

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران و معماری

پایان نامه

بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر شکل لبه دریچه بر هوادهی و توزیع غلظت

هوا در پایین دست دریچه های تحتانی

دانشجو:

حمید رضا نونهال

استاد راهنمای اول :

آقای دکتر احمد احمدی

استاد راهنمای دوم :

آقای دکتر محمدرضا کاویانپور

استاد مشاور:

آقای مهندس رضا روشن

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

تیر سال ۱۳۹۱

تصویب نامه

تقدیم اثر:

تقدیم به خانواده عزیزم

تشکر و قدردانی

از زحمات اساتید راهنمای محترم آقایان دکتر احمدی و دکتر کاویانپور کمال تشکر را دارم و همچنین از اعضای مرکز تحقیقات آب ایران به ویژه آقایان مهندس روشن و مهندس مقسومی که اینجانب را در انجام آزمایشات راهنمایی نمودند تشکر و قدردانی می نمایم.

و نیز از دوست عزیزم مهندس محمدجواد منظمی بسیار سپاسگزارم که همواره از کمک هایش استفاده کرده ام.

تعهد نامه

اینجانب **حمید رضا نونهال** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **عمران - هیدرولیک** دانشکده **عمران و معماری** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی عددی و آزمایشگاهی تاثیر شکل لبه دریچه بر هوادهی و توزیع غلظت هوا در پایین دست دریچه های تحتانی** تحت راهنمایی **دکتر احمد احمدی** به عنوان استاد راهنمای اول و دکتر **محمدرضا کاویان پور** 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 تاثیر 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 (یا 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 :

با توجه به اهمیت خاصی که سد ها در صنعت آب دارند، کارایی و عملکرد قسمت های مختلف آن نیز باید مورد توجه قرار گیرد. یکی از قسمت های اصلی سدها تخلیه کننده ها و دریچه های تحتانی می باشند. در این سازه ها به علت بالا بودن هد آب، سرعت جریان آب خروجی در هنگام عملکرد یا باز شدن دریچه ها بسیار زیاد بوده و در نتیجه رخداد پدیده کاویتاسیون بسیار محتمل می باشد. برای جلوگیری از خسارات ناشی این پدیده استفاده از هواده برای ورود هوا به درون جریان پس از دریچه راهکاری متداول می باشد. با افزایش غلظت هوا در جریان پس از دریچه از شدت خسارات ناشی از این پدیده کاسته می شود. در این تحقیق به بررسی شکل لبه دریچه تحتانی پرداخته شده است و هدف از آن بررسی تأثیر زاویه لبه دریچه بر میزان غلظت هوا در جریان پس از دریچه و مقدار هوای ورودی از هواده می باشد.

برای مطالعات آزمایشگاهی از مدل سد ژاوه در آزمایشگاه موسسه تحقیقات آب ایران استفاده گردیده است و نتایج حاصل از آن برای قسمت های مختلف دریچه تحتانی در بازشدگی ها و هدهای مختلف بدست آمده است. پس از بدست آوردن نتایج مدل آزمایشگاهی اقدام به ساخت مدل عددی توسط نرم افزار FLUENT شده است. برای مدل سازی جریان دو فازی آب و هوا از روش MIXTURE و برای مدل سازی آشفتگی از مدل RSM استفاده گردیده است. نتایج حاصله از نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی بررسی گردیده و خطای این دو روش با یکدیگر اندازه گرفته شده است. سپس با استفاده از نرم افزار FLUENT زاویه های مختلف دیگری برای لبه دریچه مدل سازی شده و مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه شده است.

بررسی صورت گرفته در این تحقیق بر روی زاویه لبه دریچه تحتانی حاکی از آن است که افزایش زاویه لبه دریچه بر میزان غلظت هوا تأثیرات چشمگیری گذاشته است. این تأثیر برای بازشدگی های مختلف دارای روند متفاوت می باشد. با افزایش زاویه لبه دریچه و جهت ثابت ماندن دبی ورودی، هد

آب در مخزن افزایش یافته که این موضوع نشان دهنده آن است که دبی خروجی با افزایش زاویه لبه دریچه کاهش پیدا کرده است. همچنین مشاهده شد که سرعت هوا در هواده برای زاویه های مختلف دارای تغییرات متفاوتی می باشد.

کلمات کلیدی: جریان دوفازی، دریچه تحتانی، شکل لبه دریچه، غلظت هوا در جریان، هوادهی

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- 6th International symposium on advances in science and technology-Malaysia- 2012, March

چکیده :	ز
۱- فصل اول	۲
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- اهداف تحقیق	۳
۳-۱- ساختار پلن نامه	۴
۲- فصل دوم : مباحث تخلیه کننده تحتانی	۶
۱-۲- اصول طراحی	۶
۲-۲- کاوتاسیون	۷
۳-۲- راهکارهای کنترل کایتاسیون	۸
۴-۲- بررسی نحوه ورود هوا به جرگن در مجاری	۱۰
۱-۴-۲- هواگیری طبیعی	۱۰
۲-۴-۲- هواگیری طبیعی در مجاری بسته	۱۳
۳-۴-۲- هواگیری مصنوعی در مجاری بسته	۱۶
۵-۲- تحلیل جرگن دو فازی	۲۱
۳- فصل سوم : معرفی مدل آزمایشگاه ی	۲۷
۱-۳- اصول طراحی	۲۷
۲-۳- ابزارهای اندازه گیری	۳۴
۳-۳- خطاهای اندازه گیری در مدل	۳۶
۴-۳- انجام آزمایش	۳۷
۵-۳- ارائه نتایج مدل فیزیکی	۳۹
۴- فصل چهارم : معرفی و کاربرد نمودن مدل عددی	۵۳
۱-۴- مقدمه	۵۳
۲-۴- معادلات حاکم:	۵۴
۳-۴- مدل عددی Fluent:	۵۸
۱-۳-۴- پدیده های انتقال و پخش	۶۰
۲-۳-۴- حل میدان جریان	۶۲
۳-۳-۴- مدل سازی جریان چندفازی	۶۴
۴-۳-۴- روشهای مدل سازی چند فازی	۶۴
۴-۴- تحلیل اولیه و کالیبراسیون مدل	۶۹
۵-۴- شرایط مدل سازی عددی در نرم افزار	۷۵
۵- فصل پنجم : ارائه و تفسیر نتایج	۹۰

۹۰	۱-۵- مقدمه
۹۰	۲-۵- ارائه نتایج
۱۰۹	۳-۵- ارائه نتایج سرعت هوا در هواده
۱۱۵	۶- فصل ششم : جمع بندی و پیشنهادات
۱۱۵	۱-۶- مقدمه
۱۱۶	۲-۶- جمع بندی و نتیجه گیری
۱۱۷	۳-۶- پیشنهادات :
۱۱۹	۷- مراجع

- شکل ۱-۱: نمای شماتیک درجه تحتاری و زاوی لبه زیئی آن..... ۳
- شکل ۱-۲: سرعت بحرانی برای ورود هوا در یک جت مدور (ERVIN 1980) ۱۰
- شکل ۲-۲: نیروهای وارد بر حباب هوا..... ۱۲
- شکل ۳-۲: مدل و پارامترهای مورد استفاده در مطالعه تجربی هواده ها در مجاری بسته آزاد (سرریز SIROKA) [10] ۱۴
- شکل ۴-۲: منحنی های تجربی تعیین میزان هوای جریان یافته در هواده..... ۱۵
- شکل ۵-۲: هوادهی جریان در تخلیه کننده های تحتانی..... ۱۸
- شکل ۶-۲: مقادیر ماکزیمم اولیه و ثانویه ورود هوا در تاسیسات خروجی تنظیم کننده..... ۱۹
- شکل ۱-۳: نمایی از مخزن تامین هد مدل..... ۲۸
- شکل ۲-۳: نمایی از دهانه زنگوله ای..... ۲۸
- شکل ۳-۳: نمایی از ورودی دهانه زنگوله ای..... ۲۹
- شکل ۴-۳: (مقطع و پلان) نمایی از مجرای بالادست دریچه اضطراری..... ۲۹
- شکل ۵-۳: (مقطع و پلان) نمایی از شیار و مجرای پایین دست دریچه اضطراری..... ۳۰
- شکل ۶-۳: نمایی از بالادست دریچه اضطراری..... ۳۱
- شکل ۷-۳: (مقطع و پلان) دریچه اضطراری..... ۳۱
- شکل ۸-۳: (مقطع و پلان) نمایی از دریچه سرویس..... ۳۲
- شکل ۹-۳: نمایی از مقطع خروجی..... ۳۳
- شکل ۱۰-۳: نمایی از فلانچها و اتصالات مدل..... ۳۴
- شکل ۱۱-۳: نمایی از مانومتر قائم متصل به مخزن برای اندازه گیری ارتفاع آب مخزن..... ۳۵
- شکل ۱۲-۳: نمایی از یک دستگاه HOT WIRE جهت اندازه گیری سرعت هوا..... ۳۵
- شکل ۱۳-۳: نمای فرارگویی بجزومتريک اندازه گویی فشار در مجرای تخلیه کننده تحتاری..... ۳۹
- شکل ۱۴-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۲ متر در بجزومتريک های ۱۷ الی ۲۷..... ۴۰
- شکل ۱۵-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۲ متر در بجزومتريک های ۳۲ الی ۳۹..... ۴۰
- شکل ۱۶-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۲ متر در بجزومتريک های ۴۰ الی ۴۹..... ۴۱
- شکل ۱۷-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۲ متر در بجزومتريک های ۵۰ الی ۶۰..... ۴۱
- شکل ۱۸-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۳ متر در بجزومتريک های ۱۷ الی ۲۷..... ۴۲
- شکل ۱۹-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۳ متر در بجزومتريک های ۳۲ الی ۳۹..... ۴۲
- شکل ۲۰-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۳ متر در بجزومتريک های ۴۰ الی ۴۹..... ۴۳
- شکل ۲۱-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۳ متر در بجزومتريک های ۵۰ الی ۶۰..... ۴۳
- شکل ۲۲-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۴ متر در بجزومتريک های ۱۷ الی ۲۷..... ۴۴
- شکل ۲۳-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۴ متر در بجزومتريک های ۳۲ الی ۳۹..... ۴۴
- شکل ۲۴-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۴ متر در بجزومتريک های ۴۰ الی ۴۹..... ۴۵
- شکل ۲۵-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۴ متر در بجزومتريک های ۵۰ الی ۶۰..... ۴۵
- شکل ۲۶-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۵ متر در بجزومتريک های ۱۷ الی ۲۷..... ۴۶
- شکل ۲۷-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۵ متر در بجزومتريک های ۳۲ الی ۳۹..... ۴۶
- شکل ۲۸-۳: مقادی فشار بجزومتريک اندازه گویی شده در مدل با هد ۵ متر در بجزومتريک های ۴۰ الی ۴۹..... ۴۷

- شکل ۳-۲۹: مقادی فشار پیژومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۵ متر در پیژومترهای ۵۰ الی ۶۰ ۴۷
- شکل ۳-۳۰: نمایش سرریز مستطیلی مورد استفاده جهت اندازه گیری دبی جریان ۴۹
- شکل ۴-۱: تغییرات Φ نسبت به X بر حسب اعداد مختلف ۶۱
- شکل ۴-۲: حجم کنترل در حالت یک بعدی ۶۲
- شکل ۴-۳: مش بندی مدل با المان سه وجهی ۷۰
- شکل ۴-۴: نمای مش بندی مدل تخلیه کننده و تونل با المان سه وجهی ۷۱
- شکل ۴-۵: مقایسه فشار در مدل شماره ۱ و مدل شماره ۲ ۷۲
- شکل ۴-۶: نمایی از مش بندی مدل ۱ ۷۲
- شکل ۴-۷: نمایی از مش بندی مدل ۲ ۷۳
- شکل ۴-۸: نمایی از مش بندی مدل ۳ ۷۳
- شکل ۴-۹: مقایسه فشار در مدل شماره ۲ و مدل شماره ۳ ۷۴
- شکل ۴-۱۰: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک تحلیلی میدان فشار مدل EXPERIMENTAL و مدل عددی بر اساس روش SIMPLE ۷۹
- شکل ۴-۱۱: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک تحلیلی میدان فشار مدل EXPERIMENTAL و مدل عددی بر اساس روش PISO ۷۹
- شکل ۴-۱۲: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۱۷ الی ۲۵ و بازشدگی ۵۰٪ ۸۱
- شکل ۴-۱۳: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۳۲ الی ۳۸ و بازشدگی ۵۰٪ ۸۲
- شکل ۴-۱۴: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۵۰ الی ۵۶ و بازشدگی ۵۰٪ ۸۲
- شکل ۴-۱۵: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۶۳ الی ۶۶ و بازشدگی ۷۰٪ ۸۲
- شکل ۴-۱۶: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۳۹ الی ۴۹ و بازشدگی ۵۰٪ ۸۳
- شکل ۴-۱۷: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۱۷ الی ۲۵ و بازشدگی ۷۰٪ ۸۴
- شکل ۴-۱۸: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۳۲ الی ۳۸ و بازشدگی ۷۰٪ ۸۵
- شکل ۴-۱۹: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۳۹ الی ۴۹ و بازشدگی ۷۰٪ ۸۵
- شکل ۴-۲۰: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۵۰ الی ۵۶ و بازشدگی ۷۰٪ ۸۵
- شکل ۴-۲۱: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۶۳ الی ۶۶ و بازشدگی ۷۰٪ ۸۶
- شکل ۴-۲۲: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۱۷ الی ۲۷ و بازشدگی ۹۰٪ ۸۷
- شکل ۴-۲۳: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۳۲ الی ۳۸ و بازشدگی ۹۰٪ ۸۷
- شکل ۴-۲۴: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۳۹ الی ۴۹ و بازشدگی ۹۰٪ ۸۷
- شکل ۴-۲۵: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۵۰ الی ۵۶ و بازشدگی ۹۰٪ ۸۸
- شکل ۴-۲۶: مقایسه نتایج فشار پیژومتریک مدل عددی و آزمایشگاه ی در پیژومترهای ۶۳ الی ۶۶ و بازشدگی ۹۰٪ ۸۸
- شکل ۵-۱: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $X=2.5\text{CM}$ ۹۱
- شکل ۵-۲: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $X=2.5\text{CM}$ ۹۱
- شکل ۵-۳: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $X=6.5\text{CM}$ ۹۲
- شکل ۵-۴: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $X=6.5\text{CM}$ ۹۲
- شکل ۵-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $X=19.85\text{CM}$ ۹۳
- شکل ۵-۶: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $X=19.85\text{CM}$ ۹۳
- شکل ۵-۷: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $X=2.5\text{CM}$ ۹۴
- شکل ۵-۸: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $X=2.5\text{CM}$ ۹۵

- شکل ۹-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $X=6.5\text{CM}$ ۹۶
- شکل ۱۰-۵: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $X=6.5\text{CM}$ ۹۶
- شکل ۱۱-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $X=19.85\text{CM}$ ۹۶
- شکل ۱۲-۵: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $X=19.85\text{CM}$ ۹۷
- شکل ۱۳-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $X=2.5\text{CM}$ ۹۸
- شکل ۱۴-۵: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $X=2.5\text{CM}$ ۹۸
- شکل ۱۵-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $X=6.5\text{CM}$ ۹۹
- شکل ۱۶-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $X=6.5\text{CM}$ ۹۹
- شکل ۱۷-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $X=19.85\text{CM}$ ۹۹
- شکل ۱۸-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $X=19.85\text{CM}$ ۱۰۰
- شکل ۱۹-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی آب در طول مجرا در بازشدگی ۹۰٪ ۱۰۲
- شکل ۲۰-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۹۰٪ ۱۰۲
- شکل ۲۱-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی آب در طول مجرا در بازشدگی ۷۰٪ ۱۰۳
- شکل ۲۲-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۷۰٪ ۱۰۴
- شکل ۲۳-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی آب در طول مجرا در بازشدگی ۵۰٪ ۱۰۵
- شکل ۲۴-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۵۰٪ ۱۰۵
- شکل ۲۵-۵: نمودار سرعت عمودی جریان آب در بازشدگی ۵۰٪ ۱۰۶
- شکل ۲۶-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۵۰٪ ۱۰۷
- شکل ۲۷-۵: نمودار سرعت عمودی جریان آب در بازشدگی ۷۰٪ ۱۰۷
- شکل ۲۸-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۷۰٪ ۱۰۸
- شکل ۲۹-۵: تغییرات عمق معادل آب با زاویه لبه درجه در بازشدگی های مختلف ۱۰۸
- شکل ۳۰-۵: تغییرات عمق معادل هوا با زاویه لبه درجه در بازشدگی های مختلف ۱۰۹
- شکل ۳۱-۵: تغییرات دبی هوا در هواده با هد و بازشدگی درجه ۱۱۱
- شکل ۳۲-۵: نتایج عددی تغییرات دبی هوا در هواده درجه تحتاری با بازشدگی و هد ۱۱۲
- شکل ۳۳-۵: تغییرات دبی هوا در هواده با بازشدگی و زاویه های مشخص شده ۱۱۳

جدول ۱-۲: الگوی پیشنهادی کنترل کایتاسیون.....	۸
جدول ۱-۳: مقادیر اندازه گیری شده سرعت هوا در هدها و بازشدگی مختلف درجه تحتاری.....	۴۸
جدول ۲-۳: تغییرات دبی اندازه گیری شده در هدها و بازشدگی مختلف درجه تحتاری.....	۵۰
جدول ۱-۴: نتایج فشار در مدل شماره ۱ و مدل شماره ۲.....	۷۱
جدول ۲-۴: نتایج فشار در مدل شماره ۲ و مدل شماره ۳.....	۷۴
جدول ۳-۴: مقایسه نتایج روش های PISO و SIMPLE در تحلیلی میدان.....	۷۸
جدول ۴-۴: مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاه ی در بازشدگی ۵۰٪ درجه و هد ۲ متر با لبه ۲۲/۵ درجه.....	۸۱
جدول ۵-۴: مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاه ی در بازشدگی ۷۰٪ درجه و هد ۲ متر با لبه ۲۲/۵ درجه.....	۸۴
جدول ۶-۴: مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاه ی در بازشدگی ۹۰٪ درجه و هد ۲ متر با لبه ۲۲/۵ درجه.....	۸۶
جدول ۱-۵: تغییرات نفوذ هوا در داخل آب در بازشدگی و زاویج لبه درجه مختلف.....	۱۰۰
جدول ۲-۵: تغییرات عمق نسبی آب و هوا در طول مجرا در باز شدگی ۹۰٪.....	۱۰۲
جدول ۳-۵: تغییرات عمق نسبی آب و هوا در طول مجرا در باز شدگی ۷۰٪.....	۱۰۳
جدول ۴-۵: تغییرات عمق نسبی آب و هوا در طول مجرا در باز شدگی ۵۰٪.....	۱۰۴
جدول ۵-۵: تغییرات سرعت و دبی هوا در هواده های تخلیج کننده تحتاری در هد و بازشدگی های مختلف.....	۱۱۰
جدول ۶-۵: تغییرات دبی هوا در هواده درجه تحتاری با بازشدگی و هد.....	۱۱۱
جدول ۷-۵: تغییرات دبی هوا در هواده درجه تحتاری با بازشدگی و زاویج های مشخص شده.....	۱۱۲

فصل اول

۱ - فصل اول

۱ - مقدمه

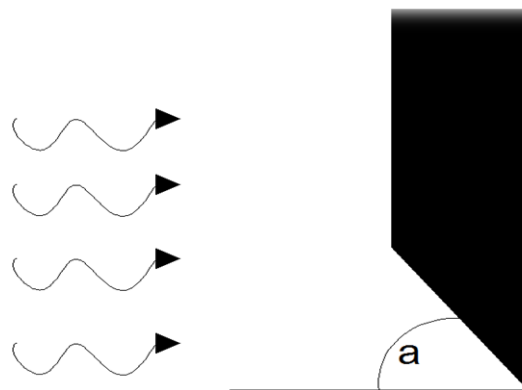
رشد روز افزون جامعه بشری نیاز انسانها را به منابع آبی و استفاده بیشتر از این مایع حیاتی بیشتر و بیشتر کرده است. پیشرفت تکنولوژی و علوم مهندسی مرتبط با آب تا حدی عطش این نیاز را به حالت کنترل درآورده و هر روزه انسانها را در ساخت سازه‌هایی عظیم‌تر و پیچیده‌تر یاری می‌کند. سدها که یکی از عظیم‌ترین سازه‌های ساخت دست بشر می‌باشند، از اهمیت بالایی برخوردارند. کارایی مناسب، ایمنی بالا، اقتصادی بودن طرح از جمله عواملی می‌باشند که یک سد باید دارا باشد. کوچکترین کوتاهی در زمینه‌ی طراحی و اجرای آن باعث بوجود آمدن ضررهای غیر قابل جبران می‌گردد. به علت هزینه بالای ساخت این سازه‌ها و اهمیت ایمنی آنها، بایستی مطالعات، آزمایشات و مدلسازی دقیقی قبل از ساخت سازه واقعی انجام شود. [1]

امروزه برای پیش بینی پدیده‌های مختلفی که بر روی این سازه‌ها اتفاق می‌افتد از دو روش مدلسازی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی استفاده می‌گردد. روشهای آزمایشگاهی با ساخت مدل هیدرولیکی و انجام آزمایشات و اندازه‌گیری‌های مختلف برای بدست آوردن پارامترهای مورد نیاز و مشخصات هیدرولیکی همراه است. گرچه این روش با توجه به زمان ساخت، هزینه بالای ساخت و بهره‌برداری و خطاهای ناشی از مدلسازی، دارای معایبی است ولی این روش همچنان در طراحی و اجرای پروژه‌ها کاربرد فراوانی دارد. شناخت قوانین حاکم بر حرکت سیال، به‌کارگیری ریاضیات پیشرفته، تکنیکهای محاسباتی و کامپیوترهای قدرتمند امروزی، پایه‌ی روش دوم می‌باشد. علیرغم دقت بسیار خوب و هزینه‌ی نسبتاً پایین شبیه‌سازی، اطمینان از صحت نتایج همواره بایستی به اتکای نتایج آزمایشگاهی

و واقعی انجام پذیرد. این موضوع برای همه جریانهای هیدرولیکی بسیار پیچیده و غیر قابل پیش بینی از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد. [2]

۱-۴ - اهداف تحقیق

یکی از قسمت های مهم سدها، تخلیه کننده های تحتانی می باشند که شامل تونل انتقال آب، دریچه سرویس و اضطراری و داکت هوادهی می باشند. به علت هد بسیار بالای آب پشت این دریچه ها، سرعت خروج آب از آنها نیز بالا بوده و در نتیجه وقوع پدیده کاویتاسیون در آنها به شدت محتمل است. کاویتاسیون صدمات بسیار شدیدی به سازه هیدرولیکی وارد می سازد که یکی از راهکارهای مقابله با صدمات حاصل از آن، استفاده از هوادهی جریان آب در قسمت با احتمال رخداد زیاد پدیده می باشد که در این خصوص به طور مفصل در فصول بعدی توضیح داده شده است. در مطالعات پیشین تأثیر طول کانال بر میزان هوادهی و غلظت جریان بعد از دریچه، توسط Speerli and Hager (2000) در هدهای مختلف و همچنین بازشدگی مختلف انجام گرفته است. [3] در این پایان نامه تأثیر زاویه لبه دریچه مطابق شکل بر میزان هوادهی و غلظت و مشخصات جریان در پایین دست دریچه مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱-۱: نمای شماتیک دریچه تحتانی و زاویه لبه زیرین آن

به علت آنکه شکل لبه دریچه بر پروفیل جریان بعد از آن تأثیر می گذارد، به نظر می رسد این تأثیر بر میزان هوادهی و غلظت جریان نیز تأثیرات خاصی داشته باشد. لذا در این پایان نامه ابتدا از یک مدل فیزیکی تخلیه کننده تحتانی موجود در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب ایران استفاده و پس از انجام تست های مختلف و ثبت نتایج مورد نیاز از آن، اقدام به مدلسازی عددی و بررسی تغییرات لازم با استفاده از نرم افزار FLUENT شد. با استفاده از نتایج مدل فیزیکی، مدل عددی کالیبره و مورد حساسیت سنجی قرار گرفت. سپس شکل مختلف لبه دریچه در مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج مدل عددی برای لبه دریچه و همچنین بازشدگی مختلف، تأثیر شکل لبه دریچه بر مقدار هوادهی و غلظت جریان در پایین دست آن مورد ارزیابی و جمع بندی قرار گرفت.

۱ ۳ - ساختار پایان نامه

در این پایان نامه پس از مقدمه حاضر، اصول طراحی تخلیه کننده های تحتانی، پدیده کاویتاسیون و روش های مقابله با آن مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم مدلسازی فیزیکی و معرفی مدل ارائه شده است و در فصل چهارم معرفی مدل عددی و در فصل پنجم ارائه و تفسیر نتایج صورت گرفته است. در فصل پایانی ششم نیز جمع بندی و پیشنهادات لازم جهت ادامه کار ارائه شده است.

فصل دوم

۲ - فصل دوم : مبانی تخلیه کننده تحتانی

۲ - ۱ اصول طراحی

اهداف مختلفی که معمولا 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، ارتعاش مخرب دریچه به علت سرعت بالای جریان می باشد. ارتعاش دریچه مشکل اساسی

تخلیه کننده تحتانی است و لذا تخلیه کننده های تحتانی باید بگونه ای طراحی شوند که در تمام شرایط

بهره برداری بخوبی عمل نمایند. معمولا دو دریچه شامل دریچه اضطراری یا محافظ و دریچه سرویس

یا تنظیم کننده (دریچه اصلی) در آنها پیش بینی می شود. دریچه سرویس معمولا بر حسب نیاز باز و

دریچه اضطراری نیز معمولا صرفا در دو حالت باز یا بسته کامل تعریف می شوند.

در مطالعه مشخصات فنی مورد نیاز تخلیه کننده تحتانی Giesecke در ۱۹۸۲ توصیه نمود که موارد

زیر مورد توجه قرار گیرند. لازم به ذکر است که تخلیه کننده تحتانی به علت مشکلات و محدودیت

مانند کاویتاسیون، نیروهای هیدرودینامیکی، ارتعاش و سایش بصورت دائمی استفاده نمی شود.

- جریان خروجی از مجرا کاملا هموار و در تمامی بازشدگی ها، مجرا کارایی خوبی داشته باشد.

- استهلاک انرژی مناسب در خروجی سازه مد نظر قرار گیرد.

- نشت جریان در سازه وجود نداشته باشد.

- استفاده از آن آسان، طراحی آن مناسب و اقتصادی و عمر طولانی داشته باشد.

۴۲ - کاویتاسیون

پدیده کاویتاسیون یکی از عوامل موثر بر تخریب سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد که در اثر وقوع پدیده انفجار درونی حبابهای هوا در مجاورت سطح بتن و در نتیجه اعمال نیروهای برشی موضعی بر سطح آن و نهایتاً تخریب سطح سازه ایجاد می‌شود. سرعت زیاد آب بر روی سطوح بتنی و وجود ناهمواری و برجستگی این سطوح باعث انحراف خطوط جریان، جدا شدن جریان از سطح و ایجاد مناطق کم فشار در پایین دست این ناهمواریها می‌شود. اگر این کاهش فشار به حد فشار بخار آب رسد، حبابهای بخار پدید آمده که پس از رسیدن به مناطق با فشار بالاتر، پدیده انفجار حبابها رخ داده که در ادامه باعث تخریب سطح و در نهایت گسیختگی بتن آن می‌شود. جهت بررسی پتانسیل وقوع کاویتاسیون، از پارامتر بدون بعدی به نام اندیس کاویتاسیون استفاده می‌شود. این پارامتر به صورت زیر نشان داده می‌شود [4]:

$$\sigma = \frac{P_{Atm}/\gamma - P_v/\gamma + h \cos \theta}{V_0^2/2g} \quad (1-2)$$

در این رابطه P_{Atm}/γ فشار محیط می‌باشد (در شرایط آزمایشگاه معادل یک اتمسفر)، P_v/γ فشار

بخار مایع (در دمای حدود ۲۵ درجه سانتیگراد معادل ۰/۳۳ متر ارتفاع آب)، $h \cdot \cos \theta$ یا P_0/γ فشار

(فشار نظیر ارتفاع آب اندازه‌گیری شده) و $V_0^2/2g$ ارتفاع نظیر سرعت (برحسب متر) در مقطع

موردنظر می‌باشند. با قراردادن مقادیر فشار و سرعت در هر مقطع در معادله (۱-۲)، اندیس

کاویتاسیون در آن مقطع حاصل می‌گردد. برای اینکه پدیده کاویتاسیون رخ ندهد، اندیس کاویتاسیون

از یک مقدار بحرانی که معمولاً تابع هندسه جریان، شکل و ارتفاع ناهمواری‌های سطحی و موقعیت

نقطه مبناء که در آن فشار و سرعت اندازه‌گیری شده، باید بزرگتر باشد. این مقدار با توجه به امکانات

معمول اجرای بتن در سازه‌های هیدرولیکی، بین ۰/۲ تا ۰/۲۵ می‌باشد. محاسبه اندکس کاویتاسیون باید به ازای دبی‌های مختلف صورت گیرد، زیرا بحرانی‌ترین حالت لزوماً به ازای دبی حداکثر اتفاق نمی‌افتد. جدول (۱-۲) الگویی جهت جلوگیری از کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی ارائه می‌نماید.

