- Flow domain- Experimental model- Numerical Model