جدول ۱-۲: الگوی پیشنهادی کنترل کاویتاسیون

اندیس کاویتاسیون	نیازهای طراحی
بزرگتر از ۱/۸	هیچ نیازی به محافظت از سطح نیست
۱/۸ - ۰/۲۵	بستر جریان با اصلاحاتی شامل ساییدن کلیه زبریها قابل اصلاح می‌باشد
۰/۲۵ - ۰/۱۷	بستر جریان با ترکیب تغییرات طراحی و پروفیل تندآب یا توسط هوادهی محافظت گردد
۰/۱۲ - ۰/۱۷	بستر جریان با هوادهی محافظت گردد
کوچکتر از ۰/۱۲	بستر جریان احتمالاً قابل محافظت در مقابل کاویتاسیون نبوده و باید طراحی جدید صورت گیرد.

۲ ۳ - راهکارهای کنترل کاویتاسیون

راهکارهای مختلفی جهت کنترل این پدیده توسط محققان پیشنهاد گردیده که از این میان می‌توان به تسطیح سطح جریان، افزایش فشار موضعی، کاهش سرعت جریان و افزایش مقاومت مصالح بستر جریان اشاره نمود. راهکارهایی همچون افزایش فشار و یا کاهش سرعت جریان در بسیاری موارد چاره ساز و امکانپذیر نمی‌باشد. از طرفی تسطیح سطح جریان و افزایش مقاومت بستر جریان در سرعت بالا کارساز نبوده و لذا در این شرایط هوادهی به عنوان راهی مطمئن و موثر همواره مورد توجه و مطرح نظر قرار گرفته است. این روش جهت جلوگیری از وقوع کاویتاسیون بخصوص در سرعت بالاتر از ۲۵

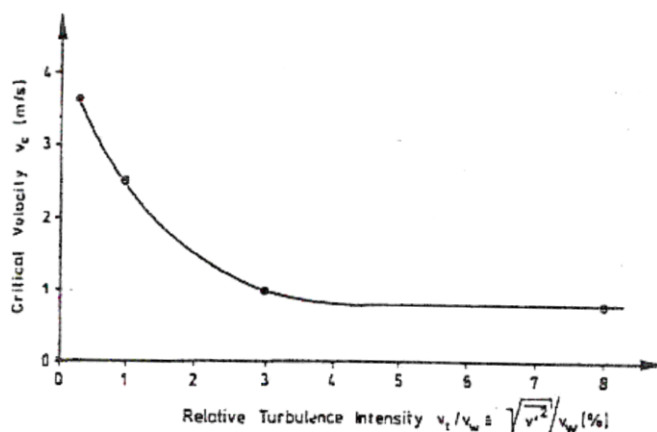
متر در ثانیه بسیار موثر خواهد بود. بحث هوادهی اولین بار توسط Peterka در ۱۹۵۳ مطرح گردید. وی آزمایشاتی بر روی یک ونتوری از جنس بتن با ایجاد شرایط کاویتاسیون انجام داد. مطالعات او نشان داد که با ورود ۱٪-۲٪ هوا به داخل جریان، تخریب ناشی از کاویتاسیون به مقدار زیادی کاهش یافته و با ورود ۶٪-۸٪ هوا به داخل جریان، تخریب ناشی از کاویتاسیون متوقف گردید. پس از انتشار نتایج آزمایش‌های وی، توجه محققان به کاربرد هوادهی در سازه‌های هیدرولیکی منعطف گردید. پس از کاربرد موفقیت آمیز هواده‌ها در سد Yellowtail کاربرد این روش در سازه‌های هیدرولیکی به عنوان یک روش نسبتاً آسان و ارزان مورد توجه بیشتر قرار گرفت.[5]

با ورود هوا به داخل جریان، تراکم پذیری آب افزایش یافته و لذا در صورتی که تنش‌های ناشی از کاویتاسیون بوقوع بپیوندد، انرژی قابل توجهی از آن مضمحل گردیده و اثرات کمی از آن به دیواره‌ها خواهد رسید. هوای موجود در کنار بستر همچنین مانع تماس مستقیم سیال به کف و وقوع پدیده جدائی خواهد گردید. مطالعات اخیر نشان داده که تزریق هوا به جریان باعث افزایش میانگین فشار و کاهش شدت نوسانات آن گردیده و لذا پتانسیل وقوع کاویتاسیون با اصلاح میدان فشار کاهش می‌یابد (Kavianpour 1997, 2000, 2003). [6][7] تزریق هوا به جریان که باعث کاهش ریسک وقوع کاویتاسیون می‌شود به دو صورت طبیعی و مصنوعی صورت می‌گیرد. هواگیری طبیعی معمولاً از روی سطح آب اتفاق افتاده و تابع شرایط هیدرولیکی جریان، ولی هوادهی مصنوعی با ایجاد موانع در مسیر جریان بوجود آمده و تابع پارامترهای هندسی و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد.

۴۲ - بررسی نحوه ورود هوا به جریان در مجاری

۴۲.۱. هواگیری طبیعی

هواگیری طبیعی معمولاً به دو صورت موضعی و سطحی مطرح می‌گردد. اطلاعات موجود در هواگیری موضعی وابسته به شرایط مختلف جریان آب و در محدوده آزمایشگاهی می‌باشد. پارامترهای موثر در هواگیری فوق شامل طول تماس هوا و آب، دانسیته ρ_w ، شتاب جاذبه و آشفتگی و شرایط هیدرولیکی جریان در محل تماس هوا و آب می‌باشند. ورود هوا در سطوح آشفته آب با ورود حجمهای کوچک هوا توسط گردابه‌های کوچک موجود در سطح آب در سرعت حدى انجام می‌گیرد که در ادامه توسط جریان آب به پایین دست حمل می‌شوند. چنانچه شدت نوسانات آشفتگی با جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت معرفی گردد، سرعت حدى جهت ورود هوا به جریان بر اساس مطالعات آزمایشگاهی برای جت‌های سقوطی مطابق نمودار شکل (۱-۲) در محدوده 0.8-1m/s تخمین زده شده است.



شکل ۱-۲: سرعت بحرانی برای ورود هوا در یک جت مدور (Ervin 1980)

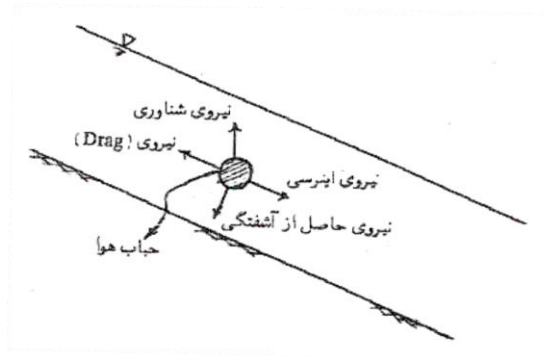
بر اساس مطالعات فوق میزان هوای وارد شده در جریانهای آشفته با اعداد رینولدز بالا مستقل از لزجت سیال بوده و به صورت تابعی از سرعت و چگالی سیال و شتاب جاذبه بیان گردیده و لذا رابطه‌ای بر اساس عمق آب و سرعت حدی در محل ورود هوا به فرم ضریب بی بعد هوادهی β که معرف نسبت دبی هواگیری q_{air} به دبی آب q_w می باشد ارائه شده است. با فرض ضریب ورودی K رابطه ارائه شده به فرم معادله (۲-۲) می باشد.

$$\frac{q_{air}}{q_w} = \beta = K.Fr^2 \quad (2-2)$$

در بحث هواگیری در سرریز سدها و پرش هیدرولیکی در کانالهای روباز نیز نسبت دبی هوای ورودی به دبی آب به صورت تابعی از اعداد فرود با نماها و ضرایب متفاوت بر اساس نتایج تجربی گزارش گردیده‌اند. در هواگیری سطحی، ورود هوا از سطح آزاد جریان به داخل سیال اتفاق می افتد. در جریان آشفته، میزان هوایی که بطور طبیعی وارد جریان می شود در تمام مقطع جریان به صورت یکنواخت توزیع نگردیده و با افزایش عمق از غلظت آن کاسته می شود. مطالعات تجربی نشان داده است که تامین حدود ۶٪ تا ۸٪ هوا در سطح بستر جریان لازم است تا هواگیری متوسط جریان تا حد ۲۵٪ تا ۳۰٪ صورت پذیرد.

از نقطه نظر هیدرولیکی چنانچه لایه مرزی آشفته به سطح آزاد آب رسیده و انرژی جنبشی ناشی از آشفتگی بر کشش سطحی غلبه نماید، هواگیری سطحی وقوع می یابد. پس از ورود حباب هوا به جریان، حرکت آن به طرف پائین تا زمان غلبه نیروی شناوری (Buoyancy) بر نیروی حاصل از آشفتگی جریان ادامه می یابد. در راستای جریان نیز دو نیروی اینرسی و مقاوم (drag) بر حباب اثر نموده و همچنین در طول مناسبی از مسیر جریان، با تعادل نیروی شناوری و آشفتگی میزان هوای

ورودی به جریان با مقدار هوای خروجی برابر می‌گردد. شکل (۲-۲) نیروهای وارد بر حباب هوا را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲: نیروهای وارد بر حباب هوا

در هواگیری سطحی، میدان حاصل در جهت عمود بر مسیر جریان در چهار ناحیه قابل طبقه بندی می‌باشد.

منطقه فوقانی (Upper Zone) که در آن سطح آب ناپیوسته و به صورت قطرات آب پراکنده در هوا می‌باشد این قطرات تا فاصله معینی بالای سطح معادل جریان آب بالا رفته که به جهت حجم اندک آب در این ناحیه در ملاحظات مهندسی از آن صرف نظر می‌گردد.

- منطقه اختلاط (Mixing Zone) که در آن سطح آب پیوسته بوده و دارای درصد بالای حباب هوا می‌باشد. میزان هوای ورودی به جریان و خروجی از آن، از این ناحیه عبور نموده و لذا امواج سطحی در این ناحیه قابل مشاهده می‌باشد. ارتفاع دیواره‌های جانبی کانال‌ها جهت جلوگیری از سرریز یا ریزش آب به بیرون از آن بر اساس ارتفاع حداکثر امواج سطحی در ناحیه فوق محاسبه می‌گردد.

- منطقه زیرین (Under Lying Zone) که حبابهای هوا در داخل آب به صورت پراکنده منتشر شده ولی امواج سطحی در آن نفوذ نمی‌نماید. توزیع غلظت هوا در این ناحیه تحت تاثیر

شدت آشفته‌گی و تغییرات آن در مسیر جریان می‌باشد و با توجه به تعداد و ابعاد حبابهای

موجود در ارتفاعهای مختلف برآورد می‌شود.

• منطقه بدون هوا (Air Free Zone) که در مجاورت کف کانال قرار دارد و هوا به آن نمی‌رسد،

در این تقسیم بندی قرار می‌گیرد. [8]

۲-۴-۲. هواگیری طبیعی در مجاری بسته

در مجاری بسته نیمه پر، جریان بصورت آزاد در نظر گرفته شده که هوا در فضای خالی بالای سطح آب جریان دارد و لذا مقدار هوای وارده به جریان از روابط مربوط به جریان روباز قابل برآورد می‌باشد. مقدار هوای جریان یافته در بالای سطح آب، مطابق رابطه (۳-۲) تابع مشخصات جریان آب و مجرای هوا می‌باشد:

$$Q_a = f(L, V, g, P, y_e) \quad (3-2)$$

در رابطه فوق L طول مجرا، P فشار، V سرعت متوسط آب و y_e عمق موثر آب (نسبت سطح مقطع جریان به پهنای بالایی جریان) می‌باشند. با استفاده از آنالیز ابعادی در رابطه (۳-۲) و استفاده از اعداد بی‌بعد رابطه (۴-۲) بدست می‌آید:

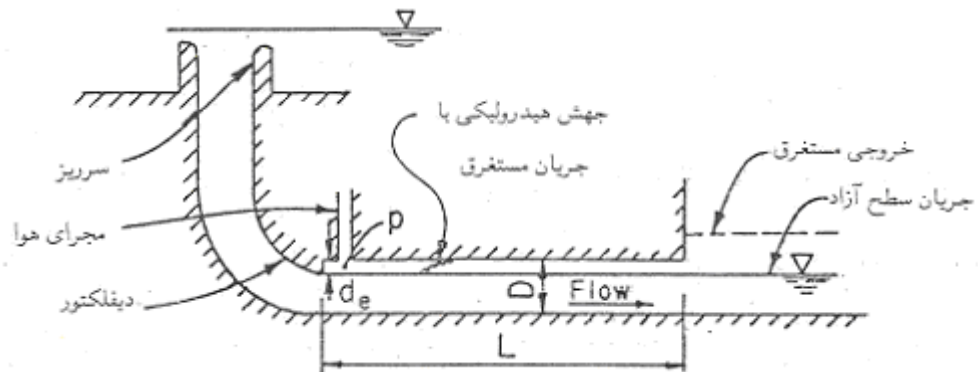
$$\frac{Q_a}{Q_w} = f\left(\frac{L}{y_e}, \frac{1}{Fr^2}, \frac{P/\gamma}{V^2/2g}\right) \quad (4-2)$$

رابطه بین این پارامترها برای هر هندسه مشخص به کمک مطالعات آزمایشگاهی قابل تعیین می‌باشد. تاکنون آزمایشات موفق‌تری که نتایج مشابهی بین مدل و نمونه واقعی ارائه نماید، توسط محققان انجام شده است. بعنوان مثال Harshbarger، Vigander و Hecker اندازه‌گیری‌هایی بر روی نمونه واقعی و مدل ۱:۲۰ آن از یک تونل دریچه دار با جریان سطح آزاد انجام دادند. [9] شکل (۳-۲) مدل

آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مطالعات فوق نشان داد که برای تخمین

میزان جریان هوا با استفاده از مدل، ضروری است که مجرای جریان هوا بالای سطح آب به دقت

مدلسازی گردد. پس از انجام آزمایشهای متعدد بر روی مدل، منحنی‌های تجربی تعیین میزان هوای جریان یافته در هواده مطابق شکل (۲-۴) که تاثیر ابعاد مجرای هوا را نشان می‌دهد، ارائه گردید. در نمودار ارائه شده سطح مقطع منشور آب A ، سطح مقطع مجرای آب A_d ، ارتفاع مانع هواده d_e ، عمق موثر آب y_e ، سرعت متوسط جریان V و فشار در انتهای مجرای هوا با p نشان داده شده است.



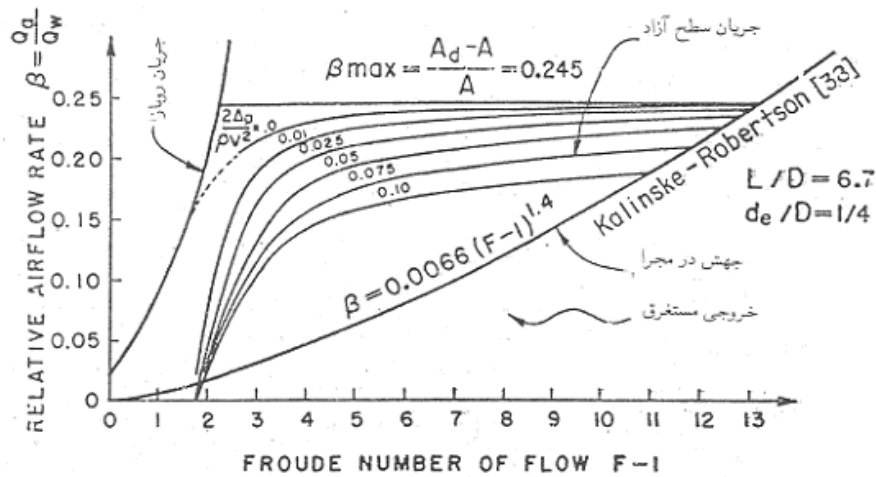
شکل ۲-۳ مدل و پارامترهای مورد استفاده در مطالعه تجربی هواده ها در مجاری بسته آزاد (سرریز Siroka) [10]

این محققان نشان دادند، چنانچه سرعت هوا در مجرای هواده کمتر از ۱۰۰ متر بر ثانیه بوده و رابطه $fL/4d \geq 4$ برقرار باشد، میزان هوای عبوری از مجرا با رابطه (۲-۵) بیان می‌شود:

$$Q_a = A_v \left\{ 2g \frac{\left(\frac{\rho_w}{\rho_a} \right) \left[\left(\frac{P_{atm}}{\gamma} \right) - \left(\frac{P_1}{\gamma} \right) + \Delta Z \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \right]}{\sum K_s + fL/4d} \right\}^{0.5} \quad (5-2)$$

که در آن A^1 سطح مقطع مجرا، L طول مجرا، A_v سطح مقطع مجرای هوا، f ضریب دارسی وایسباخ مجرای هوا، d شعاع هیدرولیکی مجرای هوا در واقعیت، K_e افت ورودی (معمولا $K_e=0.5$)، K_s افت موضعی در مجرا (تابع شکل مجرا)، P_1 فشار در خروجی مجرا و ΔZ اختلاف ارتفاع بین ورودی و خروجی مجرا می‌باشند.

^۱ واحد پارامترها بر حسب SI می‌باشد.



شکل ۲-۴: منحنی های تجربی تعیین میزان هوای جریان یافته در هواده

همچنین دبی حجمی آب نیز با توجه به ضریب آگذری مجرا C_d ، از رابطه ۲-۶ قابل محاسبه خواهد بود.

$$Q_w = C_d \cdot A \cdot [2g \times V^2 / 2g]^{1/2} \quad (۲-۶)$$

در نتیجه ضریب هوای جریان یافته β (نسبت دبی هوا به دبی آب) با صرف نظر از جمله $\Delta Z \cdot \rho_a / \rho_w$ بصورت رابطه (۲-۷) قابل بیان می باشد:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = \frac{A_v}{A} \left\{ \frac{\rho_w / \rho_a}{\sum K_s + fl/4d} \left[\frac{\left(\frac{P_{am}}{\gamma} \right) - \left(\frac{P_1}{\gamma} \right)}{V^2 / 2g} \right] \right\}^{0.5} \quad (۲-۷)$$

در این رابطه اولین عبارت سمت راست معرف خواص سیال، افت مجرا و هندسه هواده و دومین عبارت معرف فشار یا فرمی از عدد اولر می باشد. با استفاده از این معادلات، مشخصات مجرای داده

شده، روی نمودارهای جریان هوا و نقطه تقاطع بین دوسر نمودار، نرخ جریان هوا و فشار را برای یک مجرای هوا ارائه می‌دهد. اگر مقادیر بدست آمده رضایت بخش نباشد، مشخصات مجرا تغییر و مراحل فوق تکرار می‌گردد. [10]

۳ ۴ ۲ هواگیری مصنوعی در مجاری بسته

جهت کنترل جریان در مجاری بسته از دریچه‌های کشویی و یا شیرهای تحت فشار استفاده می‌شود. شیرها در انواع مختلف شامل پروانه‌ای، سوزنی و غیره ساخته و در مسیر خط مجرا و یا در انتهای آن مستقر می‌شوند. دریچه‌ها نیز که در دو فرم کشویی و قطاعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً در انتها و یا میانه تونل قرار داده می‌شوند. در صورت قرار گیری آنها در انتهای تونل، کل مجرا در هنگام بسته بودن دریچه تحت فشاری معادل فشار مخزن قرار گرفته و لذا باید از پوشش فلزی خاص بهره گیرند. بنابراین جریان قبل از دریچه از نظر هیدرولیکی تحت فشار ولی پس از آن به دلیل کاهش فشار و بالا بودن سرعت جریان عموماً آزاد می‌باشد. در این شرایط و جهت جلوگیری از کاویتاسیون از هوادهی جریان استفاده می‌گردد. گذشته از تمهیدات اشاره شده در پائین دست دریچه‌ها، توجه خاص باید به محل‌هائی که سطح مقطع جریان با تغییرات همراه است، معطوف گردد. در صورت نیاز به تبدیل باز شو یا تنگ شو، زاویه تبدیل بر اساس تابعی از عدد فرود تعیین تا خطر وقوع کاویتاسیون منتفی گردد. جهت کاهش ارتعاشات مخرب و کاویتاسیون، توصیه می‌گردد تا لبه بالادست، انحنادار و با شیب ۴۵ درجه به لبه پائین دست متصل شود.

یکی از مسائل مهم در طراحی دریچه‌های تونلهای آبگیر، تامین هوای مورد نیاز جریان در پایین دست آنها است، زیرا جریان خروجی از زیر دریچه به علت بار آبی زیاد از سرعت بالایی برخوردار خواهد بود. این سرعت بالا با کاهش فشار همراه بوده و در نتیجه ممکن است اندیس کاویتاسیون را بطور قابل ملاحظه کاهش و باعث افزایش پتانسیل وقوع کاویتاسیون گردد. همچنین افت فشاری که پایین دست دریچه ایجاد می‌گردد، باعث ارتعاش شدید سازه می‌شود. این ارتعاش به علت طبیعت غیرماندگار

منطقه کم فشار چرخشی حاصله در پایین دست دریچه می‌باشد. بنابراین برای جلوگیری از ارتعاش و کاویتاسیون لازم است که هوادهی مناسب در پائین دست دریچه تعبیه گردد. این هواده معمولاً به صورت مجرای هوا بوده که از طریق چاهک کنترل و دریچه با جو مرتبط می‌شود. سرعت بالای جریان پایین دست دریچه تونل‌ها منجر به ورود هوا در سطح آزاد و جریان یافتن هوا در فضای بالای آن می‌گردد. هواده‌ها ممکن است برای مقابله با کاویتاسیون در کف و دیواره تونل نیز قرار داده شود. بر اساس تحقیقات Robertson و Kafinske در سال ۱۹۴۳ چنانچه در پائین دست تونل پرش هیدرولیکی رخ داده و هوا از طریق پر هیدرولیکی وارد جریان شود، مقدار هوای ورودی به تونلها را بر اساس عدد فرود جریان از رابطه (۸-۲) برآورد می‌شود: [11]

$$1.5 \leq Fr_1 \leq 30 \quad \beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(Fr_1 - 1)^{1.4} \quad (8-2)$$

همچنین برای تونلهای با جریان آزاد Sharma در 1976 معادله (۹-۲) را پیشنهاد کرده است: [12]

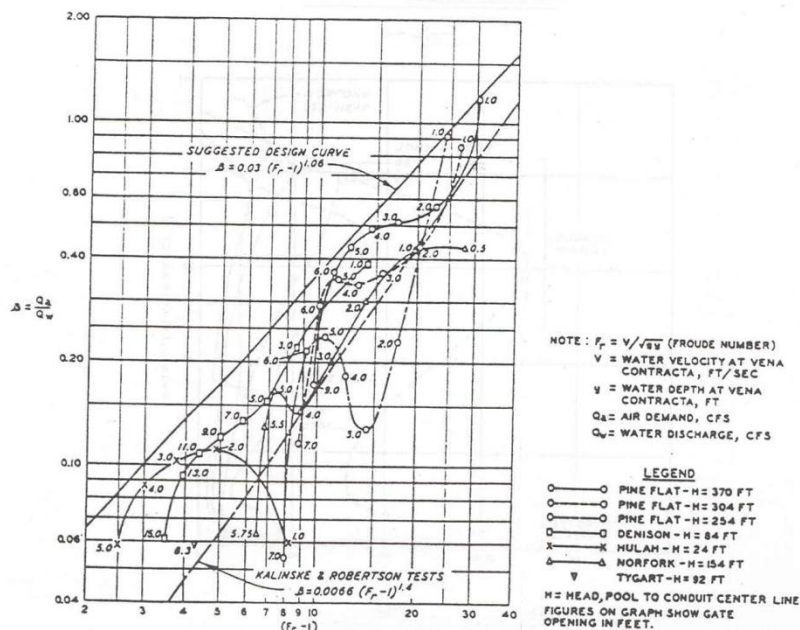
$$\beta = 0.09Fr_1 \quad (9-2)$$

در بازشدگیهای کم مشاهده می‌گردد که جریان به شکل پودر ظاهر شده و با افزایش مقدار β همراه می‌گردد. لازم به ذکر است که به دلیل کم بودن دبی آب در این شرایط، کل جریان هوا در مقایسه با حالت بازشدگی زیاد قابل توجه نمی‌باشد. گروه مهندسين ارتش آمریکا در سال ۱۹۶۴ آزمایشاتی بر روی سد Pine flat انجام دادند. خط مستقیم در شکل (۵-۲) یک فرض طراحی توصیه شده را نشان می‌دهد و پیشنهاد می‌کند که ماکزیمم ورود هوا در بازشدگی ۸۰ درصد رخ داده و کنترل گردد. منحنی توصیه شده برای محاسبه β مطابق رابطه (۱۰-۲) پیشنهاد گردیده است. در این رابطه عدد فرود بایستی بر اساس عمق موثر در مقطع کنترل برآورد گردد. [13]

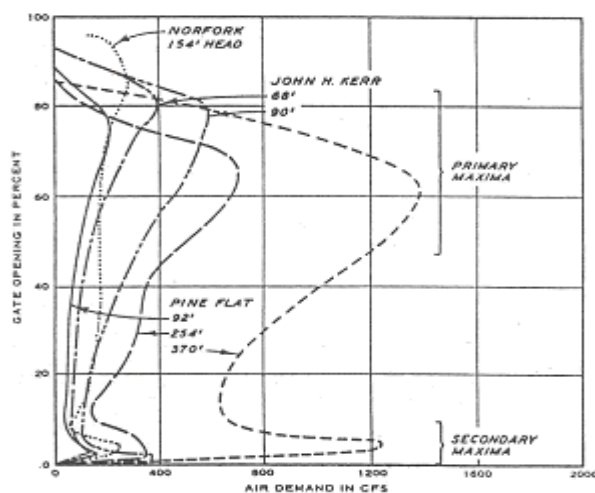
$$\beta = 0.03(Fr_1 - 1)^{1.06} \quad (10-2)$$

بر اساس مطالعات انجام گرفته توصیه می گردد که مجرای هوا برای سرعت کمتر از ۱۵۰ فوت بر ثانیه طراحی شود. به ازای سرعتهای بالاتر هوا، افت هد بالایی در مجرای هوا ایجاد گردیده و ممکن است باعث ایجاد افت فشار در مجرای هوا و وقوع کاویتاسیون در آن گردد.

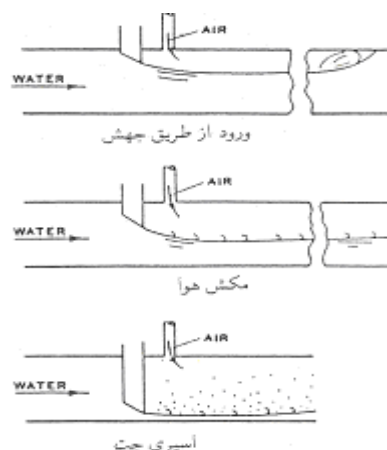
آزمایشات گروه مهندسين ارتش آمریکا نشان داد که مقدار هوای ورودی نسبت به بازشدگیهای مختلف دریچه متفاوت می باشد. نمودار شکل (۲-۶) مقدار هوای ورودی را برای انواع بازشدگی دریچه در چند هد مختلف مشاهده شده در سدهای فوق، نشان می دهد. در کنار نمودار فوق شرایط جریان در پایین دست دریچه برای بازشدگی مختلف نیز نشان داده شده است. در بازشدگی های کم (۰.۵٪) جت آب شکسته و مقدار زیادی هوا وارد جریان می شود. با افزایش بازشدگی، ورود هوا سریعاً کاهش یافته ولی در بازشدگی بین ۰.۵٪ تا ۱.۰٪ دوباره افزایش یافته تا به یک حداکثر ثانوی، قبل از پر شدن تونل می رسد. در این فاز، ورود هوا ناشی از نیروی کششی (Drag) بین سطح آب و هوای بالای آن می باشد. در بازشدگی های بزرگتر پرش هیدرولیکی تشکیل و ورود هوا تابع ظرفیت جهش برای ورود هوا به جریان بوده و چنانچه تونل بصورت پر عمل نماید، دبی هوای ورودی صفر می شود.



شکل ۲-۵: هوادهی جریان در تخلیه کننده های تحتانی



	CONDUIT		AIR VENT	
	LENGTH, FT	SIZE, FT	LENGTH, FT	DIAMETER, FT
JOHN H. KERR	117	5.67 x 10	90	2.50
NORFORK	195	4 x 6	188	1.67
PINE FLAT	334	5 x 9	320	2.50



شکل ۲-۶: مقادیر ماکزیمم اولیه و ثانویه ورود هوا در تاسیسات خروجی تنظیم کننده

همچنین Levin در سال ۱۹۶۵ با آنالیز اطلاعات بدست آمده از مطالعات قبلی رابطه (۲-۱۱) را جهت برآورد هوادهی در پائین دست دریچه‌ها پیشنهاد می‌نماید:

$$\beta = G \left[\left(\frac{2H}{d_1} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2-11)$$

که در آن H کل هد بالا دست دریچه و d_1 عمق جریان در مقطع کنترل پایین دست دریچه می‌باشد. چنانچه H بسیار بزرگتر از d_1 باشد، عبارت $(2H/d_1)^{1/2}$ معادل Fr_1 خواهد بود. برای تونل مدور با شیارهای مناسب، G بین ۰/۲۵ تا ۰/۴۰ و چنانچه از تبدیل تدریجی از مقطع مستطیلی به مقطع مدور استفاده گردد، G بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ توصیه می‌شود. اگر تبدیل تدریجی نبوده و جدایی جریان در تونل رخ می‌دهد، پیشنهاد شده که G بین ۰/۰۸ تا ۰/۱۲ در نظر گرفته شود. یکی دیگر از روابط پیشنهادی در تعیین دبی جریان هوا در هواده‌ها، توسط cuttormen-Lycn و به صورت تابعی از افت فشار به فرم معادله (۲-۱۲) بیان شده است:

$$Q = 28 m_a A_a \left(\frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{1/2} \quad (12-2)$$

$$m_a = \left[\Sigma \xi + \left(\frac{f L_a}{4 R_a} \right) \right]^{-1/2} \quad (13-2)$$

که در آن $\Sigma \xi$ مجموع ضرایب افت‌های موضعی، f ضریب اصطکاک در معادله دارسی و ایسباخ، L_a طول مجرای هوا، A_a سطح مقطع مجرای هوا و R_a شعاع هیدرولیکی می‌باشند. در بازشدگیهای کوچک دریچه‌ها عموماً جریان اسپری قابل توجهی تشکیل می‌گردد و لذا ورود هوا با شدت بیشتری صورت می‌گیرد. برای محاسبه ورود هوا در این شرایط رابطه (۲-۱۴) پیشنهاد شده است:

$$\beta = 0.024 (Fr_1 - 1)^{1.4} \quad 20 \leq Fr_1 \leq 60 \quad (14-2)$$

بالاترین مقدار β به دلیل تشکیل اسپری در بازشدگی ۵٪ تا ۱۰٪، اندازه‌گیری و گزارش شده که مقادیر حد بالای آن با رابطه (۲-۱۵) توسط cuttormen-Lycn در ۱۹۷۱ تعریف گردیده است:

$$\beta \leq 1.2 \left(\frac{S}{A} \right)^{-0.2} - 1 \quad (15-2)$$

در رابطه فوق S سطح بازشدگی دریچه و A سطح مقطع تونل می‌باشد.

کاویانپور در سال ۱۹۹۹، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۳ مطالعاتی بر روی مدل‌های فیزیکی چندین تخلیه‌کننده تحتانی سدهای مختلف در حال ساخت انجام و در نهایت دو نمودار حد بالا و حد پائین جهت ارزیابی هوای مورد نیاز در پائین دست دریچه‌های تحتانی ارائه نمود. معادلات پیشنهادی ایشان برای دو حد

بالا و پائین در معادلات (۲-۱۶) و (۲-۱۷) ارائه شده است. [6] [7]

$$\beta = 0.18 (Fr - 1)^{0.75} \quad \text{Upper Limit} \quad (16-2)$$

$$\beta = 0.0012 (Fr - 1)^{1.39} \quad \text{Lower Limit} \quad (17-2)$$

بر اساس مطالعه ایشان، اختلاف قابل توجهی بین نتایج این محققان دیده می شود. این امر نشان دهنده عدم قطعیت بالا در روابط یاد شده می باشد که بعضا طراح را مجبور به انتخاب هوادهایی به ابعاد بزرگ می سازد. این گزینه در شرایطی که محدودیت فیزیکی و اقتصادی مطرح باشد، طراح را با انتخاب مشکلی روبرو ساخته و ضرورت نیاز به یک روش مطمئن و قابل اعتماد را آشکار می نماید.

۲ ۵ - تحلیل جریان دو فازی

در ارتباط با تحلیل جریان دوفازی آب و هوا و روش های حل معادلات حاکم بر آن تئوری جامعی که بر آن اتفاق نظر بوده و بیانگر مکانیزم شکل گیری، اثرات و روش های جلوگیری یا کاهش پدیده باشد، هنوز ارائه نگردیده است. در هر حال محققین مختلف با انجام بررسی های تئوریک و آنالیزهای عددی و یا کاوش های تجربی به مسائل موجود نظیر رفتار جریان، شرایط مرزی، تاثیر لزجت و کشش سطحی، تاثیر هندسه سازه و تغییرات زمانی پدیده پرداخته اند. در ارتباط با موضوع جریان دوفازی آب و هوا در سازه های هیدرولیکی نظیر تونل های تحت فشار، خطوط انتقال آب، آبگیرهای تحتانی، کالورت ها و فاضلابروها مطالعات جامعی موجود نیست. همچنین با توجه به اینکه در ارتباط با وقوع جریان دوفازی در سازه های فوق معیار یا راهنمای طراحی موجود نمی باشد، طراح تامل و حساسیت زیاد در این رابطه اعمال نموده و عموماً طرح سیستم با ضریب اطمینان بالا همراه است. در بحث مطالعات انجام شده، مقالات متنوعی قابل حصول است، اما بررسی اهم مقالات در سال های اخیر در مجلات معتبر برای جریان دوفازی در این قسمت مورد ارزیابی قرار می گیرد.

آلیوتو و همکاران (۱۹۹۷) به مطالعه خصوصیات هیدرولیکی تخلیه کننده پرداختند. این خصوصیات شامل کانال دسترسی، نسبت عمق انتهایی، ضریب دبی میانگین، عمق پایاب و افت هیدرولیکی در طول تخلیه کننده می باشد. ایشان توزیع سرعت در خروجی را مورد بررسی قرار دادند و حدود یکصد آزمایش برای بررسی فرود بالادست جریان صورت دادند. [14]

در داخل تونل تخلیه کننده تحتانی در سال ۲۰۰۰، مطالعات آزمایشگاهی توسط Hager و Speerli و انجام و نتایج آن ارائه گردید که مرجع بسیاری از مطالعات بعد می باشد [3]. در این مقاله مدل فیزیکی تونل تخلیه کننده تحتانی به طول ۲۱ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۳ متر با دریچه کنترل از نوع کشویی همراه با لوله هوادهی به قطر ۰/۱ متر در ابتدای تونل پایین دست مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل در بین مدل های هیدرولیکی ساخته شده اخیر از ابعاد هندسی بزرگتری برخوردار بوده و همچنین روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه پروفیل سطح آب درون مجرا و غلظت هوا در آن ارائه می کند. هدف اصلی نویسندگان از انجام این مطالعه بررسی تاثیر طول تونل پایین دست بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان می باشد. مدل تخلیه کننده فوق فاقد پله جهت هوادهی دیوارها است. هد و بازشدگی کوچک و جریان از آشفتگی کمتری برخوردار است. غلظت هوا نیز عموماً مربوط به عمق نسبی بالای ۵/ می باشد.

در سال ۲۰۰۲ Babaeyan-Koopae مدل سرریز سیفونی سد Brent را مورد بررسی قرار دادند که به دلیل سیلاب تخریب شده بود. هدف از این تحقیق بررسی دلایل تخریب در اثر سیلاب عبوری و بازسازی مجدد آن می باشد. مدل در دو مرحله مورد بررسی قرار گرفت که در مرحله اول بر روی هوادهای و در مرحله دوم مکانیزم ورود هوا مورد مطالعه قرار گرفت. در سال ۲۰۰۳ Boes مطالعه آزمایشگاهی بر روی یک مدل با مقیاس بزرگ سرریز پلکانی بر اساس معیار تشابه سازی فرود انجام داد. غلظت هوا اندازه گیری و میانگین غلظت هوا در مقاطع مختلف بر اساس فاصله از سرریز ارائه شد [15]. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۰۳ Boes مطالعه آزمایشگاهی بر روی سرریز پلکانی به کمک سیستم پردازش تصویر انجام داد. در این مطالعه غلظت هوا با هدهای مختلف در ۱۲ مقطع مختلف در طول سرریز انجام و نتایج با استفاده از مدل عددی شبیه سازی و مقایسه گردید [16].

سلیمان زاده و شمسایی (۱۳۸۵) به حل عددی جریان آب و هوا در تخلیه کننده تحتانی پرداختند و میزان نیروی وارده بر دریچه را در دو حالت هوادهی و عدم هوادهی مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند.

همچنین بررسی هایی نیز در زمینه نسبت ورودی به مجرا، اندیس کاویتاسیون، میانگین غلظت هوا و توزیع محوری هوا در عمق مجرا صورت دادند [17].

معظمی در ۱۳۸۶ مطالعه ای در زمینه بررسی عددی جریان دوفازی آب و هوا در تخلیه کننده های تحتانی انجام داد که عمده کار ایشان مقایسه نتایج آزمایشگاهی مدل آقایان هگر و اسپرلی بر روی جریان آب و هوا بوده است و همچنین تأثیر هوادهی جریان در کاهش فشارهای منفی پشت دریچه نیز مورد بررسی قرار گرفتند. [18]

نجفی و همکاران (۲۰۰۸) به مدل سازی عددی تخلیه کننده تحتانی پرداخته و میزان دبی و هوای عبوری از مجرای هواده پایین دست دریچه را مورد بررسی قرار دادند. ایشان همچنین میزان توزیع فشار در محل دریچه را مورد محاسبه قرار دادند. [19]

حسینی و همکاران (۱۳۸۸)، مدل فیزیکی مجرای تخلیه کننده و دریچه های سرویس و اضطراری سد نرمانشیر را مورد مطالعه قرار دادند و پس از انجام یکسری آزمایشات بر روی آن، و اندازه گیری مقادیر هد فشار در نقاط مختلف و میزان آبگذری دریچه به بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون پرداختند. [20] ایشان همچنین در ۱۳۸۹، با اندازه گیری فشار در پیژومترهای واقع بر روی دریچه ها، به اندازه گیری و مطالعه نیروها و ارتعاشات وارد بر دریچه ها در بازشدگی های مختلف پرداختند [21].

نوذری در ۱۳۸۸ به بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان دو فازی در تونل تخلیه کننده سد پرداخت. مدل آزمایشگاهی سد گتوند در تحقیق مذکور مورد بررسی قرار گرفت و همچنین مدل عددی با استفاده از نرم افزار Fluent ساخته و اجرا شد. در تحقیق ایشان برای اندازه گیری غلظت جریان در مدل آزمایشگاهی از دستگاه پراب نوری یا اپتیک استفاده گشت. مدل عددی Fluent توانست نتایج مناسبی در راستای مدل سازی غلظت جریان ارائه کند. [22]

در سال ۱۳۸۹ حسینی و کاویانپور به بررسی خصوصیات جریان دو فازی بر روی سرریز پلکانی با استفاده از نرم افزار FLUENT پرداختند. در آن مطالعه با مدل سازی عددی سرریز پلکانی سد سیاه بیشه و با استفاده از روابط بدست آمده توسط Bose , Hager نتایج حاصل از نرم افزار FLUENT مورد صحت سنجی قرار داده و با مدل های مختلف آشفتگی که در نرم افزار موجود است، نشان دادند که مدل آشفتگی RSM در توزیع غلظت جریان بر روی سرریز و سرعت جریان تطابق بسیار زیادی با روابط Boes , Hager دارد [23]. مشتاقیان و کاویانپور الگوی جریان بر روی سرریز پلکانی با شیب متوسط را با استفاده از مدل آشفتگی RSM و مدل MIXTURE برای حل جریان دو فازی آب و هوا مورد بررسی قرار دادند و نتایج مدل عددی را با نتایج آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه کوئزلند استرالیا که در سال ۲۰۰۵ توسط Chanson و همکارانش انجام شده بود مقایسه نمودند.[24]

امامی و کاویانپور (۱۳۹۰) با استفاده از نرم افزار FLUENT به بررسی عددی تأثیر ورود ذرات معلق غیرچسبنده در جریان در تخلیه کننده های تحتانی سد سفیدرود پرداختند. در آن مطالعه مدل عددی فوق به کمک نتایج مدل فیزیکی تخلیه کننده تحتانی سد سفید رود کالیبره شده که نتایج قابل قبولی را ارائه داد. سپس مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای جریان سه فازی رسوب و آب و هوا استفاده گردید و تأثیر درصد رسوب جریان بر میدان فشار و تأثیر هوادهی بر آن مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان دهنده تأثیر غلظت رسوب موجود در آب بر میدان جریان داشته که نتایج حاصل در سد سفیدرود ارائه گردید [25].

غزالی و همکاران در ۱۳۹۰ با استفاده از نرم افزار Fluent به بررسی جریان در تخلیه کننده های تحتانی با نسبت های عمق به عرض مختلف پرداختند. مدل فوق بر اساس نتایج آزمایشات مدل تخلیه کننده تحتانی سد جگین کالیبره شد. نتایج حاصل نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل عددی در پیش بینی میدان فشار در مجرای فوق بود. سپس با تغییر عرض و عمق مجرا و اجرای مدل، ملاحظه

گردید که نسبت عرض به عمق تاثیر به سزائی بر عملکرد هوادهی جریان در پائین دست دریچه های تحتانی دارد و لذا نسبت مناسب برای حداکثر هوادهی معرفی گردید [26].

در سال ۹۰ منظمی در پایان نامه خود با عنوان " بررسی عددی و آزمایشگاهی تاثیر شکل لبه دریچه بر میدان جریان پایین دست دریچه های تحتانی " اقدام به بررسی میدان فشار و سرعت و پروفیل جریان بعد از دریچه های تحتانی پرداخته است.[27]

فصل سوم

۳ - فصل سوم : معرفی مدل آزمایشگاهی

۳ - اصول طراحی

انتخاب مقیاس مدل باید به گونه‌ای 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 مدل‌های 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 مدل‌ها بخوبی می‌توانند حرکت سیال را شبیه‌سازی نمایند. [28]

مدل مجرای تخلیه‌کننده عمقی سد مخزنی ژاوه شامل لوله ورودی مجرا به قطر ۹/۵ متر، تبدیل‌ها، لوله به قطر ۵/۵ متر، شیارهای دریچه اضطراری و سرویس، اتاقک‌های دریچه اضطراری و سرویس، مجرای میانی، هواده‌های بین دو دریچه، دریچه‌های سرویس و اضطراری، بازشدگی، هواده و همچنین کل مجرای پایین دست دریچه سرویس همراه با شیب معکوس انتهایی با جزئیات کامل مطابق نقشه‌های ارائه شده بوسیله مهندس مشاور طرح، با مقیاس ۱:۱۰ از جنس ورق شفاف (پلگسی گلاس) و در قسمتهایی از فلز ساخته شده است. به منظور تامین ارتفاع آب لازم و دبی مورد نیاز، از یک مخزن روباز فلزی استفاده شد. این مخزن به شکل استوانه بوده و مطابق عکس شکل شماره (۳-۱) 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 می‌باشد. مخزن به وسیله چهار پمپ به ظرفیت هر یک ۲۵۰ لیتر بر ثانیه تغذیه می‌گردد و برای آرام ساختن جریان و جلوگیری از تلاطم آب ورودی به مخزن از صفحات مشبک انرژی‌گیر استفاده می‌شود. [29]

به منظور تامین شرایط هیدرولیکی مجرا دهانه شیپوری شکل ورودی از جنس ورق شفاف با مقطع مربع به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتیمتر در ابتدا تا مقطع ۱۶×۱۱ سانتیمتر در انتها ساخته و در قسمت ورودی نصب شد. این قسمت درون کالورت مربع شکل به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتیمتر و به طول تقریبی ۳ متر قرار

گرفته و بداخل مخزن متصل می‌گردد. تعداد کافی پیزومتر برای اندازه‌گیری افت ورودی بر روی آن در این قسمت نصب گردید. در عکس شماره (۳-۲) و (۳-۳) مقاطعی از دهانه زنگوله‌ای دیده می‌شود.

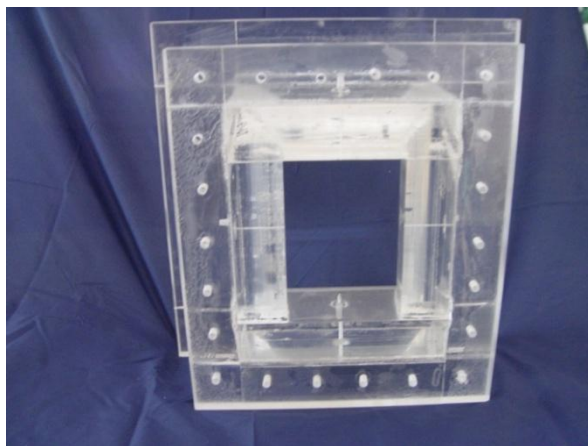
[29]



شکل ۳-۱: نمایی از مخزن تامین هد مدل

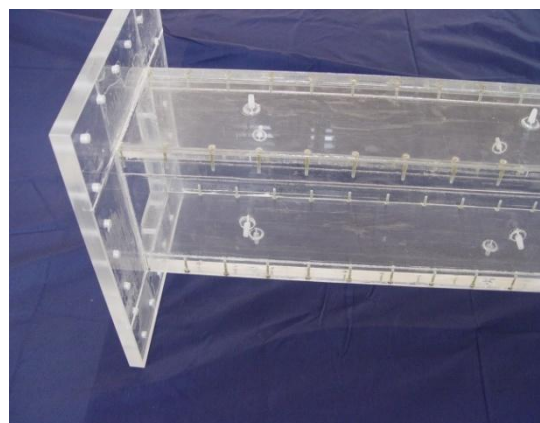
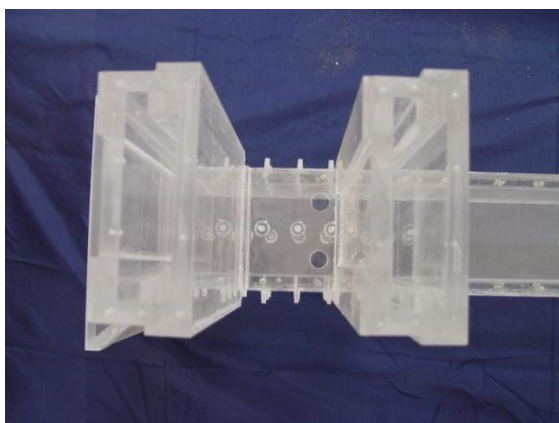


شکل ۳-۲: نمایی از دهانه زنگوله‌ای



شکل ۳-۳: نمایی از ورودی دهانه زنگوله‌ای

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 (عکس شکل شماره ۳-۴).

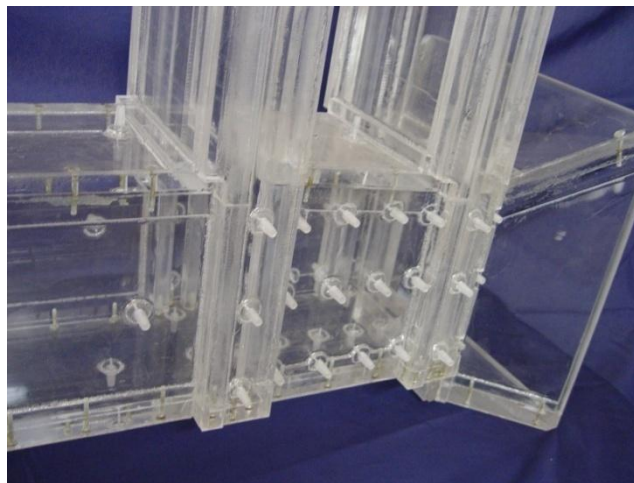


شکل ۳-۴: (مقطع و پلان) نمایی از مجرای بالادست دریچه اضطراری

به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری فشارهای وارد بر دریچه در تخمین نیروها و تحلیل ارتعاشات احتمالی شیار دریچه اضطراری، اتافک 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 پیزومترهایی در نقاط بحرانی نصب شده است. برای

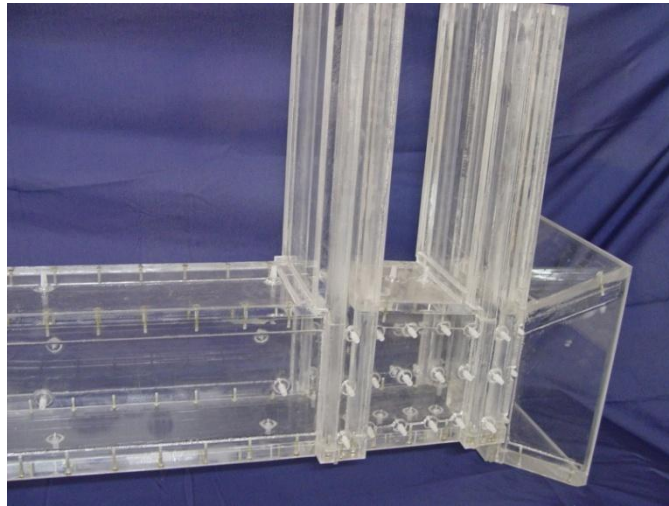
اندازه‌گیری سرعت هوا در لوله هواده نیز پیزومتری روی آن نصب شده است. در عکس شماره (۳-۵)

محدوده شیار و اتاقک دریچه اضطراری دیده می‌شود.[29]

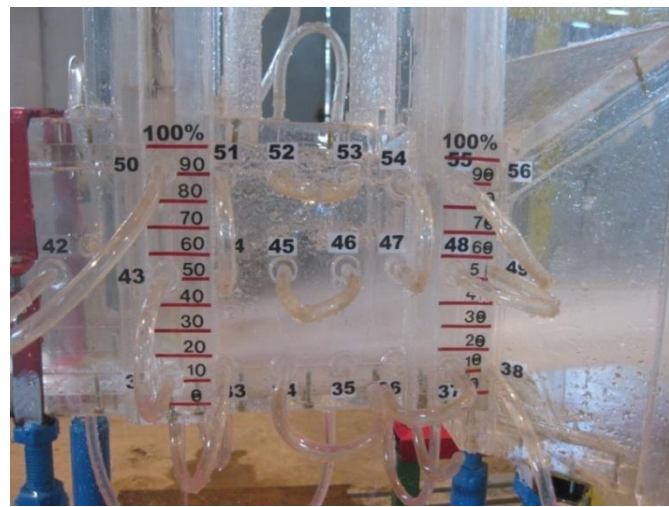


شکل ۳-۵: (مقطع و پلان) نمایی از شیار و مجرای پایین دست دریچه اضطراری

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). تقویت کننده‌های 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 پیزومتر روی دریچه تعبیه و تمام این پیزومترها به شلنگ‌های رابط، محکم متصل و از طریق فضاهاى باز داخل دریچه به بیرون هدایت و با اتصال به مانومترهای قائم، فشار نقاط فوق برداشت گردیده است. در عکس شکل شماره (۳-۶) نمای بالادست دریچه اضطراری و در عکس شماره شکل (۳-۷) مقطع راست دریچه دیده می‌شود.[29]

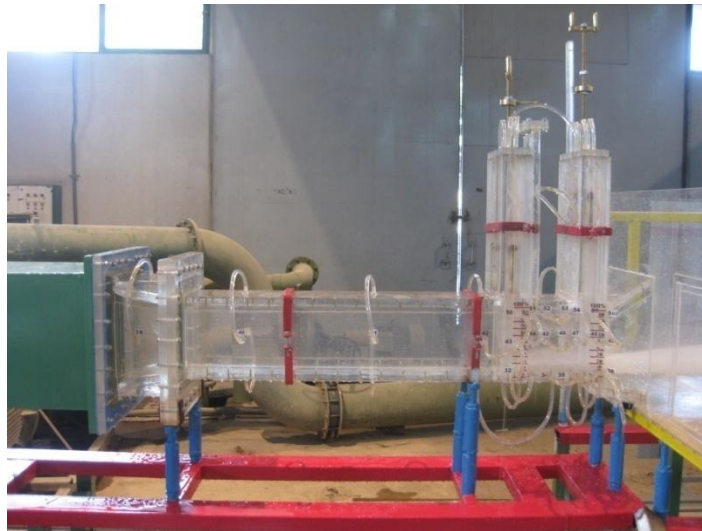
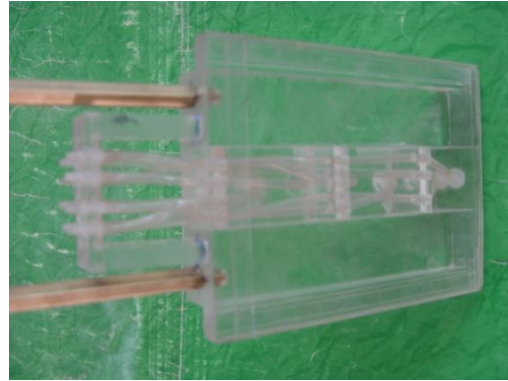


شکل ۳-۶: نمایی از بالادست دریچه اضطراری



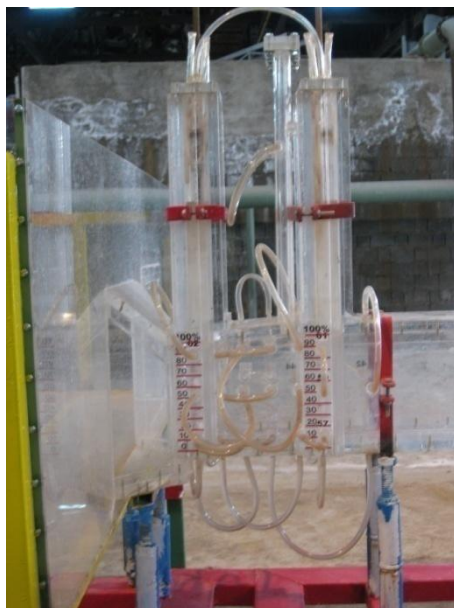
شکل ۳-۷: (مقطع و پلان) دریچه اضطراری

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 (عکس شماره ۳-۸).



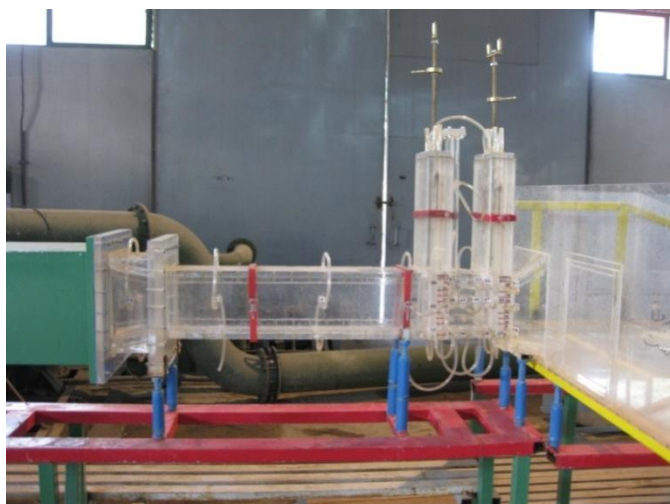
شکل ۳-۸: (مقطع و پلان) نمایی از دریچه سرویس

در قسمت خروجی مجرای تخلیه کننده، 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 پائین دست می‌باشد که عبور هوا به داخل مجرا را بهتر مدل نماید (عکس شکل شماره ۳-۹)، [29].



شکل ۳-۹: نمایی از مقطع خروجی

در قسمت‌هایی همچون اتصال مدل به مخزن، در فلانچ‌ها و اتصالات قسمت‌های مختلف مدل برای آب‌بند نمودن از لاستیک اسفنجی فشرده و در صورت لزوم از چسب آکواریوم استفاده می‌شود. برای آب‌بند نمودن سطوح تماسی دریچه با تکیه‌گاهها نیز از درزگیر لاستیکی فشرده با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین جهت جلوگیری از تغییر شکل احتمالی مدل که غیرمستقیم بر نتایج آن تاثیر می‌گذارد، از تسمه‌های محکم (دور مدل قرار گرفته) استفاده شد و در اتصالات مدل نیز از تعداد متنابهی پیچ ظریف و چسب آکواریوم جهت تقویت این اتصالات استفاده گردیده است (عکس شماره ۳-۱۰).



شکل ۳-۱۰: نمایی از فلانچها و اتصالات مدل

۳-۴ - ابزارهای اندازه‌گیری

به منظور اندازه‌گیری مقادیر متوسط فشار، از تعداد متنابهی پیزومتر استفاده می‌گردد. در مدل تخلیه‌کننده تحتانی سد مخزنی ژاوه ۱۸۰ پیزومتر جهت اندازه‌گیری فشار در م‌کان‌های مختلف مجرا شامل ورودی، بدنه دریچه‌ها، شیرهای دریچه، دیواره‌ها، کف تونل پایین دست 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 نشان دهنده احتمال جدایی جریان، افت فشار و رخداد پدیده کاویتاسیون باشد، انتخاب گردیده است.

ارتفاع آب موثر در مخزن توسط پمپ های ورودی و شیرهای تخلیه خروجی مخزن قابل تنظیم می‌باشد. اندازه‌گیری هد مورد نظر با استفاده از یک مانومتر قائم متصل به مخزن مطابق عکس شکل شماره (۳-۱۱) 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. [29]



شکل ۳-۱۱: نمایی از مانومتر قائم متصل به مخزن برای اندازه‌گیری ارتفاع آب مخزن

سرعت هوا در داخل برج‌های هواده، در سه نقطه در یک مقطع در داخل داکت های چپ و راست هواده با استفاده از دستگاه Hot Wire، به ازاء دبی‌های مختلف و باز شدگی های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری سرعت هوا در نقاط مختلف در داخل برج‌های هواده‌ی به منظور دستیابی به یک میزان متوسط سرعت در داخل داکت صورت می‌پذیرد. هدف از اینگونه اندازه‌گیری افزایش دقت اندازه‌گیری سرعت هوا در داخل داکت است. عکس شکل (۳-۱۲) نشان دهنده دستگاه Hot Wire

است. [29]



شکل ۳-۱۲: نمایی از یک دستگاه Hot wire جهت اندازه‌گیری سرعت هوا

۳۳ - خطاهای اندازه‌گیری در مدل

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 قسمت‌های مختلف توسط دوربین نیوو (ترازیاب) انجام می‌پذیرد. دقت اندازه‌گیری توسط قرائت دوربین با نشانه‌روی به خط‌کش مخصوص که تا حد میلی‌متر مدرج شده است، معادل $\pm 0/5$ میلی‌متر در مدل ($\pm 12/5$ میلی‌متر در نمونه واقعی) می‌باشد. لذا سعی می‌شود تراز قسمت‌های مختلف مدل تا دو رقم اعشار انعکاس یابد.

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 $\pm 0/1$ میلی‌متر می‌باشد. حال چنانچه خطای انسانی را برای عدم انطباق دقیق سوزن اشل با سطح آب در نظر بگیریم، میزان دقت را می‌توان $\pm 1\text{mm}$ در مدل ($\pm 25\text{mm}$ در واقعیت) 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 $\pm 1\text{mm}$ در مدل و در جریان‌های نوسانی نظیر جریان در کانال‌های جانبی و حوضچه‌های آرامش، این خطا می‌تواند تا حد $\pm 5\text{mm}$ در مدل ($\pm 125\text{mm}$ در واقعیت) بالغ گردد.

خطای اندازه‌گیری سرعت بستگی به شرایط جریان در نقاط مختلف دارد. در جریان یک بعدی، سرعت با لوله پیتو اندازه‌گیری می‌شود. سرعت جریان اندازه‌گیری شده توسط لوله پیتو، توسط رابطه

$$V = C\sqrt{2gh}$$

تعیین می‌گردد که در آن h اختلاف ارتفاع آب در لوله‌های پیتو می‌باشد. با

مشتق‌گیری رابطه فوق نسبت به h ، رابطه $\Delta V = \frac{Cg\Delta h}{\sqrt{2gh}}$ حاصل می‌شود. که با تقسیم دو

رابطه، رابطه جدید $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta h}{2h}$ بدست خواهد آمد. مقدار $\Delta h = \pm 1 \text{ mm} = \pm 0.001 \text{ m}$ می باشد.

برای سرعت‌های حدود ۱/۵ متر بر ثانیه در مدل، چنانچه $C = 1$ باشد، مقدار h در لوله پیتو معادل ۱۱ سانتیمتر (۰/۱۱ متر) تعیین می گردد. پس:

$$\frac{\Delta V}{1.5} = \frac{\pm 0.001}{2 \times 0.11} \rightarrow \Delta V = \pm 0.0068 = \pm 0.68\%$$

یعنی دقت اندازه‌گیری سرعت در مدل ، $\pm 0.0068 \text{ m/s}$ (در واقعیت) خواهد بود. در مناطق با سرعت کم، مانند کانال تقرب سرریز و محدوده پایاب، سرعت جریان توسط دستگاه مولینه اندازه‌گیری می‌شود که دقت اندازه‌گیری با آن در حدود $\pm 0.05 \text{ m/s}$ در مدل ($\pm 0.25 \text{ m/s}$ در واقعیت) است. [29]

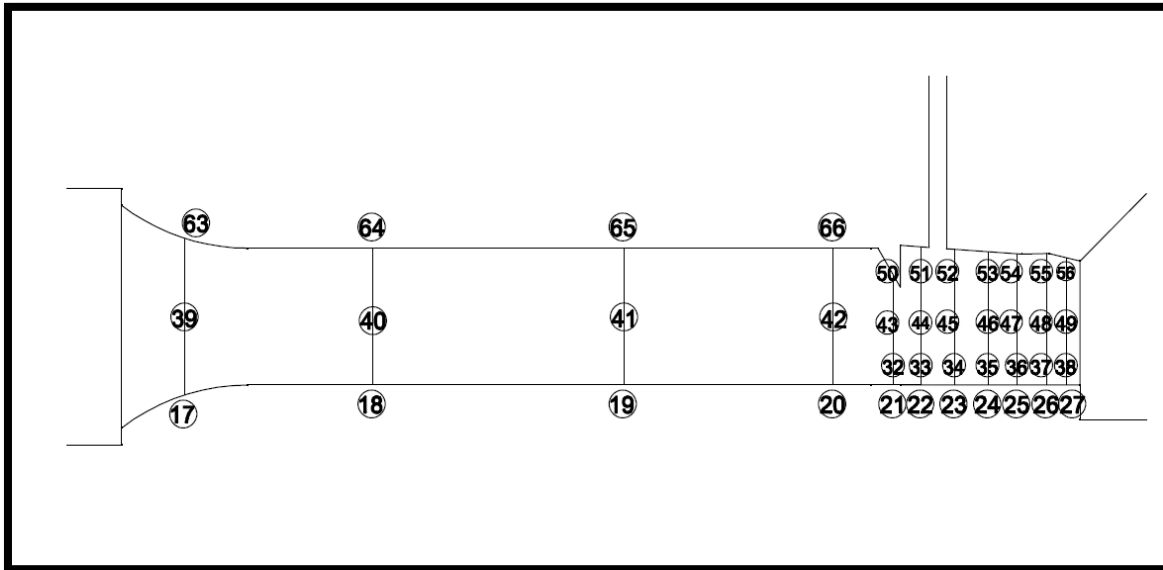
۳ ۴ - انجام آزمایش

همانطور که قبلاً گفته شد در این مدل دو دریاچه وجود دارد که برای این پایان نامه از دریاچه ابتدایی برای تحقیقات استفاده شده است. علت انتخاب این دریاچه وجود هواده بعد از آن است. این دریاچه دارای زاویه لبه $22/5$ درجه می باشد. قبل از آنکه آب درون مدل جاری شود ابتدا دریاچه برای باز شدگی مورد نظر باز می شود. میزان درصد باز شدگی مورد نظر توسط شاخص در کنار دریاچه مشخص شده است. در این پایان نامه برای مدل فیزیکی از باز شدگی های 30% و 50% و 70% و 90% استفاده شده است. بعد از تنظیم باز شدگی دریاچه مخزن تأمین هد از آب پر می شود. بدین منظور آب از طریق کانال هایی که در داخل سالن های آزمایشگاه تعبیه شده، منتقل می شود. این کانال ها آب استفاده شده در آزمایش را دوباره به مخازن تأمین هد آب هدایت می کنند. برای رساندن آب به داخل مخزن و همچنین رساندن هد آب به میزان مورد نظر برای انجام آزمایش از پمپ آب الکتریکی استفاده می شود. در آزمایش هایی که برای این پایان نامه انجام شده است از هد های 2 و 3 و 4 و 5

متر استفاده گردیده است. که برای رساندن آب به ارتفاع های پایین تر یک پمپ و برای ارتفاع های بالاتر از دو پمپ استفاده شده است.

برای قرائت پیزومتر های فشار که بر روی بدنه مدل تعبیه شده است باید تراز آب ثابت باقی بماند. برای رسیدن به یک تراز مشخص از شیر BYPASS استفاده می شود که همچون تونل خروجی عمل می کند. باید به مقداری این دریچه باز شود که در هد مورد نظر میزان دبی آب ورودی توسط پمپ ها با مجموع دبی خروجی از زیر دریچه و دبی خروجی شیر BYPASS برابر شود. بدین منظور همواره باید به میزان ارتفاع آب درون مخزن توجه کرد تا از ارتفاع معین بالاتر یا پایین تر نرود و در صورت بالاتر رفتن آب از هد مورد نظر دریچه BYPASS باز شود و یا بالعکس. یکی از علل مهمی که باعث می شود نتوان به طور کامل مقدار تراز آب را ثابت نگهداشت، عدم کارکرد مناسب پمپ هاست. با کارکرد بیشتر پمپ و گرم شدن آن مقداری از توان پمپ کم می شود که تأثیر قابل توجهی بر روی هد آن و در نتیجه تراز آب می گذارد. همچنین نوسانات برق در مجموعه آزمایشگاه بر روی عملکرد پمپ بی تأثیر نیست. بدین سان باید تراز آب را در یک محدوده مشخص تنظیم کرد. برای تست های این پایان نامه از بازه ۵ سانتی متری برای تنظیم تراز ارتفاع هد آب استفاده شده است. برای مثال هد ۲ متر تراز آب در بازه 2 ± 0.05 قرار دارد.

برای اندازه گیری فشار پیزومتریک از لوله متصل به مانومتر قائم استفاده شده است که برای قرائت هر کدام از پیزومتر ها شلنگ را به پیزومتر مورد نظر متصل و تراز آب از روی مانومتر قرائت شده است. در شکل ۳-۱۳ محل قرار گیری نقاطی که فشار آن در مدل توسط مانومتر اندازه گیری شده است نشان داده شده است.

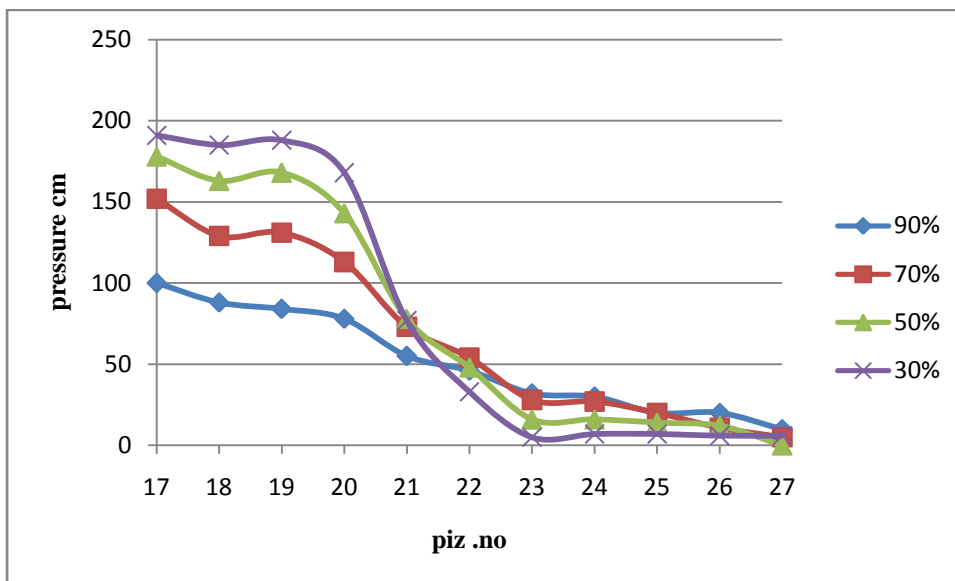


شکل ۳-۱۳: نمای قرارگیری پیزومترهای اندازه گیری فشار در مجرای تخلیه کننده تحتانی

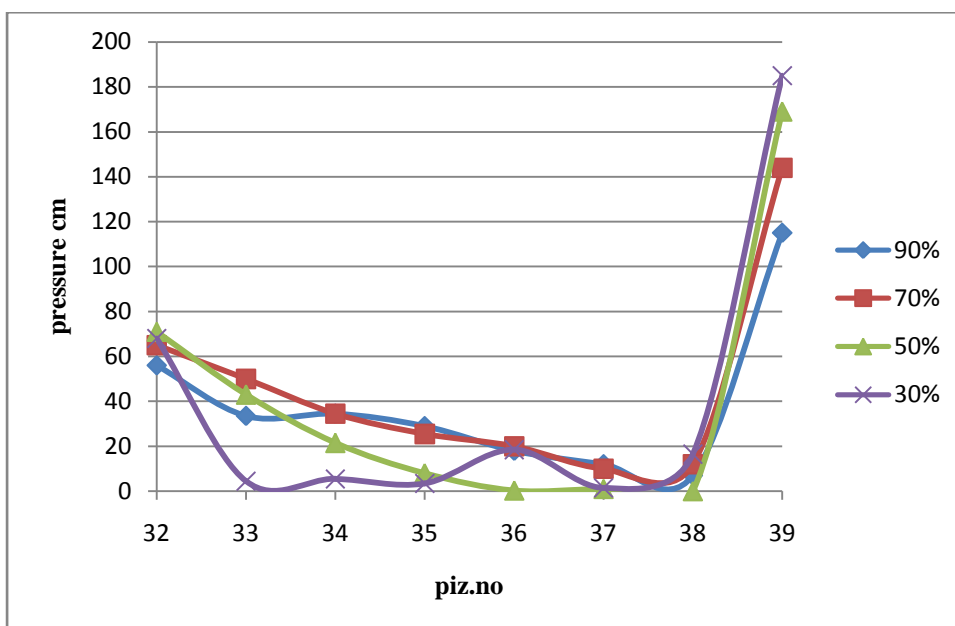
صفر ارتفاعی پیزومترها کف کانال بوده که به صورت افقی می باشد. مبدا فاصله افقی ابتدای شروع کانال است.

۳-۵ - ارائه نتایج مدل فیزیکی

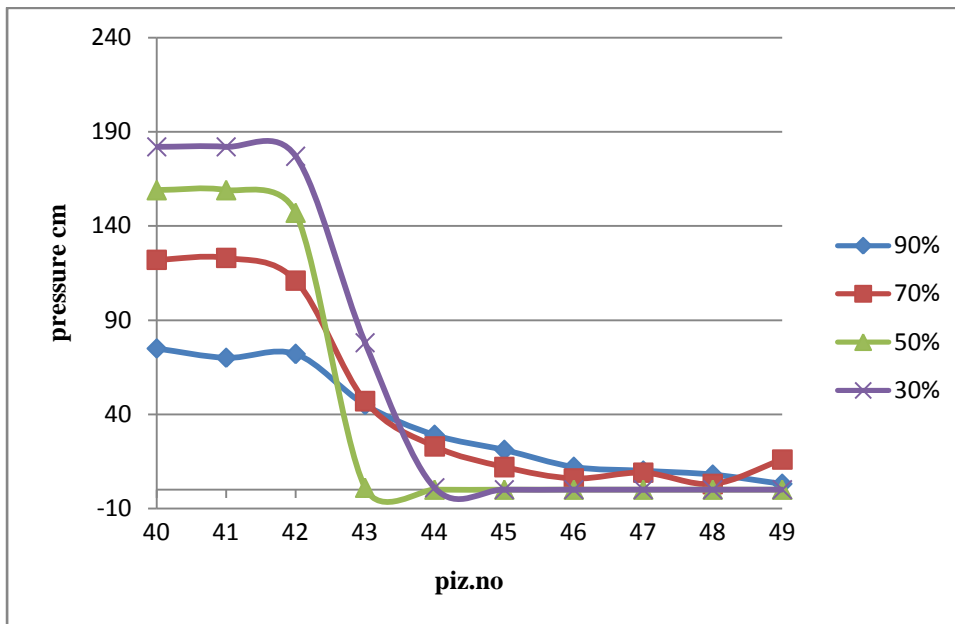
همانگونه که گفته شد تست های فیزیکی برای باز شدگی و هد مختلف تکرار شد. این تستها برای باز شدگی ۹۰ و ۷۰ و ۵۰ و ۳۰ درصد و همچنین هد های ۲ و ۳ و ۴ و ۵ متر انجام شده است. برای هر یک از تست ها مقادیر فشار پیزومتریکی اندازه گیری و در شکل های ۳-۱۴ الی ۳-۲۹ بر حسب سانتیمتر نشان داده شده است. لازم به ذکر است که محور افق در نمودارهای فوق معرف پیزومتر بوده که موقعیت آن بر اساس شکل ۳-۱۳ قابل ملاحظه است.



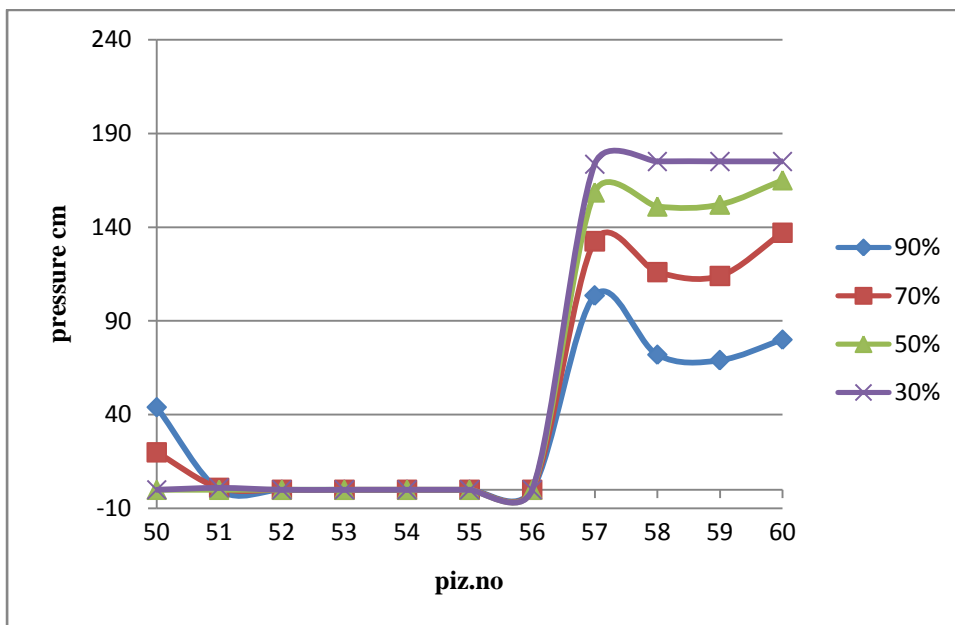
شکل ۳-۱۴: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۲ متر در پیزومترهای ۱۷ الی ۲۷



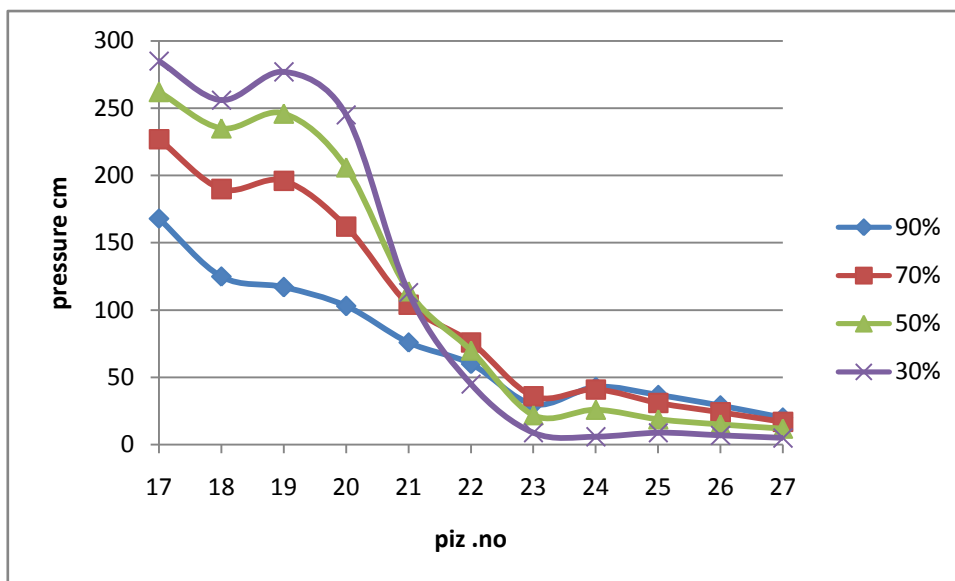
شکل ۳-۱۵: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۲ متر در پیزومترهای ۳۲ الی ۳۹



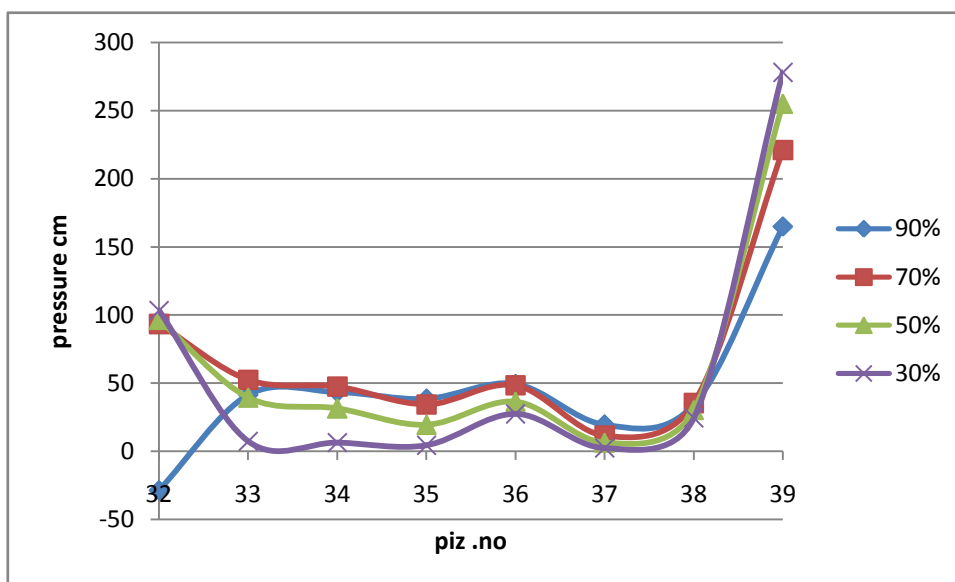
شکل ۳-۱۶: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۲ متر در پیزومترهای ۴۰ الی ۴۹



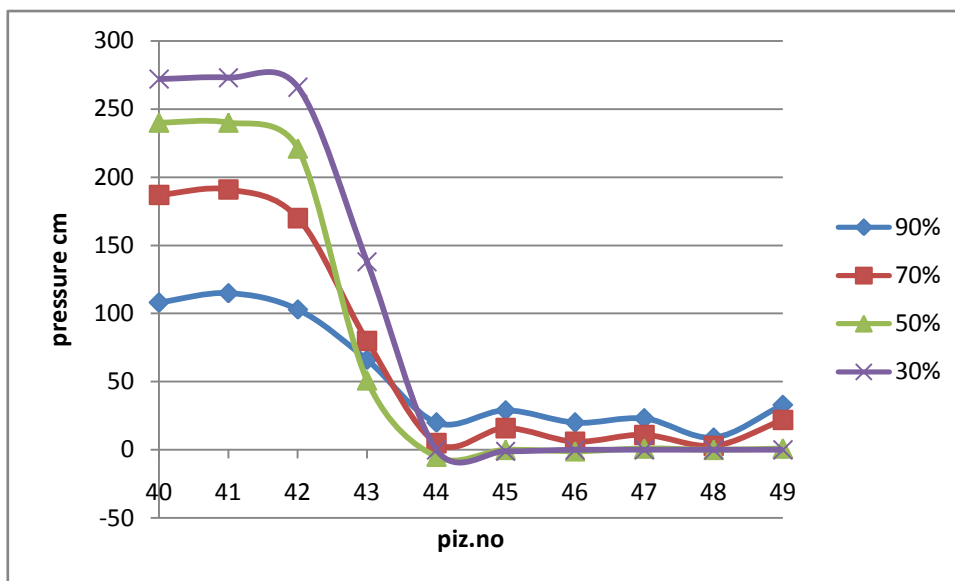
شکل ۳-۱۷: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۲ متر در پیزومترهای ۵۰ الی ۶۰



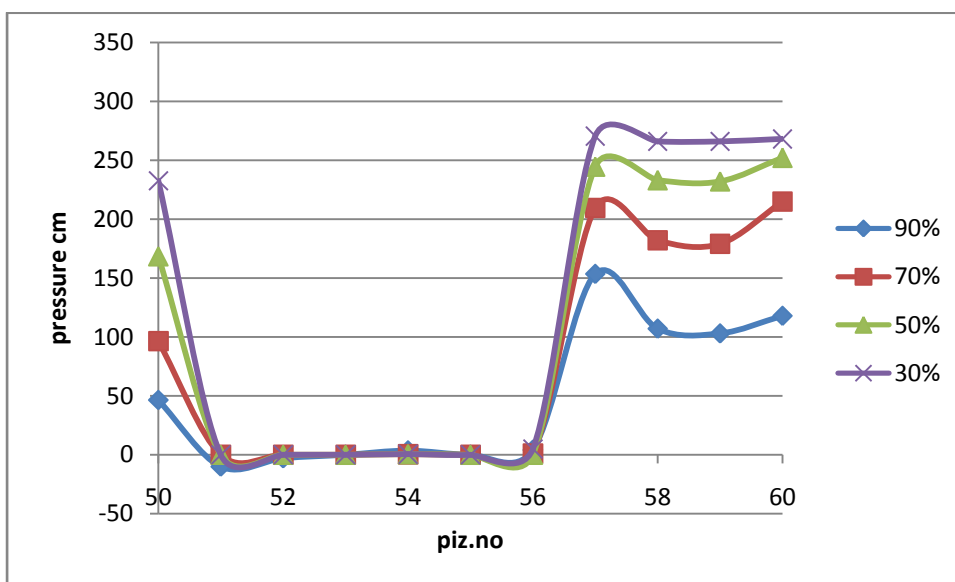
شکل ۳-۱۸: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۳ متر در پیزومتر های ۱۷ الی ۲۷



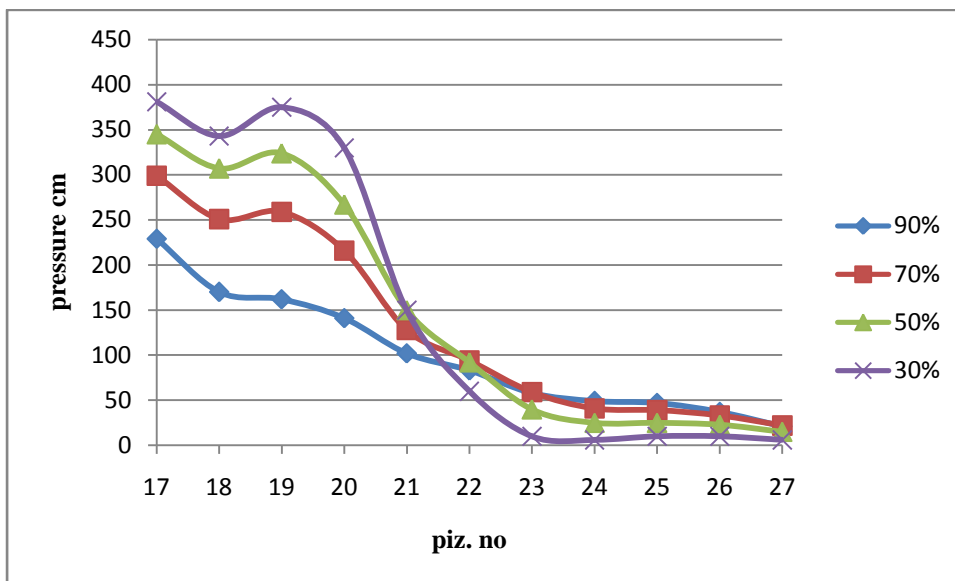
شکل ۳-۱۹: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۳ متر در پیزومتر های ۳۲ الی ۳۹



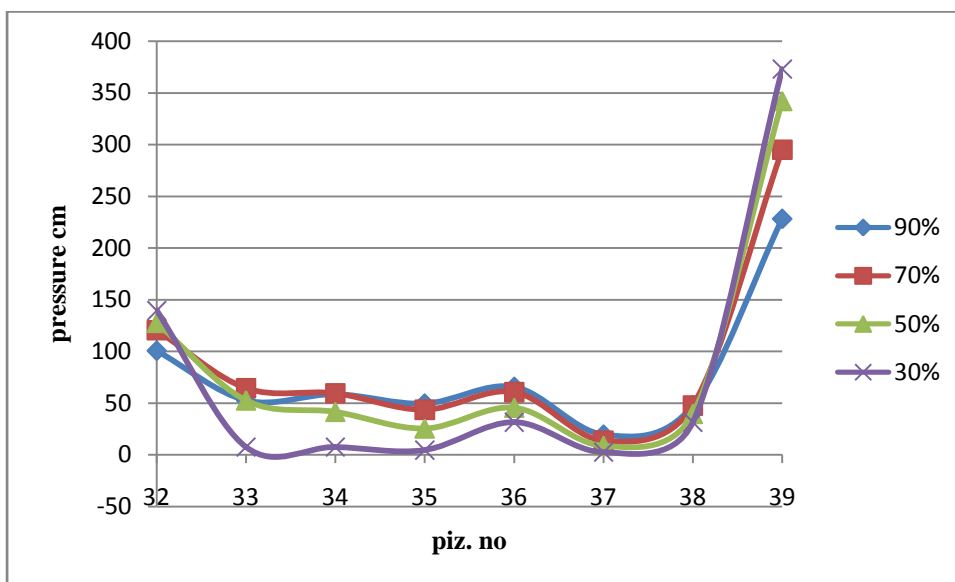
شکل ۳-۲۰: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۳ متر در پیزومتر های ۴۰ الی ۴۹



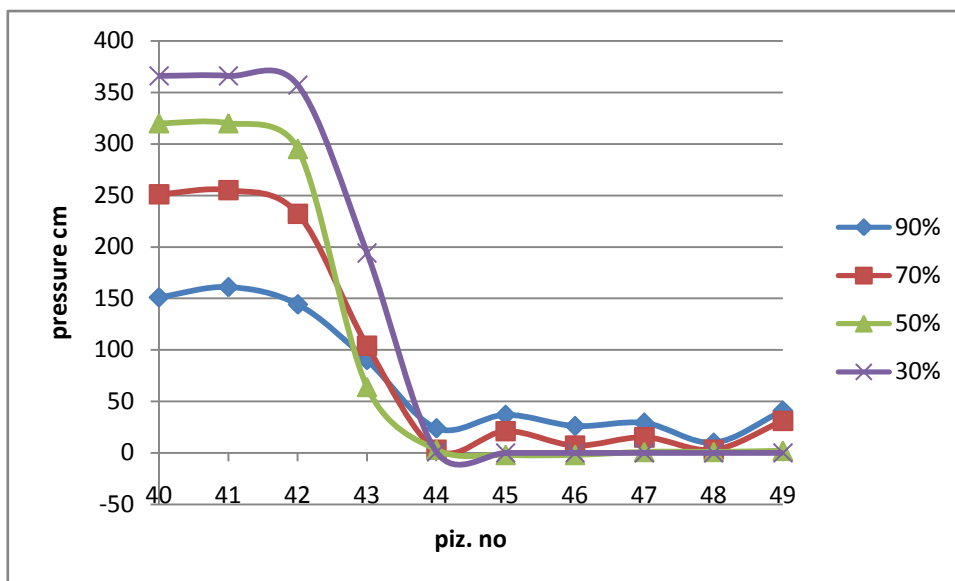
شکل ۳-۲۱: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۳ متر در پیزومتر های ۵۰ الی ۶۰



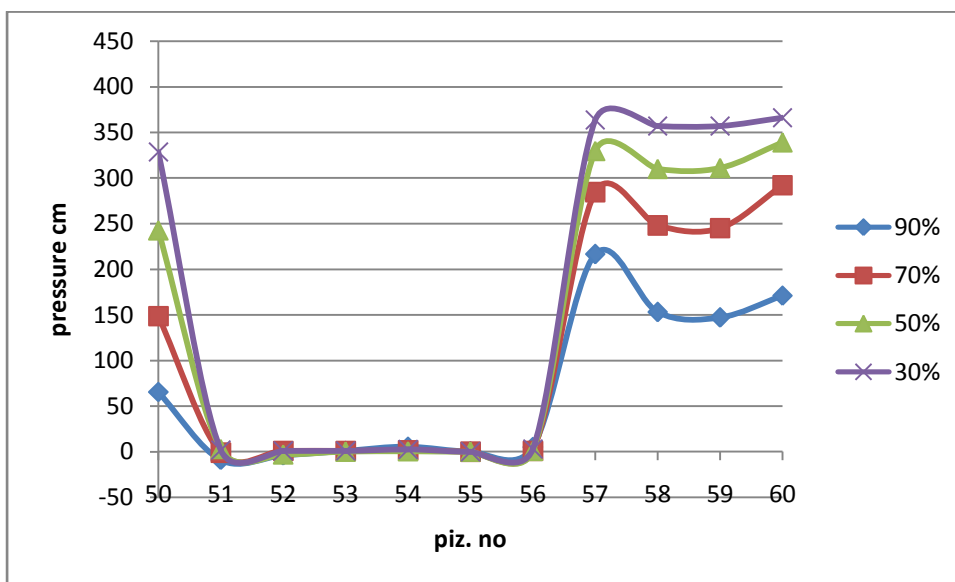
شکل ۳-۲۲: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با همد ۴ متر در پیزومترهای ۱۷ الی ۲۷



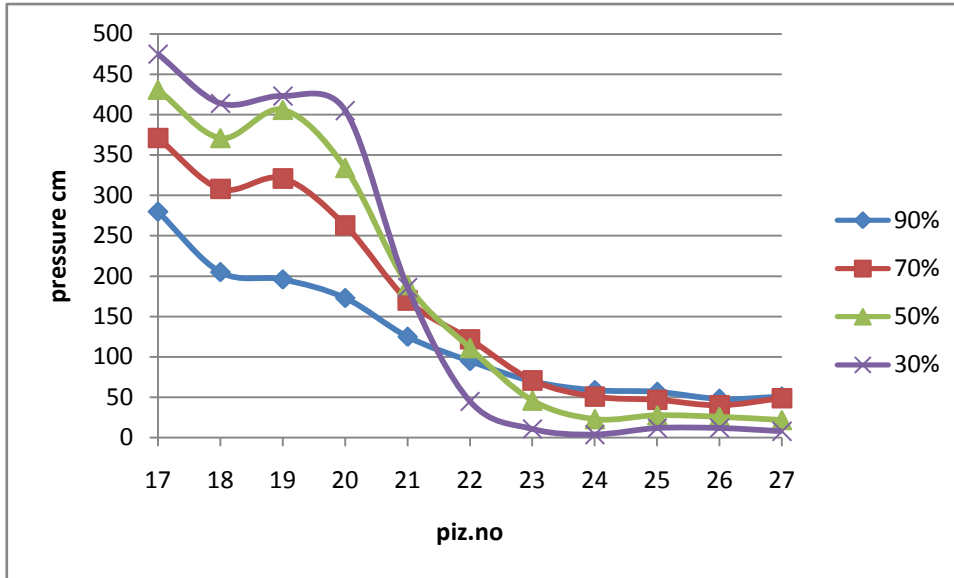
شکل ۳-۲۳: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با همد ۴ متر در پیزومترهای ۳۲ الی ۳۹



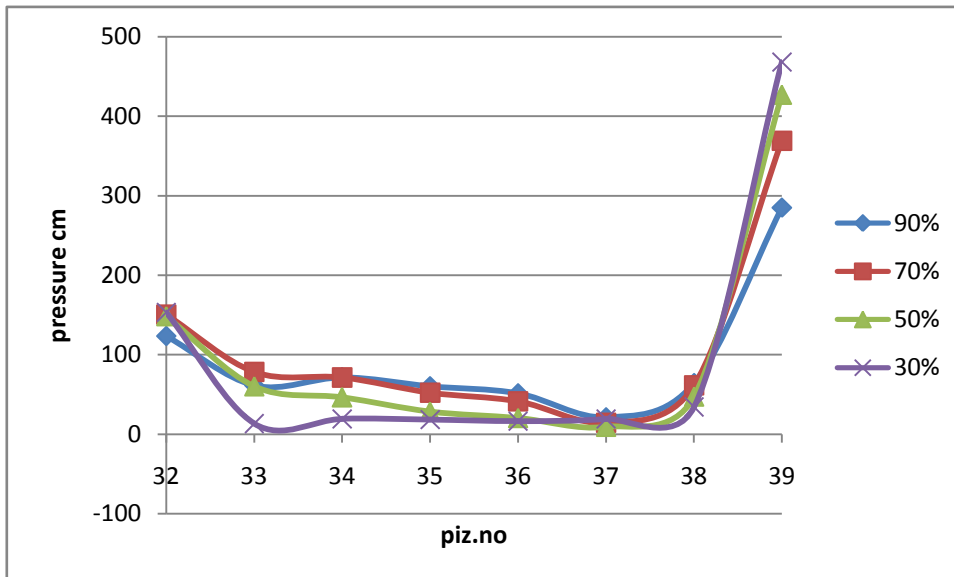
شکل ۳-۲۴: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با همد ۴ متر در پیزومترهای ۴۰ الی ۴۹



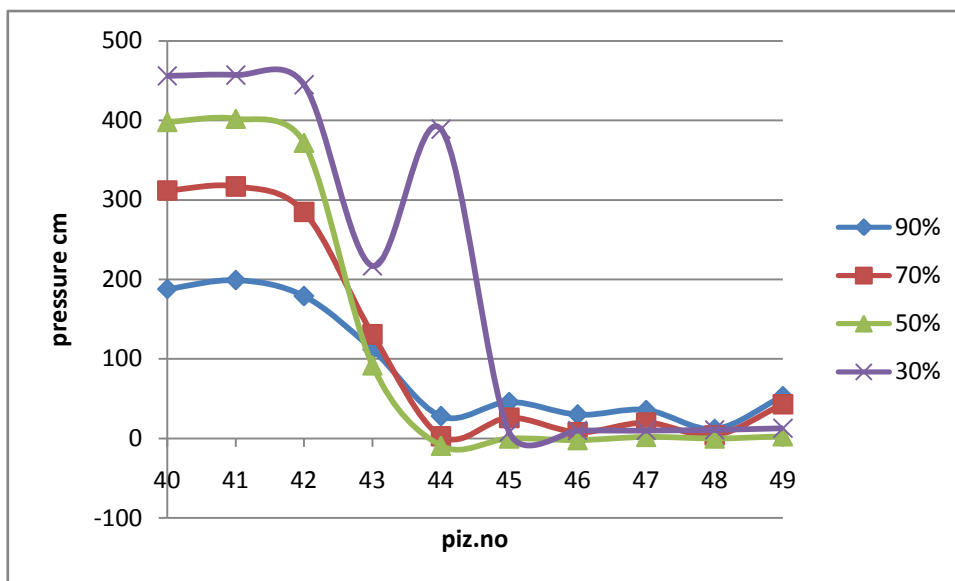
شکل ۳-۲۵: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با همد ۴ متر در پیزومترهای ۵۰ الی ۶۰



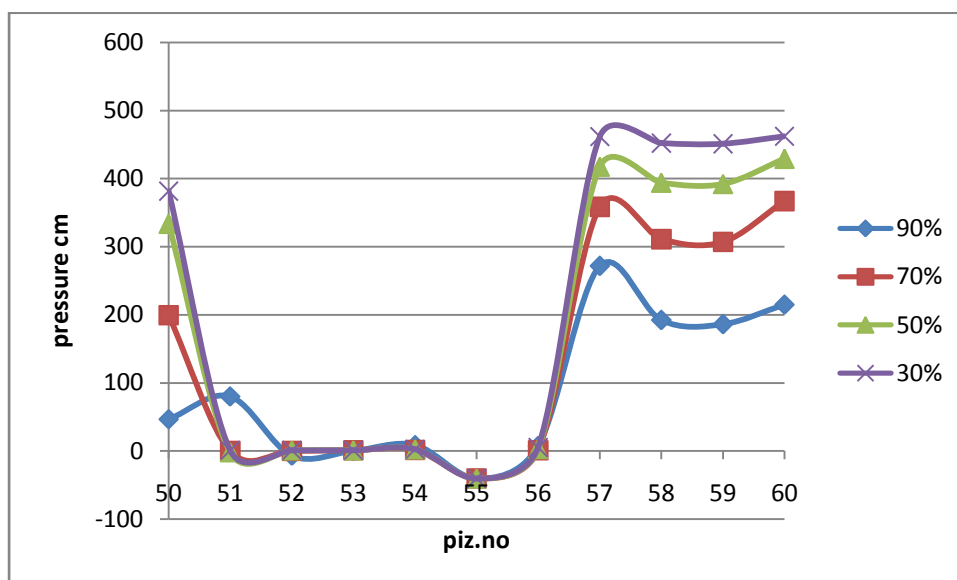
شکل ۳-۲۶: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۵ متر در پیزومتر های ۱۷ الی ۲۷



شکل ۳-۲۷: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۵ متر در پیزومتر های ۳۲ الی ۳۹



شکل ۳-۲۸: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۵ متر در پیزومتر های ۴۰ الی ۴۹



شکل ۳-۲۹: مقادیر فشار پیزومتریک اندازه گیری شده در مدل با هد ۵ متر در پیزومتر های ۵۰ الی ۶۰

در کلیه اشکال فوق روند تغییر فشار از بالادست دریچه تا محل دریچه نزولی می باشد. این روند با تغییر هد و بازشدگی ثابت می باشد. همچنین روند فوق در دیواره و کف مشابه می باشد. در پائین دست دریچه و ورود جریان به اتمسفر، فشار به شدت کاهش می یابد و تا مسافتی پائین دست نیز ادامه دارد. افزایش فشار با کاهش بازشدگی در بالادست دریچه نکته حائز اهمیت است که از نتایج استخراج گردیده و دقت و کارایی مدل را تأیید می نماید.

برای بدست آوردن سرعت جریان در هواده از دستگاه Hot wire استفاده شده است که نتایج در جدول (۱-۳) سرعت هوا در هواده برای تستهای انجام شده نشان داده شده است. همانطور که در این جدول نشان داده شده است مدل دارای دو داکت هوادهی بوده که یکی در سمت چپ و دیگری در سمت راست مجرا قرار دارد و میانگین این دو مقدار در مطالعات در نظر گرفته شده است.

جدول ۱-۳: مقادیر اندازه گیری شده سرعت هوا در هدها و بازشدگی مختلف دریچه تحتانی

Head of water (m)	Gate Opening (%)	speed of air (m/s)			Head of water (m)	Gate Opening (%)	speed of air (m/s)		
		Left side aeration	Right side aeration	Average			Left side aeration	Right side aeration	Average
2	90%	3.32	3.58	3.45	4	90%	3.63	3.9	3.765
2	70%	1.26	1.3	1.28	4	70%	2.39	2.6	2.495
2	50%	0.97	1.1	1.035	4	50%	1.88	2.1	1.99
2	30%	0.77	0.72	0.745	4	30%	1.63	1.5	1.565
3	90%	3.1	3.09	3.095	5	90%	4.54	4.48	4.51
3	70%	1.74	1.74	1.74	5	70%	3.47	3.2	3.335
3	50%	1.52	1.37	1.445	5	50%	2.42	2.39	2.405
3	30%	1.25	1.11	1.18	5	30%	1.99	1.97	1.98

در هر تست برای بدست آوردن دبی جریان از سرریز مثلثی واقع در انتهای مدل استفاده شد. بدین منظور با قرائت ارتفاع آب بر روی لبه سرریز با استفاده از لیمنیتر مقدار دبی آب بدست آمده است. در مرکز تحقیقات آب برای بدست آوردن دبی خروجی از دو نوع سرریز مثلثی و مستطیلی استفاده شده است. رابطه کلی اندازه گیری دبی جریان روی سرریز مستطیلی ها عبارتست از: [29]

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L h^{1.5} \quad (1-3)$$

تغییرات ضریب دبی C_d بصورت تابعی از h/p ، توسط معادله *Rehbock* بصورت زیر ارائه شده است.

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{h}{p} \quad (2-3)$$

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 است نمای سرریز مستطیلی در عکس شکل (۳-۳۰) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۰: نمایی سرریز مستطیلی مورد استفاده جهت اندازه‌گیری دبی جریان

مطالعات فراوان روی سرریز مثلثی در مراکز آزمایشگاه های هیدرولیکی جهان بعمل آمده و ضرایب دبی آن حسب وضعیت قرارگیری آن نسبت به مخزن ارائه گردیده است. جهت اندازه گیری 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 اندازه گیری 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 اندازه گیری 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 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. لیمنیمتر اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب نیز در فاصله پنج برابر بار آب روی سرریز نصب می گردد.

دبی سرریز مثلثی با استفاده از رابطه (۳-۳) حاصل می‌گردد که در آن Q دبی جریان عبوری از سرریز (متر مکعب بر ثانیه) ، C_d ضریب دبی که حسب مقدار جریان تغییر می‌یابد (برای دبی کم ۰/۶۰۸ و برای دبی زیاد ۰/۵۸۴) ، θ زاویه بین دو لبه کاملاً صاف طرفین سرریز (زاویه سرریز مثلثی) بر حسب درجه و h بار آب روی سرریز بر حسب متر است. [29]

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d \tan \frac{\theta}{2} h^{\frac{5}{2}} \quad (3-3)$$

برای سرریز با زاویه ۹۰ درجه (درجه $\theta=90$) رابطه را می‌توان بصورت زیر نوشت.

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d h^{\frac{5}{2}} \quad (4-3)$$

با استفاده از رابطه بالا دبی عبوری از سرریز ۹۰ درجه بازای هد آب محاسبه می‌شود. لازم بذکر است که باید بار آب روی سرریز حداقل ۵ سانتیمتر و ارتفاع سرریز (p) از ۴۵ سانتیمتر کمتر نباشد. ضمن رعایت نکات در مورد ساخت و نصب سرریز مثلثی دقت اندازه گیری با سرریز مثلثی ۱٪ می‌باشد. در جدول ۲-۳ دبی بدست آمده از سرریز مثلثی برای تستهای انجام شده نشان داده شده است.

جدول ۲-۳: تغییرات دبی اندازه گیری شده در هدها و بازشدگی مختلف دریچه تحتانی

Q lit/s				
Head	30%	50%	70%	90%
2m	24.71	41.87	59.37	78.17
3m	29.95	52.31	68.67	91.8
4m	34.65	60.42	82.57	103.8
5m	38.97	68.1	91.12	114.38

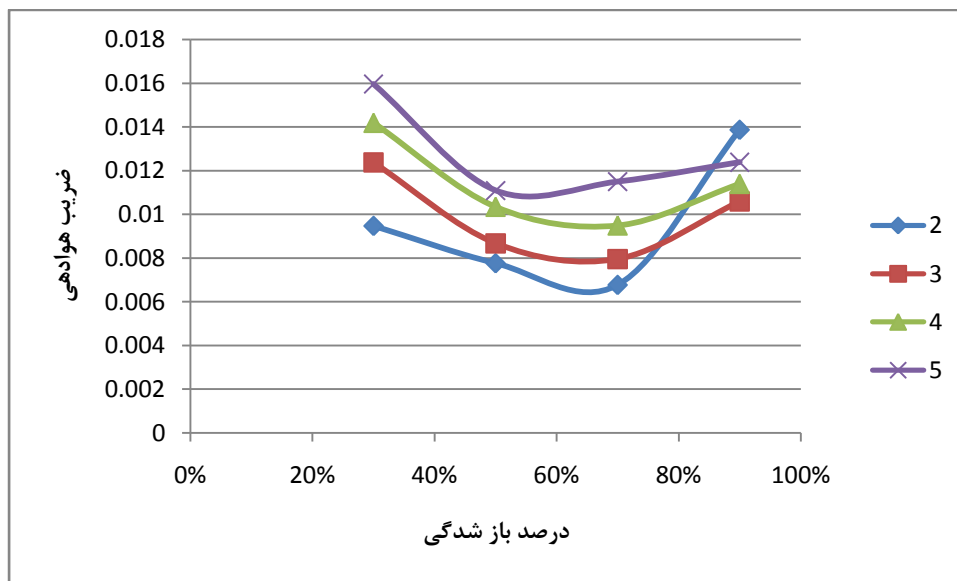
در ادامه مقدار ضریب هوادهی برای تستهای انجام شده محاسبه شده است. ضریب هوادهی طبق

رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\beta = \frac{Q_{air}}{Q_w}$$

در شکل زیر نمودار ضریب هوادهی برای هدهای ۲،۳،۴ و ۵ متر و باز شدگی های معین شده محاسبه

شده است.



شکل ۳-۳۱: نمودار ضریب هوادهی

فصل چہارم

۴ - فصل چهارم : معرفی و کالیبره نمودن مدل عددی

۴ - مقدمه

اصولاً پیش‌بینی فرآیندهایی همچون جریان سیال به دو روش اصلی انجام می‌شود که شامل تحقیقات آزمایشگاهی و محاسبات تئوریک می‌شود. اطلاعات دقیق در مورد یک فرایند فیزیکی غالباً توسط اندازه‌گیری عملی بدست می‌آید. آزمایش‌های انجام شده در مورد یک سازه واقعی جهت پیش‌بینی عملکرد در بیشتر حالات به علت بزرگ بودن ابعاد بسیار گران و اغلب غیرممکن خواهد بود. لذا آزمایش بر روی مدل‌هایی با مقیاس کوچکتر انجام می‌گیرد. مساله‌ای 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 ننموده و در بسیاری موارد نیز با مشکلات جدی اندازه‌گیری و خطای وسایل اندازه‌گیری همراه می‌باشد. در پیش‌بینی بصورت محاسبات تئوری بیشتر از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود که اصولاً عبارت از یک سری معادلات ریاضی می‌باشند. 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 اکثر 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. علم دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به صورت یک ابزار توانا برای تحلیل رفتار جریان سیال و انتقال حرارت در سیستم‌های با هندسه ناموزون و معادلات حاکم پیچیده برای محققان و مهندسان درآمده و در دهه گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است. در دهه ۱۹۸۰

حل مسائل جریان سیال توسط روش CFD موضوع تحقیق بسیاری از محققان و متخصصان شبیه‌سازی بوده و نرم‌افزارهای تجاری زیادی بوجود آمده است. در حال حاضر نرم‌افزارهای موجود در بازار ممکن است بسیار قوی باشند، اما عملکرد آنها هنوز نیازمند یک مهارت و درک بسیار بالا از سوی کاربر می‌باشد تا نتایج قابل قبولی در حالت‌های پیچیده بدست آید. در حالی که نرم‌افزارهای تجاری CFD بر اساس روش المان محدود رو به ضعف و زوال می‌باشند، بازار بطور مستمر در اختیار چهار نرم‌افزار STAR-CD، FLOW-3D، PHOENIX و FLUENT قرار گرفته که اساس کار همه آنها بر پایه روش احجام محدود بوده و دقت آنها توسط محققان زیادی مورد تایید قرار گرفته است. دینامیک سیالات محاسباتی با ساختار عددی در تحلیل سیستم های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و غیره کاربرد داشته و دارای مزایا و معایبی نسبت به روش های تجربی می‌باشد که می‌توان به آنها اشاره کرد. هزینه و زمان نسبتاً کم شبیه‌سازی، دقت و کاهش خطای انسانی در زمره مزایا و در عوض عدم اطمینان نسبی به نتایج در حالت‌های پیچیده و فراوانی روشها و نبود یک راه حل کلی برای مسائل مختلف در زمره معیب این روش ها می باشند.[30]

۴-۴ - 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 می‌شود. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و اندازه مقدار حرکت می‌باشد. 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 می‌شوند. در جریان تراکم ناپذیر معادلات حاکم بر جریان به صورت معادلات زیر بیان می‌شود که در آنها ρ چگالی سیال، g شتاب ثقل، μ لزجت سیال و P فشار می‌باشند. [31]

$$\nabla \cdot V = 0 \quad \text{معادله پیوستگی} \quad (1-4)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 V \quad \text{معادله اندازه مقدار حرکت} \quad (۳-۴)$$

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 سرعت در جهت x و y و فشار) معین می‌شوند. 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 گرادیانهای آنها به گروههای زیر تقسیم بندی می‌شوند. انواع مدل‌های آشفتگی مورد استفاده شامل مدل‌های صفر معادله ای، مدل‌های یک معادله ای، مدل‌های دو معادله ای، مدل تنش جبری و مدل تنش رینولدز می‌باشند که به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند.

مدل استاندارد k-ε (دو معادله‌ای): مدل استاندارد k-ε به عنوان کاربردی‌ترین مدل آشفتگی دو معادله‌ای در محاسبات جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل توسط Jones و Launder معرفی شده که از لحاظ قدرت برنامه، اقتصادی بودن و دقت معقولانه برای دامنه های وسیع جریان از معروفیت زیادی برخوردار است. مدل استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. [32] مدل k-ε یک مدل نیمه تجربی است که معادله k آن دقیقاً از ترکیب معادلات رینولدز حاکم بر جریان مشتق می‌شود اما معادله ε حاکم، بر اساس شواهد تجربی و آزمایشگاهی و روابط ریاضی حاصل می‌گردد. 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 [33]

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad \text{معادله ی k} \quad (۳-۴)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \varepsilon \text{ معادله‌ی } (4-4)$$

با اصلاحات صورت گرفته بر روی مدل آشفتگی استاندارد $k-\varepsilon$ ، مدل‌های آشفتگی RNG و

REALIZABLE بدست آمده‌اند که این دو مدل آشفتگی در جریان‌هایی که دارای جریانات چرخشی

می‌باشد کاربرد فراوان دارد. [34]

مدل RSM (پنج معادله‌ای) : بجز فرض ایزوتروپیک بودن لزجت گردابه ای، 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 ۴ معادله انتقالی اضافی در جریان‌های دوبعدی و ۷ معادله انتقالی

اضافی در جریان‌های سه‌بعدی باید حل شود. چون مدل RSM، اثرات انحناء خط جریان، چرخش و

تغییرات سریع در نرخ کرنش را در روش سخت تر از مدل‌های یک معادله‌ای و دو معادله‌ای به حساب

می‌آورد دارای پتانسیل بالاتری در پیش بینی 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 تنش‌های رینولدز می‌باشد. رابطه کلی حاکم بر این مدل بصورت زیر

است که شامل ترم‌های انتقال، پخش، تولید و استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u_i u_j}) = & - \frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \overline{u_i u_j u_k} + p(\delta_{kj} \overline{u_i} + \delta_{ik} \overline{u_j})] + \\ \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j}) \right] - \rho \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta (g_i \overline{u_j \theta} + g_j \overline{u_i \theta}) \\ + p \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u_j u_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i u_m} \varepsilon_{jkm}) + s_{user} \end{aligned} \quad (5-4)$$

این مدل از نظر توانایی برای همه مدل‌های آشفتگی کلاسیک حالت عمومی داشته و فقط شرایط اولیه و

یا مرزی در آن باید تامین شود. همچنین امکان محاسبه خیلی دقیق میدان جریان متوسط و

تنش‌های رینولدز برای جریان‌های ساده و خیلی پیچیده شامل فواره ها، جریان در مجراهای متقارن

دایره‌ای و کانال غیردایره ای و جریان‌های قوس دار از جمله مزایای آن می باشند. قیمت خیلی بالای

محاسبات و کاربردی نبودن مدل به گستردگی مدل‌های طول مخلوط و $k-\varepsilon$ از جمله معایب آن اعلام شده است. همچنین جریانهای متلاطم بسیار متأثر از اثر دیواره می‌باشند. بنابراین توصیف مناسب و دقیق از تاثیر و نحوه توزیع سرعت در نزدیک دیواره از اهمیت ویژه‌ای در حل دقیق تر میدان جریان برخوردار است. Launder و Spalding در سال ۱۹۷۴ قوانینی را مطابق روابطه زیر ارائه کردند که به قانون استاندارد دیواره معروف می‌باشد. [35]

$$\begin{cases} U^* = \frac{U_p C_u^{1/4} K_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} \\ y^* = \frac{\rho C_u^{1/4} K_p^{1/2} y_p}{\mu} \end{cases} \quad (6-4)$$

چنانچه 30-60 y^* باشد در این صورت قانون لگاریتمی سرعت حاکم خواهد بود اما در نرم‌افزار FLUENT این مقدار کاهش یافته و $y^* > 11.225$ جدا کننده این مرز می‌باشد. بنابراین رابطه حاکم بر این لایه چنین است.

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \quad (7-4)$$

در این رابطه منظور از κ ثابت ون کارمن است که برابر 0.42 می‌باشد و E ثابت قانون دیواره می‌باشد که مقدار آن به صورت تجربی $9/81$ ، U_p ، سرعت میانگین در نقطه P ، K_p انرژی جنبشی آشفته در نقطه p ، y_p فاصله نقطه p از دیواره و μ لزجت دینامیکی سیال می‌باشد. چنانچه $y^* > 11.225$ باشد در این صورت رابطه خطی تنش کرنش بصورت $u^* = y^*$ در ناحیه زیر لزج حاکم است. البته باید ذکر شود که برای معادله k شرط مرزی به صورت $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ می‌باشد که n جهت بردار یکه می‌باشد. ترم G_k (ترم چشمه در معادله k) و ε_p مقدار نرخ پراکندگی آشفستگی در نزدیک دیواره برابر مقادیر سلول کنار دیواره می‌باشد که به شکل زیر در معادلات اصلاح می‌گردند.

$$G \approx \tau_w \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_u^{1/4} K_p^{1/2} y_p} \quad (8-4)$$

$$\varepsilon_p = \frac{C_u^{3/4} \cdot K_p^{3/2}}{k y_p} \quad (9-4)$$

۴۴ - مدل عددی Fluent:

FLUENT نرم افزاری برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده می باشد. این نرم افزار امکان تغییر شبکه بصورت کامل و تحلیل جریان با شبکه های نامنظم 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 دو بعدی و چهار وجهی و شش وجهی و هرمی یا گوه ای برای هندسه سه بعدی و شبکه های ترکیبی است. این نرم افزار به زبان برنامه نویسی C نوشته شده است. نرم افزار FLUENT قابلیت شبیه سازی و مدلسازی جریان در هندسه های پیچیده دو بعدی و سه بعدی، جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر، جریان پایدار و ناپایدار، جریان های لزج، آرام و متلاطم، سیال نیوتنی و غیر نیوتنی، انتقال حرارت شامل انتقال طبیعی و اجباری و انتقال حرارت بصورت جابجایی و همرفت و تابشی را دارا است. همچنین شبیه سازی جریان در محیط های متخلخل و جریان دوفازی و کویتاسیون و جریان با سطح آزاد با اشکال پیچیده سطح از دیگر قابلیت های مهم این مدل می باشد. مراحل حل در FLUENT شامل وارد کردن شبکه و چک کردن آن، تعیین حل کننده، تعیین نوع مدل آشفته و مدل چندفازی، تعیین خصوصیات مواد، شرایط عملیات، شرایط مرزی و تنظیم پارامترهای کنترل حل، نمایشگر و مقداردهی اولیه و محاسبه و ذخیره سازی نتایج می باشد. برای حل عددی در FLUENT دو روش عددی حل تفکیکی (Segregated) و حل وابسته (coupled) که به دو صورت صریح (Explicit) و ضمنی (Implicit) به حل عددی می پردازد مطرح است. 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. روش تفکیکی معادلات را پی در پی حل می کند (بعبارتی جدا از یکدیگر) اما روش وابسته معادلات را به طور همزمان و وابسته به یکدیگر حل می کند. در حالت کلی روش تفکیکی برای یک متغیر، با استفاده از همه سلول ها حل صورت می گیرد و برای متغیر بعدی دوباره با استفاده از همه سلول ها حل صورت گرفته و به همین ترتیب حل ادامه می یابد. بنابراین حل صریح به روش تفکیکی وجود ندارد. در برخی از مدل ها لزوماً باید از شیوه تفکیکی مانند مدل های چند فازی، مدل های احتراق، مدل های تشعشی، مدل جریان های متناوب و مدل های تغییر فاز استفاده شود. در روش حل وابسته، معادلات حاکم بر جریان شامل پیوستگی، مقدار حرکت و انرژی و اجزاء شیمیایی بطور همزمان حل می شوند. معادلات حاکم برای مقادیر عددی در ادامه با استفاده از روشی که برای حل کننده تفکیکی مطرح شد (بصورت جدا از یکدیگر و جدا از مجموعه پیوسته) حل می شود. از آنجا که این معادلات غیرخطی می باشند،

لذا چندین تکرار در حلقه فرآیند حل قبل از بدست آوردن حل همگرا باید انجام گیرد.[35]

در انفصال معادلات دیفرانسیل اطلاعاتی که در حل دقیق این معادلات حاکم می باشد با مقادیر جدا از هم تعویض می گردد که بدین ترتیب توزیع پارامترهای دخیل در معادله دیفرانسیل به صورت ناپیوسته صورت می گیرد. معمولاً در تعیین پروفیل انتخابی برای متغیر مورد نظر، منطقه کوچکی از میدان را پوشش می دهد که بدین ترتیب میدان محاسباتی به تعدادی میدان کوچکتر تقسیم می شود که هر یک از این میدانهای کوچک دارای یک پروفیل عرضی می باشد. معادله انفصال رابطه جبری است که مقادیر متغیر در یک میدان کوچک را به هم مرتبط می سازد. دو روش عمده به عنوان روشهای انفصال میدان مطرح می باشد که به نام روش اجزای محدود و روش تفاضل محدود شناخته شده اند. تفاوت بین روشهای تفاضل محدود و اجزاء محدود از نحوه انتخابی پروفیلهای میدانهای منفصل شده و نحوه بدست آوردن معادلات انفصال حاصل می شود. روش دیگری که این تحقیق متکی بر آن می باشد روش احجام محدود می باشد که دارای ظاهر روش تفاضل محدود است ولی بسیاری از ایده های اجزاء محدود را بکار می گیرد.

روش حجم محدود بعلت مستر 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 انتگرال گیری 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 انتگرال گیری روی حجم کنترل مدنظر مربوط به هر گره، عبارت جابجایی (Convection) و پخش (Diffusion) باید بگونه‌ای منفصل شوند که فرمولبندی حاصل پایدار و دقیق باشد.[36]

۴ ۳ ۴. پدیده‌های انتقال و پخش

پدیده انتشار در طبیعت به صورت انتقال و پخش و پراکندگی انجام می‌گیرد. اکثر مسائل فیزیکی و هیدرولیکی مستقیماً شامل پدیده‌های انتقال و پخش می‌باشد. در حالت کلی معادله حاکم بر کمیت Φ که انتقال این کمیت را بیان می‌کند به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}(\phi)) + S \quad (10-4)$$

که در سیستم کارترین این معادله به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S \quad (11-4)$$

ترم $\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j}$ به عنوان ترم انتقال متغیر ϕ و پارامتر $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right)$ به عنوان ترم پخش متغیر ϕ

در معادله معین می‌باشد. انتقال ترمهای پخش و جابه‌جایی به روش‌های متفاوتی صورت می‌گیرد که چنانچه شبکه انتخاب شده به اندازه کافی ریز باشد، روشهای گسسته‌سازی انتخابی در نتیجه نهایی تاثیر چندانی نخواهد داشت. اگر Γ مقدار ثابتی باشد و جریان تراکم ناپذیر فرض گردد در این صورت

ρu مقداری ثابتی خواهد بود که معادله دیفرانسیل ساده شده فوق در حالت یک بعدی به صورت زیر

تبدیل می شود:

$$\rho u \frac{d\phi}{dx} = \Gamma \frac{d^2\phi}{dx^2} \quad (12-4)$$

در حل دقیق معادله دیفرانسیل فوق چنانچه دامنه محاسبه $0 < x < L$ باشد و در مرزها مقادیر معین

باشند جواب معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp\left(\frac{Px}{L} - 1\right)}{\exp(P - 1)} \quad \text{at } x=L, \phi = \phi_L \quad \text{at } x=0, \phi = \phi_0 \quad (13-4)$$

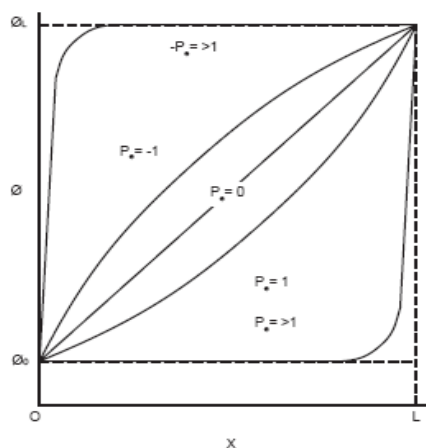
P عدد Peclet می باشد که به صورت نسبت قدرت جابه جایی به پخش تعریف می شود:

$$P = \frac{(\rho u)}{\left(\frac{\Gamma}{L}\right)} \quad (14-4)$$

چنانچه $P=0$ باشد در این صورت پخش خالص بر میدان جریان حاکم است و انتقال هیچ اثری نخواهد

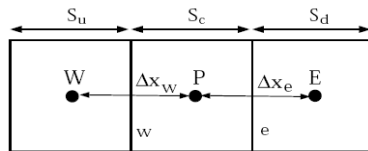
داشت و چنانچه $P \gg 1$ یا $P \ll -1$ باشد، در این صورت ترم انتقال حاکم بوده و اثر پخش بسیار ناچیز

می باشد. تغییرات ϕ نسبت به x بر حسب اعداد مختلف پکلت در شکل (۱-۴) ترسیم شده است.



شکل ۱-۴: تغییرات ϕ نسبت به x بر حسب اعداد مختلف

چنانچه در معادله (۴-۱۰) در حالت یک بعدی حجم کنترلی مانند شکل (۴-۲) در نظر گرفته و بر روی حجم کنترل انتگرال گیری گردد، در این صورت روابط زیر حاصل می گردد. [37]



شکل ۴-۲: حجم کنترل در حالت یک بعدی

$$\rho u \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \quad (۴-۱۵)$$

$$\rho u (\phi_e - \phi_w) = \frac{\Gamma_e}{\Delta x_e} (\phi_E - \phi_P) - \frac{\Gamma_w}{\Delta x_w} (\phi_P - \phi_W) \quad (۴-۱۶)$$

۴-۴-۴. حل میدان جریان

در حل میدان جریان تراکم ناپذیر در حالت دو بعدی حل سه معادله حاکم مشکل می باشد. در حل معادله پیوستگی پارامترهای سرعت میدان وجود دارد در حالیکه در معادلات مقدار حرکت در جهت x و y علاوه بر جهات سرعت پارامتر فشار نیز موجود می باشد که در حل معادلات این غیر یکنواختی باعث مشکل در کوپل کردن معادلات می شود اما چنانچه مقدار فشار در میدان محاسباتی مشخص باشد، مشکلی در حل میدان و استفاده از معادلات حاکم وجود نخواهد داشت. در یک میدان جریان واقعی به دلیل مجهول بودن فشار در میدان، معادله پیوستگی به طور غیر مستقیم، به معادله تصحیح فشار تبدیل می شود. بعضی از مشکلات اولیه حل میدان ناشی از انتخاب نحوه ای انفصال میدان می باشد که باعث موج شدن در مقادیر میدان می گردد. بدین منظور برای هر پارامتر جریان (P و U و V) یک حجم کنترل مخصوص به خود در نظر گرفته شده و معادلات منفصل شده مربوط به آن پارامتر حل می گردد. در حل معادلات غیر خطی حاکم بر میدان جریان نیاز به تخمین اولیه از میدان

جریان می‌باشد، که با مقادیر $p^*.v^*.u^*$ معین می‌گردد. با توجه به مقادیر حدس حل میدان چنین خواهد بود: [38]

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_p^* - p_E^*) A_e \quad (17-4)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_p^* - p_S^*) A_n \quad (18-4)$$

منظور از A_e و A_n سطح عمود بر شار عبوری از وجه حجم سلول مد نظر می‌باشد. اگر P و V و U مقادیر واقعی متغیرهای میدان باشد، در این صورت اختلاف مقادیر حدسی و واقعی با u', v', p' معین می‌گردد.

$$u' = u - u^* \quad v' = v - v^* \quad p' = p - p^* \quad (19-4)$$

در کوپل کردن متغیرهای P و V و U چنانچه مقادیر حدسی به مقادیر واقعی نزدیک باشد در این صورت می‌توان روابط زیر را برای آن نوشت:

$$\sum a_{nb} u_{nb'} = 0 \Rightarrow u_e = u_e^* + d_e (p_P' - p_E') \quad (20-4)$$

$$\sum a_{nb} v_{nb'} = 0 \Rightarrow v_n = v_n^* + d_n (p_P' - p_N') \quad (21-4)$$

$$d_e = \frac{A_e/n}{a_e/n} \quad (22-4)$$

$$a_p p_{p'} = \sum a_{nb} p_{nb'} + b \quad (23-4)$$

$$b = \frac{\rho_p^0 - \rho_p}{\Delta t} \Delta x \Delta y + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x \quad (24-4)$$

ترم b در معادله تصیح فشار قرینه معادله پیوستگی است. چنانچه این مقدار برابر صفر گردد مقادیر حدسی همان مقادیر واقعی خواهد بود. در این روش که به روش حل الگوی Simple معروف است [38]، میدان فشار و سرعت حدس زده و بر اساس معادلات مقادیر حدس سرعت بدست می‌آید. سپس معادله تصیح فشار p' حل تا تصیح مقدار فشار بر اساس رابطه $P = P' + P^*$ محاسبه و در

ادامه معادلات U و V و سایر معادلات حاکم بر میدان مانند آشفتگی حل می‌شود تا فشار حدسی جدید جایگزین P^* شده و این مراحل تکرار گردد تا جایی که مقادیر همگرا شوند. یکی از محدودیت های الگوریتم Simple این است که سرعت های جدید و شار متناظر با آن، تعادل مومنتوم را پس از اینکه معادلات تصحیح فشار حل شدند، ارضا نمی کنند. در نتیجه محاسبات می بایست تا زمان ارضای تعادل تکرار شود. بنابراین جهت بهبود این قضیه، الگوریتم PISO تغییر مکان محاسبات تکراری مورد نیاز الگوریتم Simple به درون مرحله حل معادله تصحیح فشار سرعت می باشد. بعد از یک یا چند حلقه اضافی PISO، سرعت های تصحیح شده به خوبی معادلات پیوستگی و مومنتوم را ارضا می کنند. [40]

۴ ۳ ۴. مدل سازی جریان چندفازی

پدیده های زیادی در طبیعت و تکنولوژی به صورت چند فازی هستند و در واقع بخش قابل توجه ای از جریان هایی که در طبیعت و تکنولوژی با آنها سر و کار داریم جریان های چند فازی هستند. گاز، مایع و جامد فازهای فیزیکی مواد هستند. اما مفهوم فاز در جریانهای چند فازی در معنای وسیع تری بکار می رود. در جریانات چند فازی یک فاز می تواند به عنوان یک گروه از مصالح قابل شناسایی که یک اینرسی پاسخ و برهمکنش خاص با جریان دارند تعریف شود. برای مثال اندازه های مختلف ذرات جامد از یک نوع مصالح می توانند به عنوان فازهای مختلف رفتار کنند زیرا هر مجموعه ای از ذرات با اندازه یکسان پاسخ دینامیکی همسانی با جریان دارد. رژیم های جریان های چند فازی را می توان به چهار گروه جریان گاز-مایع یا مایع-مایع، جریان گاز-جامد، جریان مایع-جامد و جریان سه فازی (ترکیبی از سه مدل فوق) تقسیم نمود.

۴ ۳ ۴. روش های مدل سازی چند فازی

پیشرفت ها در محاسبات مکانیک سیال زمینه را برای بینش بیشتر در دینامیک جریانات چندفازی فراهم می کند. بطور جاری دو روش اولری-اولری (Euler-Euler) و اولری-لاگرانژی (Euler-Lagrange)

(Lagrange) برای محاسبات جریان‌های چندفازی وجود دارد. مدل فاز گسسته لاگرانژین در FLUENT رویکرد اولر- لاگرانژ را دنبال می‌کند. فاز سیالی که به صورت پیوسته عمل می‌کند با معادلات میانگین گیری شده در زمان ناویر- استوکس حل می‌شود، در حالیکه فاز گسسته به وسیله پیگردی (Tracking) تعداد زیادی از ذرات، حباب‌ها و ریز قطره‌ها در سراسر حوزه برآورد شده سیال حل می‌شوند. فاز گسسته می‌تواند با فاز سیال تبادل مومنتوم، جرم و انرژی داشته باشد. فرض اساسی در این مدل آن است که فاز ثانویه گسسته کسر حجمی کمی را اشغال می‌کند، ولواینکه جرم حجمی زیادی داشته باشد، $(\dot{m}_{\text{particles}} \geq \dot{m}_{\text{fluid}})$. مسیره‌های حرکت ذره و ریز قطره در طی محاسبات فازی سیال در فواصل مشخص محاسبه می‌شود. این روش مدل‌های مناسبی را برای مخلوط‌های سوخت مایع و ذغال سنگ و بعضی از جریانات مملو از ذرات می‌سازد و برای مدل کردن اختلاط‌های مایع- مایع و یا هر کاربردی که در آن نمی‌توان از فاز دوم صرفنظر کرد نامناسب است.

در روش اولری- اولری فازهای پیوسته بصورت گسسته چون حجم یک گاز نمی‌تواند توسط فاز دیگر اشغال شود در هم نفوذ می‌کنند. کسرهای حجمی بصورت توابع پیوسته‌ای از زمان و مکان فرض شده‌اند و مجموع آنها برابر با یک است. معادلات بقاء در هر فاز برای مجموعه‌ای از معادلات استنتاج می‌شوند که دارای ساختار مشابهی برای همه فازها هستند. این معادلات نزدیک به روابط تشکیل دهنده خود هستند که آنها از روابط تجربی بدست می‌آیند، در حالت جریان‌های دارای دانه‌های ریز بوسیله کاربرد نظریه جنبشی بدست می‌آیند.

در FLUENT سه مدل متفاوت چندفازی اولری- اولری شامل VOF، Mixture و Eulerian مطرح می‌باشد که با توجه به آنکه جریان مورد بررسی در تحقیق حاضر از نوع جریان های حبابی بوده و از آنجایی که در مدل Mixture اجازه اختلاط فازها وجود دارد این مدل انتخاب گردیده است.

مدل VOF یک تکنیک پیگردی سطح (Surface- Tracking) است که برای یک مش ثابت اولرین کاربرد دارد و برای دو یا چند فاز آمیخته نشدنی که موقعیت سطح مشترک دو سطح مشخص باشد

طراحی شده است. در این مدل تنها یک مجموعه از معادلات مومنتوم در سیال حاکم است و کسر حجمی هریک از سیالات در محاسبات هر المان سراسر حوزه را دربر می‌گیرد. کاربرد مدل VOF شامل جریان‌های لایه لایه، جریان‌های سطح آزاد، حرکت حباب‌های بزرگ در سیال، حرکت سیال پس از شکست سد، پیش‌بینی شکست جت (jet breakup)، کشش سطحی و اندرکنش سطح مشترک بین دو فاز می‌شود. مدل Eulerian پیچیده‌ترین مدل از مدل‌های چند فازی در FLUENT است. مدل مذکور مجموعه‌ای از n معادله مومنتوم و پیوستگی را برای هر فاز حل می‌کند. اتصال بین فازها از طریق ضرایب تبدیل بین فازی بدست می‌آید. روشی که برای کوپل استفاده می‌شود بستگی به نوع فازهای درگیر دارد. جریان‌های دانه‌ای (مایع- جامد) با جریان‌های غیر دانه‌ای (مایع- مایع) متفاوت هستند. خواص برای جریان‌های دانه‌ای با به کارگیری تئوری جنبشی بدست می‌آیند. تبدیل مومنتوم بین فازها به نوع اختلاط مدل شده وابسته است. کاربردهایی از مدل Eulerian شامل ستون‌های حباب، معلق کردن ذره معلق و بستر با ذرات جامد و گاز می‌شود.[41]

مدل Mixture برای دو یا چند فاز (سیال یا به صورت ذره) طراحی شده است. این مدل معادلات مومنتوم را حل می‌کند و سرعت‌های نسبی را برای توصیف پراکنش فازها (dispersed) تعیین می‌کند. کاربردهایی از این مدل شامل جریان‌ات مملو از ذرات، جریان‌های حبابی، ته‌نشینی و جداگرهای چرخان می‌شود. این مدل بدون سرعت‌های نسبی می‌تواند برای مدل کردن پراکنش فازی جریان‌های چند فازی همگن استفاده شود. این مدل چند فازی می‌تواند برای شبیه سازی جریان‌های چندفازی که فازها با سرعت‌های متفاوت حرکت می‌کنند، استفاده شود. این مدل همچنین برای مدل کردن جریان‌های چندفازی همگن با اتصال خیلی قوی وانتقال فازها با سرعت‌های یکسان استفاده می‌شود. مدل Mixture با حل معادلات مومنتوم، پیوستگی و انرژی برای اختلاط، معادلات کسر حجمی برای فاز ثانوی و عبارت جبری برای نسبت سرعتها می‌تواند n فاز را مدل کند. محدودیت‌های کاربرد MIXTURE در FLUENT به شرح زیر می‌باشند.

- باید از حلال Segregated استفاده کنیم. در مدل Mixture اتصال بین حل کننده ها مقدور نیست.
 - فقط یکی از فازها می تواند تراکم پذیر باشد.
 - خط جریان تناوبی را نمی توانیم توسط Mixture مدل کنیم. (کاربر اجازه دارد افت فشار را تعیین کند)
 - انواع جریانات اختلاط و واکنش های جریان را نمی توان توسط Mixture مدل کرد.
 - در اجتماع با مدل Mixture نرمی و سختی را نمی توان مدل کرد.
 - فرمول بندی گام زمانی ضمنی مرتبه دوم را نمی توان توسط Mixture مدل نمود.
 - مدل آشفته LES را نمی توان در مدل Mixture استفاده نمود.
 - از مدل Mixture نمی توان برای جریانات لزج استفاده کرد.
 - مدل هدایت گرمایی پوسته برای دیوارها را نمی توان با استفاده از Mixture مدل نمود.
- مدل Mixture همانند VOF از رویکرد سیال منفرد (Single fluid) استفاده می کند با این تفاوت که مدل Mixture اجازه می دهد تا فازها در هم نفوذ نموده و با سرعت های متفاوتی حرکت کنند. این مدل می تواند معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را برای اختلاط و معادله کسر حجمی را برای فاز ثانوی حل کند و در صورتی که فازها با سرعت های متفاوت حرکت کنند نسبت سرعت ها را بیان کند. معادله پیوستگی برای Mixture به صورت زیر است: [35]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (25-4)$$

سرعت متوسط جرمی (\vec{v}_m) برابر است با:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (26-4)$$

و ρ_m چگالی اختلاط است.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (27-4)$$

که در اینجا α_k کسر حجمی فاز k است و \dot{m} نشان دهنده انتقال جرم ناشی از کوایتاسیون است. معادله مومنتوم برای Mixture با جمع معادله مومنتوم برای تک تک فازها بدست می آید و می تواند به صورت زیر نشان داده شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \vec{F} + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k}) \quad (28-4)$$

در اینجا n تعداد فازها، F نیروی حجمی و μ_m ویسکوزیته مخلوط است.

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (4-)$$

(29)

و $\vec{v}_{dr,k}$ سرعت رانشی (Drift velocity) برای فاز ثانوی K است:

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (30-4)$$

سرعت نسبی که به عنوان سرعت رانشی نیز از آن یاد می شود به صورت سرعت فاز ثانوی p نسبت به سرعت فاز اولیه q تعریف می شود:

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (31-4)$$

رابطه بین سرعت رانشی و سرعت لغزشی را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_{qk} \quad (32-4)$$

مدل Mixture در FLUENT از یک قاعده جبری شیب استفاده می کند. فرض اساسی مدل جبری اختلاط شیب تعیین یک رابطه جبری برای سرعت نسبی است. در یک فاصله کوتاه از مقیاس طولی یک تعادل محلی بین فازها باید برقرار شود. فرم سرعت نسبی توسط Manninen et al به صورت زیر ارائه شده است:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{(\rho_p - \rho_m) d_p^2}{18 \mu_q f_{drag}} \vec{a} \quad (33-4)$$

که d_p قطر ذرات فاز ثانوی p (قطر ریز قطره‌ها یا حباب‌ها) و \vec{a} شتاب ذرات فاز ثانوی است. پیش فرض تابع کشانه (Drag function) که توسط Schiller و Naumann ارائه شده است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_{\text{drag}} = \begin{cases} 1 + 0.15R_e^{0.687} & R_e \leq 1000 \\ 0.0183R_e & R_e > 1000 \end{cases} \quad (34-4)$$

و شتاب \vec{a} به صورت زیر است:

$$\vec{a} = \mathbf{g} - (\vec{v}_m \cdot \vec{\nabla})\vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (35-4)$$

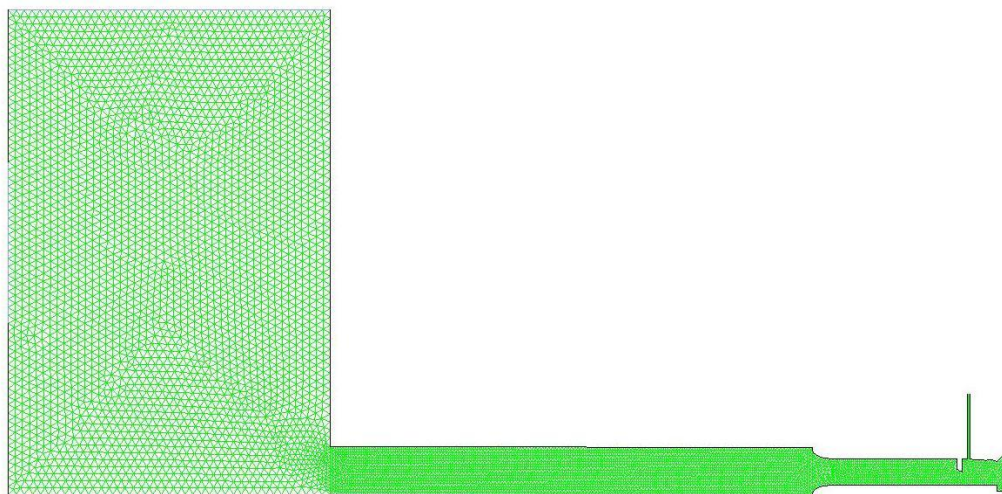
ساده‌ترین قاعده جبری شیب را اصطلاحاً مدل شار رانشی (Drift flux) گویند، که در آن شتاب ذرات توسط ثقل و یک نیروی گریز از مرکز بدست می‌آید و زمان استراحت (relaxation time) ذره با در نظر گرفتن حضور بقیه ذرات اصلاح می‌شود. باید به این نکته توجه شود که وقتی که ما یک مدل Mixture را با در نظر گرفتن سرعت نسبی حل می‌کنیم، می‌توانیم مستقیماً قواعدی را برای تابع درگ تعیین کنیم. انتخاب‌های در دسترس شامل Schiller و Naumann (قاعده پیش فرض)، Morsi-Alexander، متقارن و ثابت می‌باشند. از معادله پیوستگی برای فاز ثانوی p ، معادله کسر حجمی برای فاز ثانوی به صورت زیر بدست می‌آید: [35]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{\text{dr},p}) \quad (36-4)$$

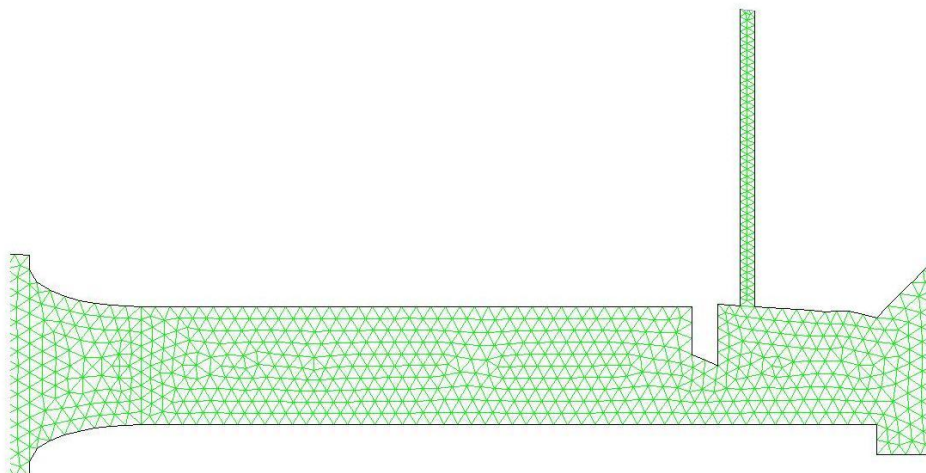
۴ ۴ - تحلیل اولیه و کالیبراسیون مدل

در این پایان نامه برای انجام شبیه سازی عددی از نرم افزار FLUENT 6.3.26 استفاده شد. برای مدل کردن دریچه و تونل تخلیه کننده از نرم افزار کمکی Gambit، که قابلیت مدل کردن مرزهای جریان، اختصاص شرایط مرزی و همچنین مش بندی دارد استفاده شده است. پردازشگر استفاده شده

در این پایان نامه پردازشگر دو بعدی دو دقته می باشد که علت انتخاب دو بعدی بودن مدل برای سرعت بیشتر انجام محاسبات می باشد و علت استفاده از حالت دودقته برای ایجاد دقت بیشتر در محاسبات است. شبکه بندی هندسی در قسمت هایی که میدان های فشار و سرعت دارای تغییرات زیادی هستند (مانند زیر و اطراف دریچه) ریزتر و در قسمت هایی با تغییرات کم، کمی بزرگتر از قسمت قبل انجام شده است. در نزدیکی دیواره ها مش بندی ریز انجام شده است تا بتوان اثرات لایه مرزی را در نظر گرفت. در یک مدل عددی جواب های نهایی باید مستقل از شبکه بندی باشند. در این پایان نامه برای گسسته سازی هندسه مدل نهایتاً از مشبندی چهار وجهی استفاده شده است. در مراحل اولیه تحلیل از مشبندی سه وجهی استفاده شده است که مشبندی سه وجهی باعث واگرا شدن نتایج مدل شد. شکل (۳-۴) و (۵-۴) نمونه ای از مش ۳ وجهی را نشان داده است.



شکل ۳-۴: مش بندی مدل با المان سه وجهی



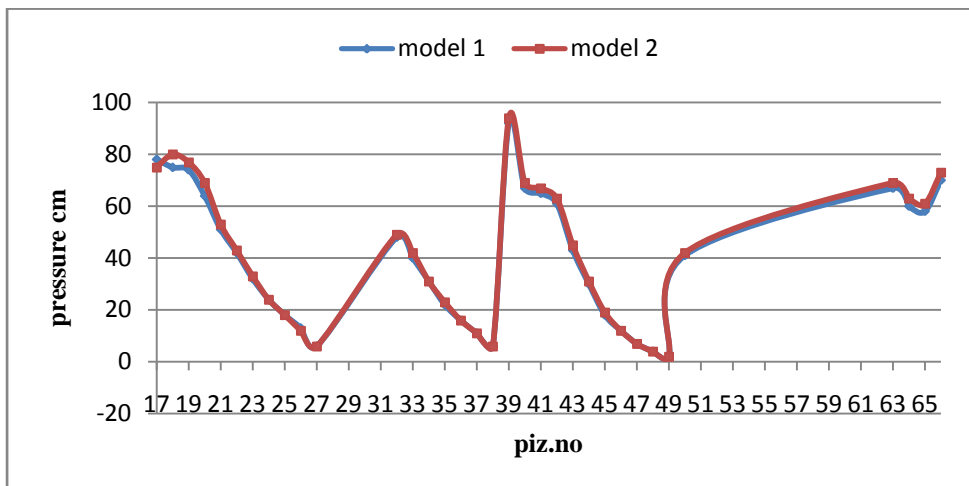
شکل ۴-۴: نمای مش بندی مدل تخلیه کننده و تونل با المان سه وجهی

در ادامه نتایج سه مشبندی که از مش های چهار وجهی برای مدل کردن آنها استفاده شده مقایسه شده است. البته باید توجه داشت تفاوت تعداد مش ها در این نمونه ها معطوف به منطقه زیر لبه دریچه و اطراف آن و همچنین ریزبودن مش ها در نواحی مرزی می باشد. در جدول ۴-۱ و شکل ۴-۵ نتایج فشار هیدروستاتیک و تفاوت بین مقادیر آن در مدل شماره ۱ و مدل شماره ۲ نشان داده شده است. و در شکل های ۴-۶ الی ۴-۸ نمایی از این مدل مشبندی نمایش داده شده است.

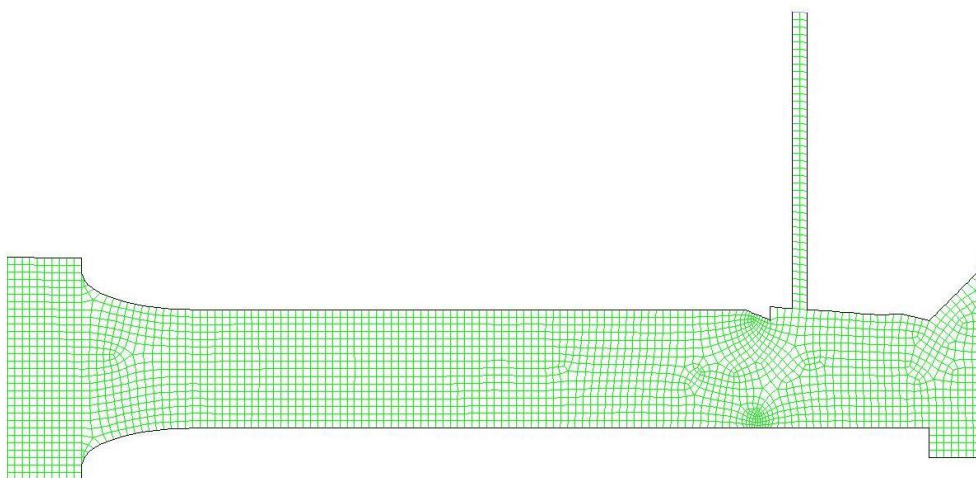
جدول ۴-۱: نتایج فشار در مدل شماره ۱ و مدل شماره ۲ برای هد ۲ متر

piz.no	model 1	model 2	error(%)	piz.no	model 1	model 2	error(%)
17	78	75	3.85%	38	6	6	0.00%
18	75	80	6.67%	39	92	94	2.17%
19	74	77	4.05%	40	67	69	2.99%
20	64	69	7.81%	41	65	67	3.08%
21	51	53	3.92%	42	61	63	3.28%
22	42	43	2.38%	43	43	45	4.65%
23	32	33	3.13%	44	30	31	3.33%
24	24	24	0.00%	45	18	19	5.56%
25	18	18	0.00%	46	12	12	0.00%
26	13	12	7.69%	47	7	7	0.00%
27	6	6	0.00%	48	4	4	0.00%
32	48	49	2.08%	49	2	2	0.00%
33	40	42	5.00%	50	41	42	2.44%
34	31	31	0.00%	63	67	69	2.99%

35	22	23	4.55%	64	60	63	5.00%
36	16	16	0.00%	65	58	61	5.17%
37	11	11	0.00%	66	70	73	4.29%
						average=	2.83%



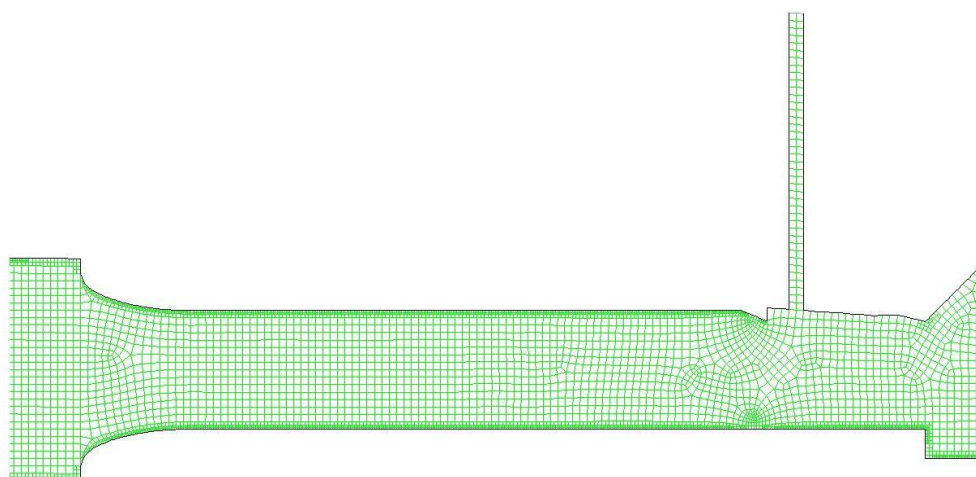
شکل ۴-۵: مقایسه فشار در مدل شماره ۱ و مدل شماره ۲



شکل ۴-۶: نمایی از مشبندی مدل ۱



شکل ۴-۷: نمایی از مشبندی مدل ۲

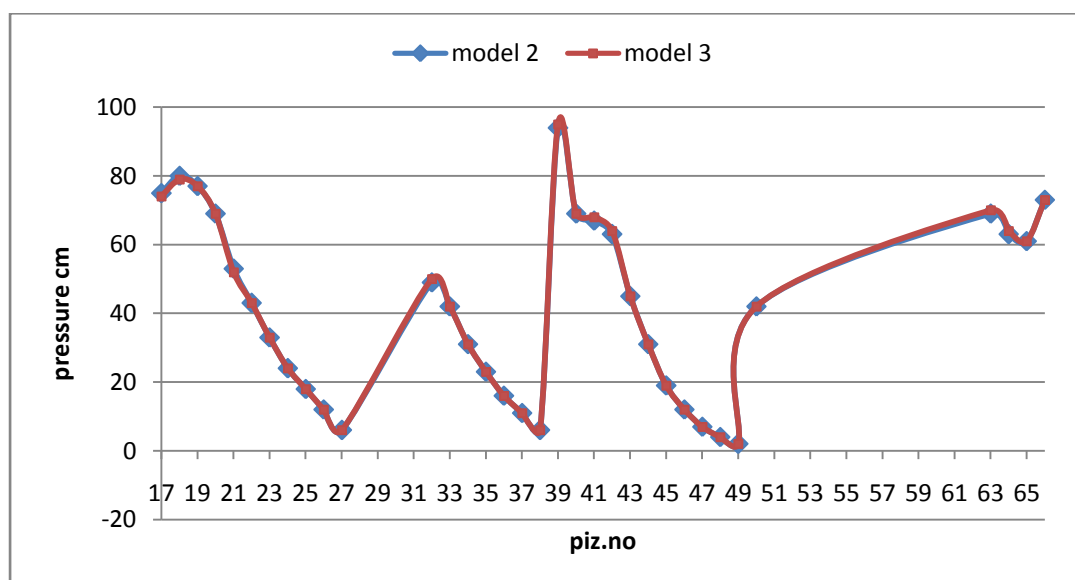


شکل ۴-۸: نمایی از مشبندی مدل ۳

در جدول ۲-۴ و شکل ۹-۴ تفاوت در مدل شمار ۲ و مدل شماره ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۲-۴: نتایج فشار در مدل شماره ۲ و مدل شماره ۳ برای هد ۲ متر

piz.no	model 2	model 3	error(%)	piz.no	model 2	model 3	error(%)
17	75	74	1.33%	38	6	6	0.00%
18	80	79	1.25%	39	94	95	1.06%
19	77	77	0.00%	40	69	69	0.00%
20	69	69	0.00%	41	67	68	1.49%
21	53	52	1.89%	42	63	64	1.59%
22	43	43	0.00%	43	45	45	0.00%
23	33	33	0.00%	44	31	31	0.00%
24	24	24	0.00%	45	19	19	0.00%
25	18	18	0.00%	46	12	12	0.00%
26	12	12	0.00%	47	7	7	0.00%
27	6	6	0.00%	48	4	4	0.00%
32	49	50	2.04%	49	2	2	0.00%
33	42	42	0.00%	50	42	42	0.00%
34	31	31	0.00%	63	69	70	1.45%
35	23	23	0.00%	64	63	64	1.59%
36	16	16	0.00%	65	61	61	0.00%
37	11	11	0.00%	66	73	73	0.00%
						average=	0.40%



شکل ۹-۴: مقایسه فشار در مدل شماره ۲ و مدل شماره ۳

همانگونه که در جدول ۴-۱ و جدول ۴-۲ مشخص شده است درصد اختلاف بین مش بندی با تعداد کمتر (۳۰۶۷۴ مش) در مدل یک با مدل با تعداد بیشتر مش (۶۰۰۶۴ مش) در حدود ۲.۸۳٪ می باشد. این مقدار اختلاف بیش از مقدار ۰/۵٪ اختلاف مجاز است که توصیه شده است. بنابراین با توجه به تعداد بسیار زیاد مش در مدل ۲، مبادرت به تولید مدلی با تعداد مش کمتر شد. در مدل ۳ تعداد مش نسبت به مدل ۲ کمتر است (۴۷۸۱۴ مش) و در کنار مرزها نیز اندازه آنها ریزتر شد تا مدل دارای شرایط مناسب تری در این محدوده ها باشد. نتایج مدل ۲ و مدل ۳ دارای اختلاف نسبی برابر با ۰/۴٪ می باشد که قابل قبول می باشد. بنابراین برای مدل سازی در این تحقیق از همین روش برای مش بندی استفاده شده است.

۴ ۵ - شرایط مدل سازی عددی در نرم افزار

همانطور که پیشتر درباره نرم افزار FLUENT توضیح داده شد این نرم افزار قابلیت های بسیار زیادی در حل انواع مختلف جریان های سیال دارد و در این پایان نامه از قابلیت های مختلف نرم افزار برای مدل کردن جریان استفاده شده است. در قسمت solver به علت وجود اختلاف فشارهای موجود در قسمت های مختلف جریان وجود دارد از گزینه PRESSURE BASED استفاده گردیده است. در این قسمت معادلات از روش 1-st order implicit محاسبه می شوند و زمان از روش unsteady استفاده می کند. در تحقیق از دو نوع سیال آب و هوا استفاده شده است که سیال آب با فاز یک و سیال هوا با فاز دو مشخص شده است. سیال آب دارای چگالی $998/2 \text{ kg/m}^3$ و ویسکوزیته 0.01003 kg/m.s است و سیال هوا دارای چگالی $1/225 \text{ kg/m}^3$ و ویسکوزیته $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ است.

در این مدلسازی برای آنکه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی تطابق کاملتری وجود داشته باشد مخزن نیز مدل سازی شده است. جهت مدل کردن جریان ورودی، روی مخزن یک مقطع به عنوان ورودی سرعت (velocity inlet) تعریف گردید. به علت آنکه مدل فیزیکی یک مدل سه بعدی بوده و مدل عددی شبیه سازی شده مدل دو بعدی می باشد باید مقدار دبی وارد شده به مخزن را بر عرض

مقطع تونل تقسیم کرد تا با مدل عددی دو بعدی تطبیق داده شود. لذا دبی خروجی بر واحد عرض مدل، تقسیم شده و در این بخش مورد استفاده قرار گرفته است. عرض مقطع داخلی کانال برابر ۱۱ سانتیمتر است و دبی های خروجی برای هر آزمایش بر این مقدار تقسیم شده و به علت آنکه جریان پیوسته می باشد مقدار دبی ورودی با دبی خروجی یکسان می باشد. در نتیجه مقدار دبی ورودی مدل عددی برابر با دبی خروجی مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. برای این منظور یک ورودی به ارتفاع یک متر تعریف شده و در آن از شرط مرزی velocity inlet استفاده گردیده است. در قسمت خروجی جریان از شرط مرزی pressure-outlet استفاده گردیده و مقدار فشار صفر در آن مقطع اعمال شده است. برای قسمت هواده نیز از شرط مرزی pressure-inlet استفاده گردیده است. همچنین یک ورودی فشار pressure-inlet برای قسمت بالای مخزن در نظر گرفته شده است تا فشار بر روی سطح مخزن برابر با فشار محیطی باشد. با توجه به برقراری جریان دو فاز آب-هوا، و اینکه FLUENT چند نوع الگوریتم مختلف برای حل این نوع جریان پیشنهاد می دهد، به علت بررسی پدیده کاویتاسیون از روش Mixture استفاده گردیده است.

وقتی که جریان از طریق ورودی سرعت و یا ورودی های دیگر وارد میدان می شود، باید مقدار کمیت های آشفتگی که از طریق ورودی منتقل می شوند نیز مشخص شود. شدت آشفتگی (Turbulence Intensity) به صورت نسبت جذر میانگین تغییرات سرعت u' به سرعت متوسط جریان u_{ave} تعریف می شود. شدت آشفتگی ۱٪ و یا کمتر به عنوان آشفتگی کم و شدت آشفتگی بزرگتر از ۱۰٪ به عنوان آشفتگی زیاد محسوب می شود. برای جریان های داخلی درون مجاری بسته، پارامترهای آشفتگی کاملا به جریان بالادست وابسته اند، اگر جریان داخل مجرا کاملا توسعه یافته باشد می توان مقدار شدت آشفتگی کمی به آن نسبت داد. شدت آشفتگی در هسته جریان را می توان از رابطه (۴-۳۷) محاسبه کرد:

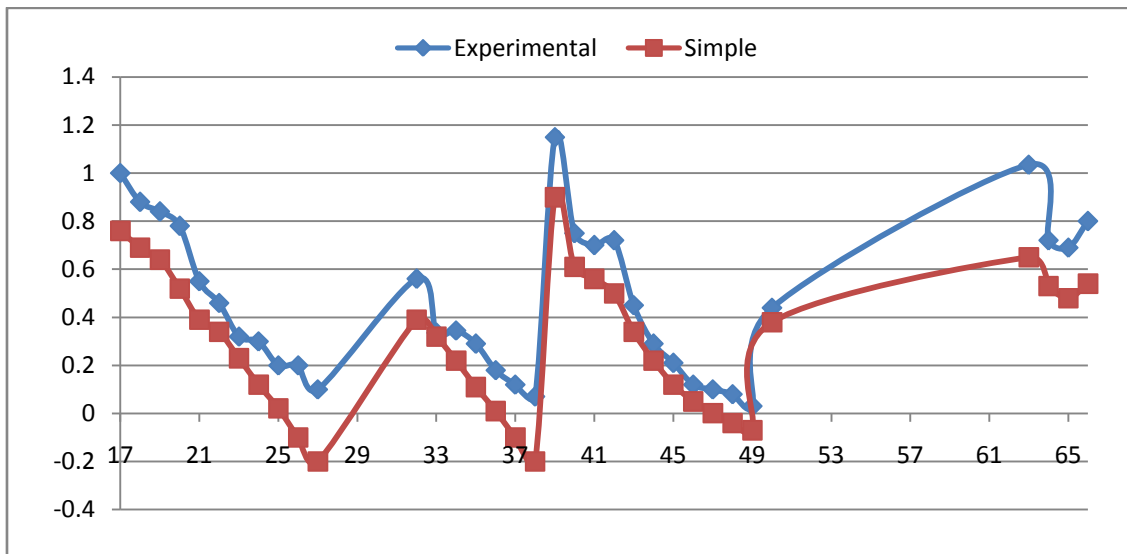
$$I \equiv \frac{u'}{u_{ave}} \cong 0.16(\text{Re}_{D_H})^{\frac{1}{8}} \quad (37-4)$$

که در آن Re_{D_H} عدد رینولدز جریان می باشد. برای جریان های کاملا توسعه یافته از شدت توربولانس و قطر هیدرولیکی (Hydraulic Diameter) به عنوان پارامترهای معرف آشفتگی در مرزهای ورودی و خروجی جریان استفاده می گردد. [35] به همین دلیل در مدل از این دو پارامتر بهره برده شده است. از آنجا که در مقطع ورودی جریان کاملا از آب تشکیل شده است لذا نسبت فاز هوا در این مرز برابر صفر و نسبت فاز آب برابر با یک در نظر گرفته شده است. در نزدیکی دیوار جهت همپوشانی بین اثرات جداره بر میدان سرعت حاصل از حل معادلات آشفتگی، از تابع دیوار استاندارد استفاده بعمل آمده است که در آن سرعت جریان روی دیواره صفر بوده و شرط عدم لغزش دیواره بر قرار گردیده است. در جریان آشفته FLUENT روش های گوناگونی همچون laminar, Spalart-Reynolds stress و $k-\epsilon, k-\omega$ را برای مدل سازی جریان آشفته پیشنهاد می دهد. در این تحقیق ابتدا از روش $k-\epsilon$ استفاده شد ولی مدل واگرا گردید. سپس مدل با استفاده از روش Reynolds Stress Model تحلیل شد که نتایج این مدل آشفتگی با مدل آزمایشگاهی دارای تطابق خوبی گردید. در نتیجه از این مدل آشفتگی برای حل سایر حالات استفاده گردید که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

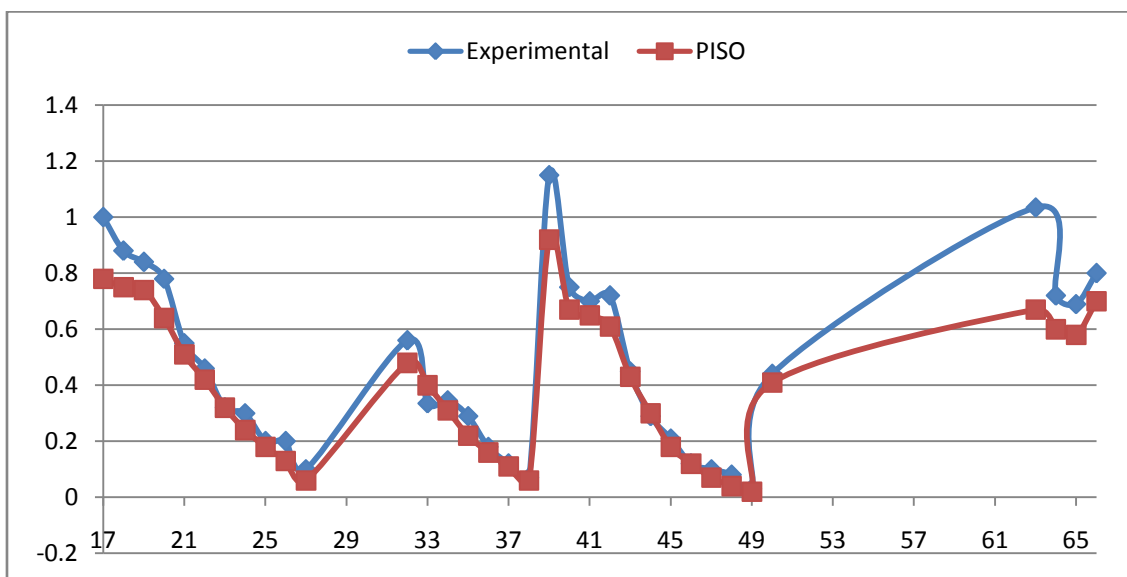
برای حل میدان فشار و سرعت، روش های PISO و Simple استفاده شده است. همانطور که در جدول ۱-۴ مشاهده می شود، میزان خطای بدست آمده از روش PISO بسیار کمتر از روش Simple می باشد. در نتیجه تمرکز تحقیقات بر روی روش PISO قرار گرفت. در جدول ۳-۴ و همچنین نمودارهای شکل ۱۰-۴ و ۱۱-۴ نتایج اولیه یکی از تست ها با بازشدگی ۹۰٪ دریچه و هد آب ۲ متر نشان داده شده و میزان اختلاف نتایج قابل ملاحظه است. همانطور که در جدول نشان داده شده است مقدار خطای روش Simple برابر با ۷۵٪ و روش PISO برابر با ۱۵/۳٪ می باشد و همچنین جذر مربعات خطاها به ترتیب برابر با ۱۱۹/۲٪ و ۲۰/۲٪ می باشد.

جدول ۳-۴: مقایسه نتایج روش های PISO و Simple در تحلیل میدان

piz.no	static pressure numerical			error(%)		root mean square	
	Experimental	Simple	PISO	Simple	PISO	Simple	PISO
17	1	0.76	0.78	24.0	22.0	576.0	484.0
18	0.88	0.69	0.75	21.6	14.8	466.2	218.2
19	0.84	0.64	0.74	23.8	11.9	566.9	141.7
20	0.78	0.52	0.64	33.3	17.9	1111.1	322.2
21	0.55	0.39	0.51	29.1	7.3	846.3	52.9
22	0.46	0.34	0.42	26.1	8.7	680.5	75.6
23	0.32	0.23	0.32	28.1	0.0	791.0	0.0
24	0.3	0.12	0.24	60.0	20.0	3600.0	400.0
25	0.2	0.021	0.18	89.5	10.0	8010.3	100.0
26	0.2	-0.1	0.13	150.0	35.0	22500.0	1225.0
27	0.1	-0.2	0.06	300.0	40.0	90000.0	1600.0
32	0.56	0.39	0.48	30.4	14.3	921.6	204.1
33	0.335	0.32	0.4	4.5	-19.4	20.0	376.5
34	0.345	0.22	0.31	36.2	10.1	1312.7	102.9
35	0.29	0.11	0.22	62.1	24.1	3852.6	582.6
36	0.18	0.01	0.16	94.4	11.1	8919.8	123.5
37	0.12	-0.1	0.11	183.3	8.3	33611.1	69.4
38	0.07	-0.2	0.06	385.7	14.3	148775.5	204.1
39	1.15	0.9	0.92	21.7	20.0	472.6	400.0
40	0.75	0.61	0.67	18.7	10.7	348.4	113.8
41	0.7	0.56	0.65	20.0	7.1	400.0	51.0
42	0.72	0.5	0.61	30.6	15.3	933.6	233.4
43	0.45	0.34	0.43	24.4	4.4	597.5	19.8
44	0.29	0.22	0.3	24.1	-3.4	582.6	11.9
45	0.21	0.12	0.18	42.9	14.3	1836.7	204.1
46	0.12	0.05	0.12	58.3	0.0	3402.8	0.0
47	0.1	0.001	0.07	99.0	30.0	9801.0	900.0
48	0.08	-0.04	0.04	150.0	50.0	22500.0	2500.0
49	0.03	-0.07	0.02	333.3	33.3	111111.1	1111.1
50	0.44	0.38	0.41	13.6	6.8	186.0	46.5
63	1.035	0.65	0.67	37.2	35.3	1383.7	1243.7
64	0.72	0.53	0.6	26.4	16.7	696.4	277.8
65	0.69	0.48	0.58	30.4	15.9	926.3	254.1
66	0.8	0.54	0.7	32.5	12.5	1056.3	156.3
			average=	74.9	15.28	119.2	20.2



شکل ۴-۱۰: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک تحلیل میدان فشار مدل Experimental و مدل عددی بر اساس روش Simple



شکل ۴-۱۱: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک تحلیل میدان فشار مدل Experimental و مدل عددی بر اساس روش PISO

چنانچه ملاحظه شد نتایج روش حل PISO با نتایج مدل آزمایشگاهی دارای تطابق مناسبی می باشد. برای بدست آوردن نتایج بهتر با کوچکتر کردن شبکه مش بندی مدل در نقاط حساس و همچنین در کناره های دیوار تلاش گردید تا نتایج بهتری بدست آید. البته ریز کردن مش تا آنجا ادامه داشته است

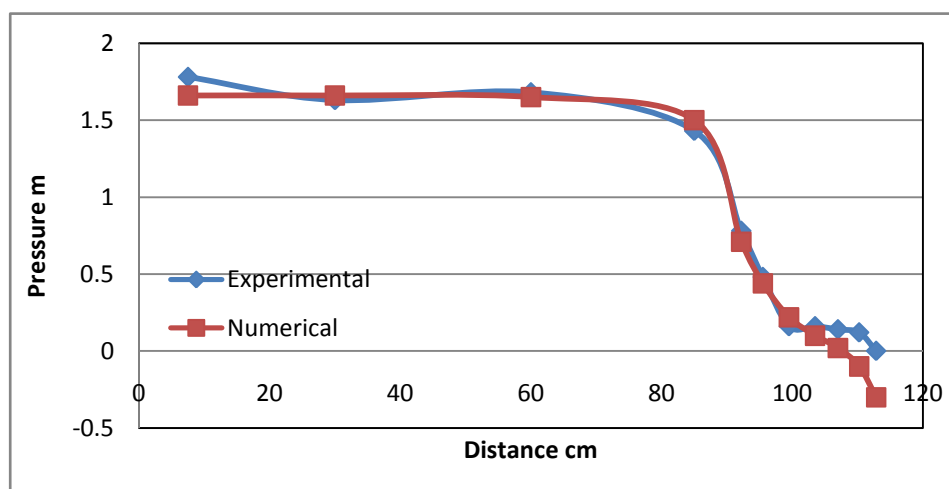
که نتایج مدل عددی قبلی با نتایج مدل عددی جدید دارای اختلاف ناچیز بوده که در این تحقیق معیار ۰/۵٪ مد نظر قرار گرفت، زیرا کوچکتر کردن مش تأثیر چشمگیری بر روی نتایج نداشت. در این پایان نامه برای سنجش صحت نتایج عددی از نتایج آزمایشگاهی استفاده گردیده است. بنابراین ابتدا شرایط مدل عددی برای لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ درجه با مدل آزمایشگاهی چک شده و سپس مدل های دیگر با زاویه های مختلف اجرا شده است. متأسفانه به علت کمبود زمان، تنها از هد ۲ متر و باز شدگی ۵۰٪ و ۷۰٪ و ۹۰٪ استفاده شد. ابتدا بررسی نتایج این مدل ها با نتایج مدل آزمایشگاهی برای زاویه لبه دریچه فوق صورت گرفته و پس از اطمینان از تطابق آنها با یکدیگر، اقدام به مدل سازی لبه دریچه ۴۵ و ۶۰ درجه شده است.

برای محاسبات از `cpu 7500 core 2 duo 2.4 GHZ` استفاده شده است که برای هر کدام از مدل ها در حدود ۳ الی ۵ روز طول کشیده است.

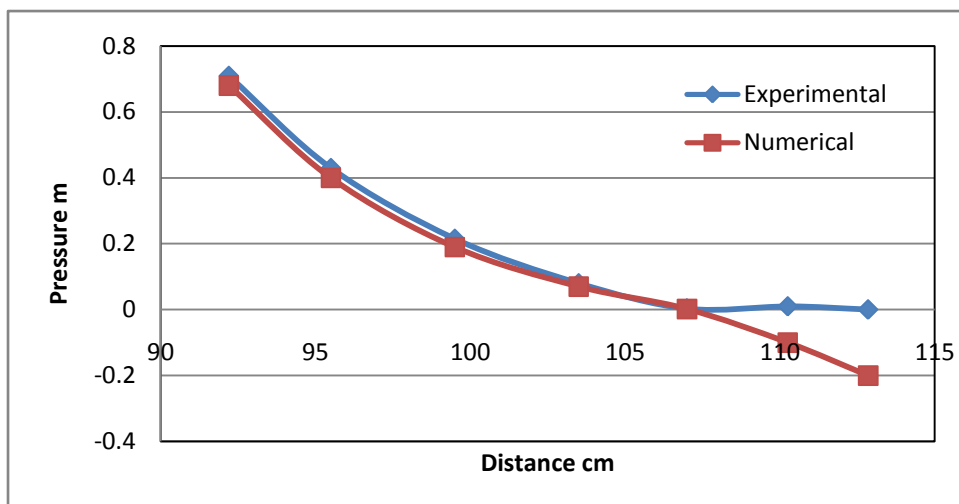
در جدول ۴-۴ نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی برای لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به افق و هد ارتفاعی ۲ متر در باز شدگی ۵۰٪ نمایش داده شده است. باز شدگی ها با درصد و فاصله نقاط پیزومترها از ابتدای شروع کانال انتقال آب در ستون X نمایش داده شده است. تمام فشارهای پیزومتریک و فواصل داده شده در جدول بر حسب سانتیمتر می باشد. مطابق این جدول و همچنین نمودار شکل های ۴-۱۲ الی ۴-۱۶، خطا در بسیاری نقاط مجرا قابل قبول بوده و در بعضی نقاط محدود بخصوص در حد فاصل انتقال جریان تحت فشار به جریان آزاد، مدل با خطا بالا همراه گردیده است. در این شکل ها محور افق معرف فاصله پیزومترها از نقطه ابتدایی کانال بر حسب سانتیمتر می باشد. محور قائم نیز معرف فشار پیزومتریک بر حسب متر است. لازم به ذکر است خطا ها در جاهایی که اعداد بسیار کوچک می باشند برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۴: مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در بازشدگی ۵۰٪ در پیچه و هد ۲ متر با لبه ۲۲/۵ درجه

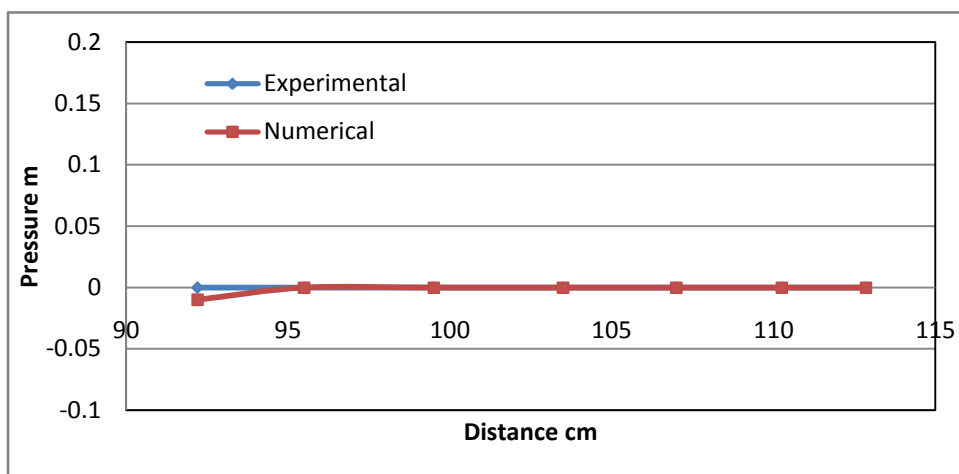
Piz.NO	X (cm)	نتایج باز شدگی ۵۰٪		error	Piz.NO	X (cm)	نتایج باز شدگی ۵۰٪		Error
		آزمایش	عددی				آزمایش	عددی	
17	7.5	178	166	6.74%	41	60	159	157	1.26%
18	30	163	166	1.84%	42	85	147	145	1.36%
19	60	168	165	1.79%	43	92.2	1	-1	0.00%
20	85	143	150	4.90%	44	95.5	0	0	0.00%
21	92.2	78	71	8.97%	45	99.5	0	0	0.00%
22	95.5	48	44	8.33%	46	103.5	0	0	0.00%
23	99.5	16	22	37.50%	47	107	0	0	0.00%
24	103.5	16	10	37.50%	48	110.25	0	-0.1	0.00%
25	107	14	2	85.71%	49	112.85	0	-0.1	0.00%
26	110.25	12	-10	183.33%	50	92.2	0	-1	0.00%
27	112.85	0	-30	0.00%	51	95.5	0	0	0.00%
32	92.2	71	68	4.23%	52	99.5	0	0	0.00%
33	95.5	43	40	6.98%	53	103.5	0	0	0.00%
34	99.5	21.5	19	11.63%	54	107	0	0	0.00%
35	103.5	8	7	0.00%	55	110.25	0	0	0.00%
36	107	0.3	0.2	0.00%	56	112.85	0	0	0.00%
37	110.25	1	-10	0.00%	63	7.5	158.5	151	4.73%
38	112.85	0	-20	0.00%	64	30	151	150	0.66%
39	7.5	169	165	2.37%	65	60	152	150	1.32%
40	30	159	157	1.26%	66	85	165	172	4.24%
average=						10.42%			



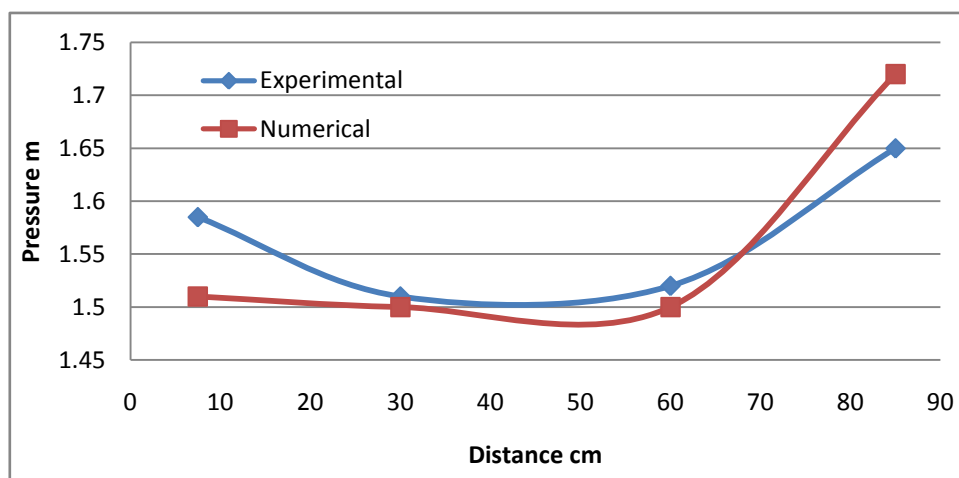
شکل ۴-۱۲: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیچ‌های ۱۷ الی ۲۷ و بازشدگی ۵۰٪



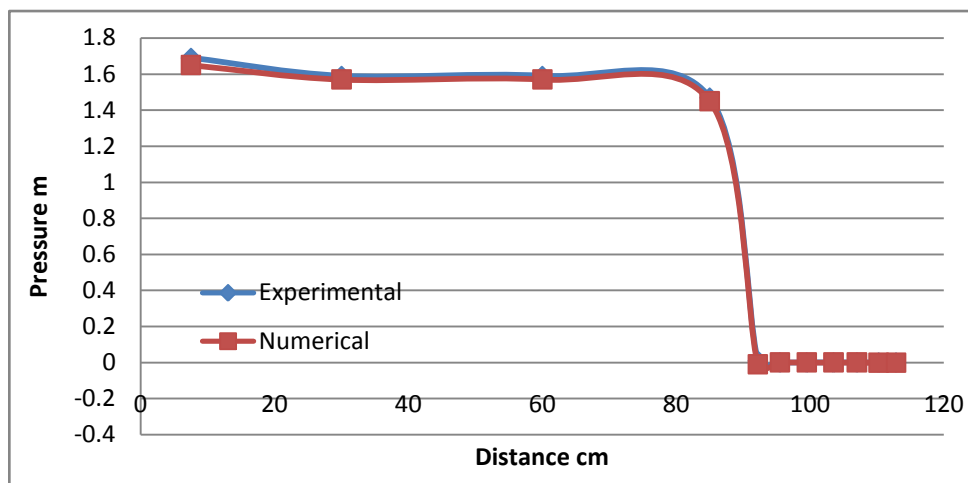
شکل ۴-۱۳: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۳۲ الی ۳۸ و بازشدگی ۵۰٪.



شکل ۴-۱۴: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۵۰ الی ۵۶ و بازشدگی ۵۰٪.



شکل ۴-۱۵: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۶۳ الی ۶۶ و بازشدگی ۵۰٪.



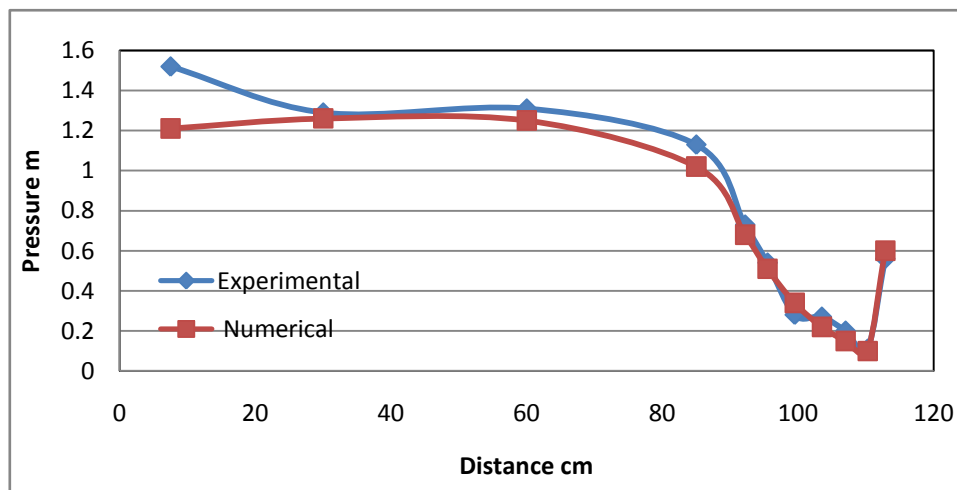
شکل ۴-۱۶: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۳۹ الی ۴۹ و بازشدگی ۵۰٪

جدول ۴-۵ و شکل های ۴-۱۷ الی ۴-۲۱ نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی برای لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به افق و هد ارتفاعی ۲ متر در بازشدگی ۷۰٪ و جدول ۴-۶ و شکل های ۴-۲۲ الی ۴-۲۶ نیز نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی برای بازشدگی ۹۰٪ را نشان می دهد. بازشدگی ها با درصد و فاصله نقاط پیزومترها از ابتدای شروع کانال انتقال آب در ستون X نمایش داده شده است. تمام فشارهای پیزومتر و فواصل داده شده در جدول بر حسب سانتیمتر ولی فشار در نمودارها بر حسب متر می باشد.

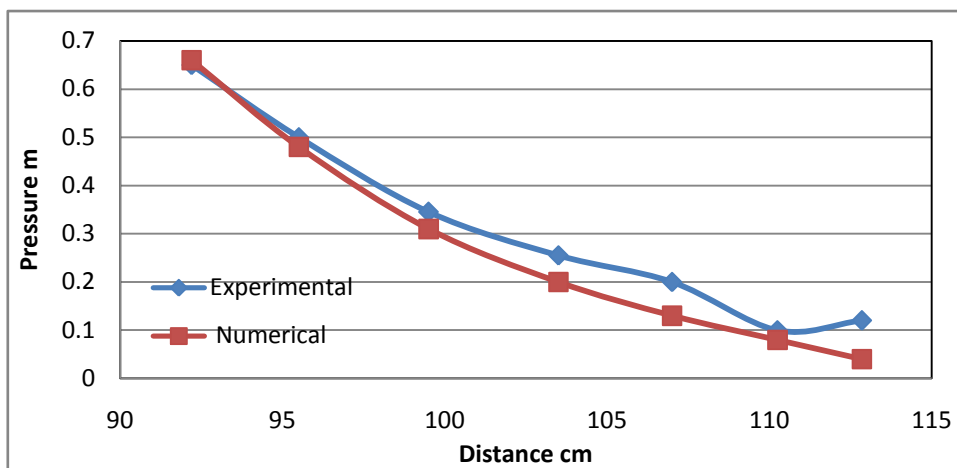
همانطور که در شکل ها و جدول ها ملاحظه می شود، مقدار خطای روش عددی با نتایج آزمایشگاهی بسیار کم می باشد. برای بازشدگی ۵۰٪ این خطای میانگین برابر با ۱۰/۴۲٪ و برای بازشدگی ۷۰٪ برابر ۷/۷۵٪ و برای بازشدگی ۹۰٪ معادل ۱۰/۹٪ می باشد. میانگین این سه حالت نیز مورد برابر با ۹/۶۹٪ می باشد. بر اساس نتایج حاصل روند صعودی و نزولی مقادیر فشار پیزومتریک در دو حالت عددی و آزمایشگاهی نیز همخوانی بسیار خوبی را نشان می دهد.

جدول ۴-۵: مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در بازشدگی ۷۰٪ در پیچه و هد ۲ متر با لبه ۲۲/۵ درجه

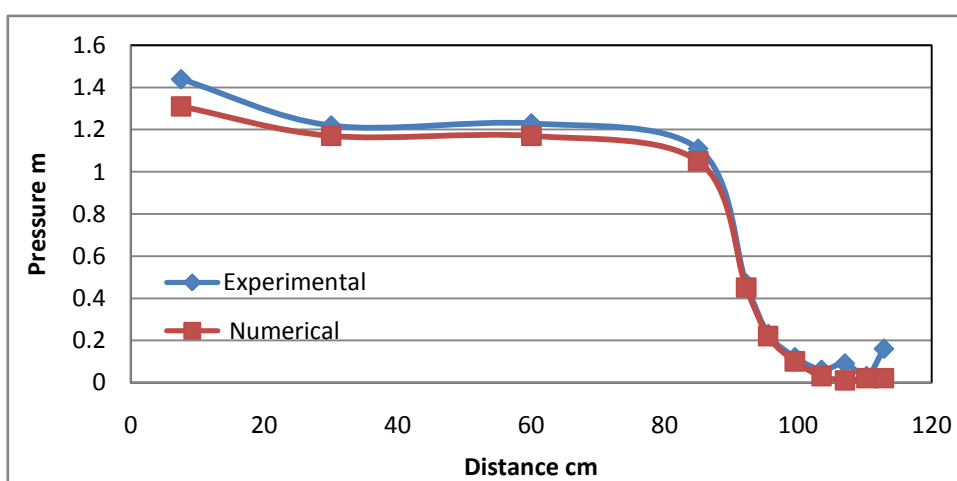
piz.no	X (cm)	باز شدگی ۷۰٪		error	piz.no	X (cm)	باز شدگی ۷۰٪		error
		آزمایش	عددی				آزمایش	عددی	
17	7.5	152	121	20.39%	41	60	123	117	4.88%
18	30	129	126	2.33%	42	85	111	105	5.41%
19	60	131	125	4.58%	43	92.2	47	45	4.26%
20	85	113	102	9.73%	44	95.5	23	22	4.35%
21	92.2	73	68	6.85%	45	99.5	12	10	16.67%
22	95.5	54	51	5.56%	46	103.5	6	3	0.00%
23	99.5	28	34	21.43%	47	107	9	1	0.00%
24	103.5	27	22	18.52%	48	110.25	3	2	0.00%
25	107	20	15	25.00%	49	112.85	16	2	0.00%
26	110.25	11	10	9.09%	50	92.2	20	19	5.00%
27	112.85	56	60	7.14%	51	95.5	1	1	0.00%
32	92.2	65	66	1.54%	52	99.5	0	-1	0.00%
33	95.5	50	48	4.00%	53	103.5	0	-2	0.00%
34	99.5	34.5	31	10.14%	54	107	0	-0.2	0.00%
35	103.5	25.5	20	21.57%	55	110.25	0	0	0.00%
36	107	20	13	35.00%	56	112.85	0	2	0.00%
37	110.25	10	8	20.00%	63	7.5	132.5	112	15.47%
38	112.85	12	4	7.75%	64	30	116	110	5.17%
39	7.5	144	131	9.03%	65	60	114	110	3.51%
40	30	122	117	4.10%	66	85	137	139	1.46%
average= 7.75%									



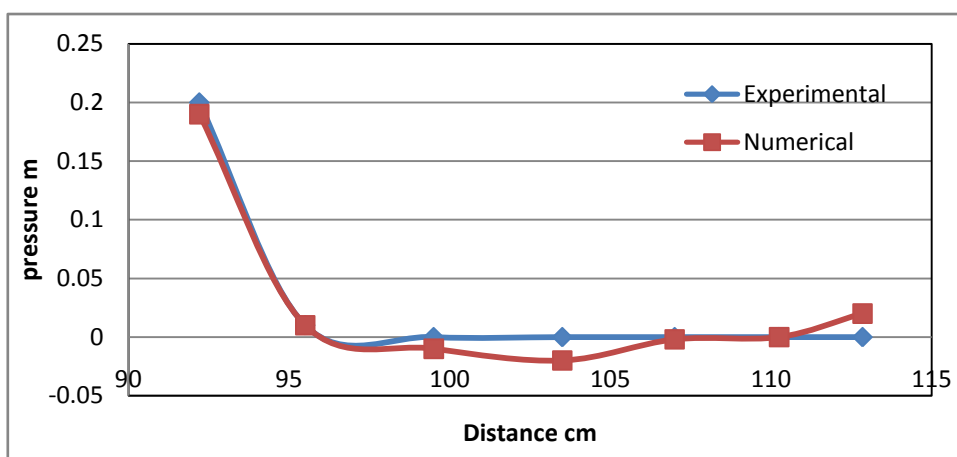
شکل ۴-۱۷: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۱۷ الی ۲۷ و بازشدگی ۷۰٪



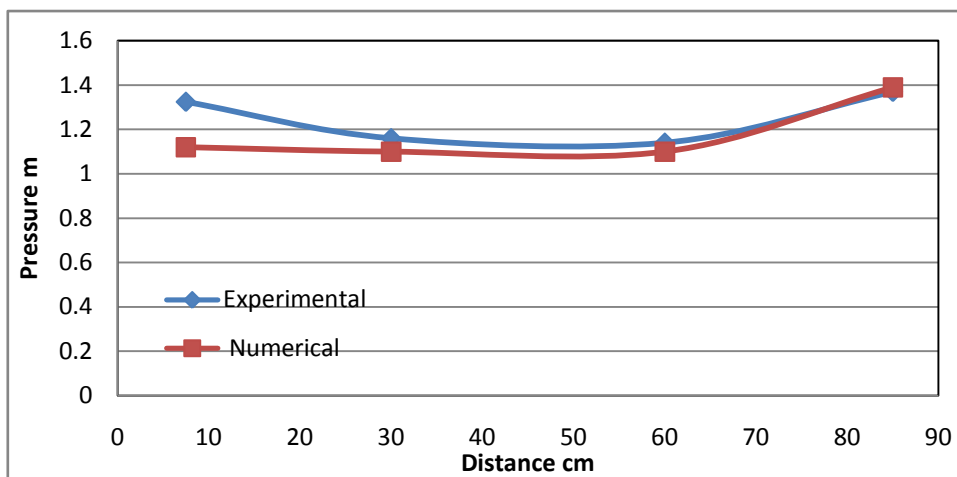
شکل ۴-۱۸: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۳۲ الی ۳۸ و بازشدگی ۷۰٪



شکل ۴-۱۹: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۳۹ الی ۴۹ و بازشدگی ۷۰٪



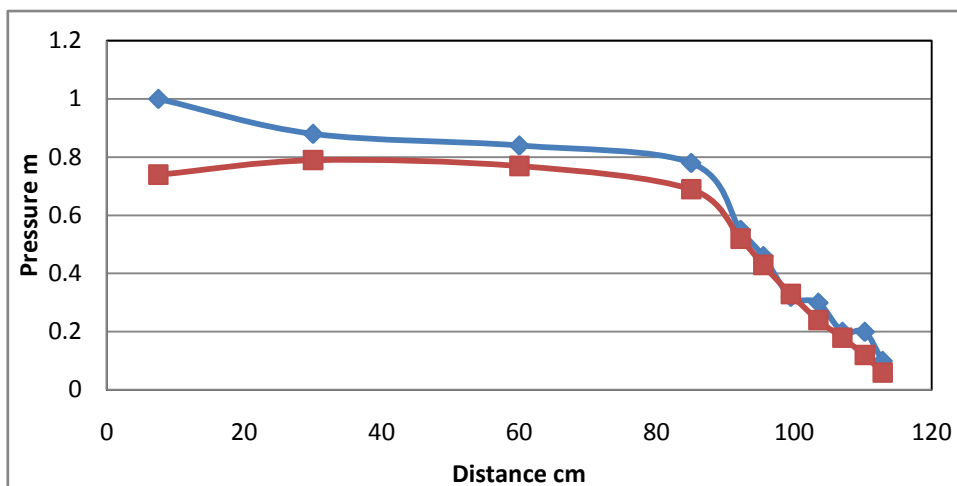
شکل ۴-۲۰: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۵۰ الی ۵۶ و بازشدگی ۷۰٪



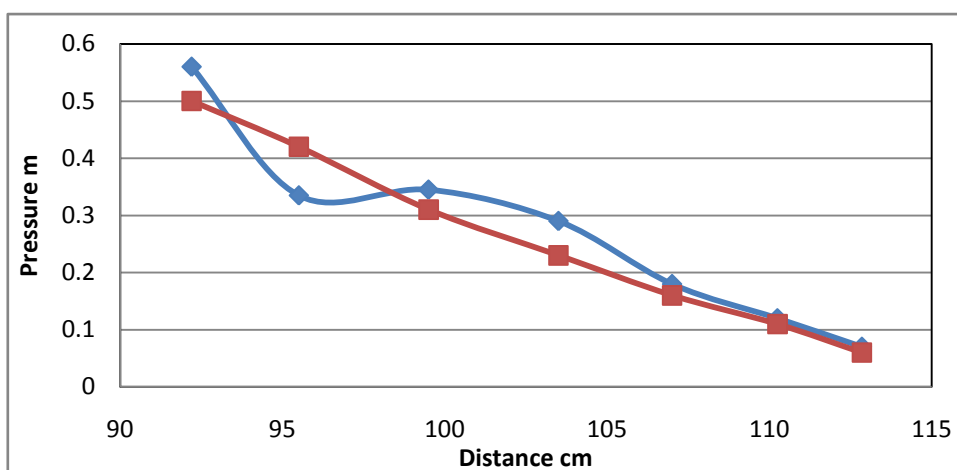
شکل ۴-۲۱: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۶۳ الی ۶۶ و بازشدگی ۷۰٪

جدول ۴-۶: مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در بازشدگی ۹۰٪ در پیچه و هد ۲ متر با لبه ۲۲/۵ درجه

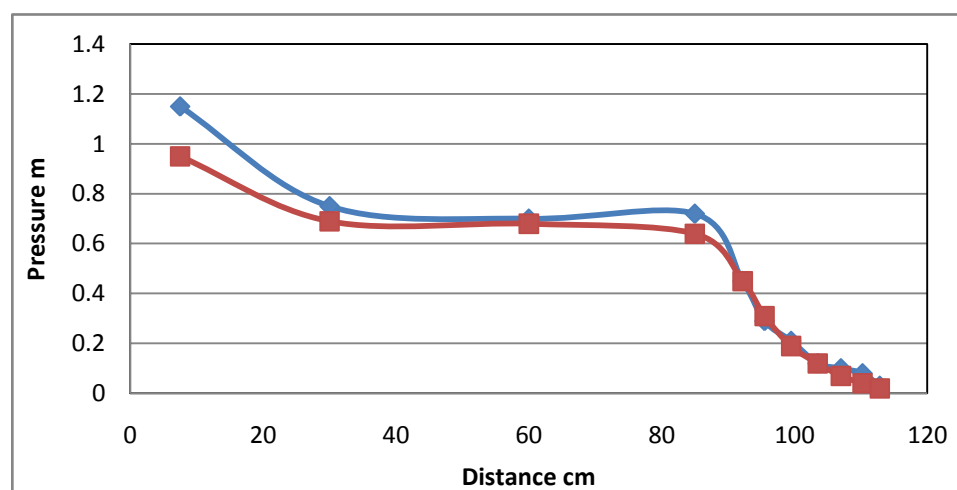
piz.no	X (cm)	باز شدگی ۹۰٪		error	piz.no	X (cm)	باز شدگی ۹۰٪		Error
		آزمایش	عددی				آزمایش	عددی	
17	7.5	100	74	26.00%	41	60	70	68	2.86%
18	30	88	79	10.23%	42	85	72	64	11.11%
19	60	84	77	8.33%	43	92.2	45	45	0.00%
20	85	78	69	11.54%	44	95.5	29	31	6.90%
21	92.2	55	52	5.45%	45	99.5	21	19	9.52%
22	95.5	46	43	6.52%	46	103.5	12	12	0.00%
23	99.5	32	33	3.13%	47	107	10	7	30.00%
24	103.5	30	24	20.00%	48	110.25	8	4	0.00%
25	107	20	18	10.00%	49	112.85	3	2	0.00%
26	110.25	20	12	40.00%	50	92.2	44	42	4.55%
27	112.85	10	6	40.00%	51	95.5	0	0	0.00%
32	92.2	56	50	10.71%	52	99.5	0	-0.1	0.00%
33	95.5	33.5	42	25.37%	53	103.5	0	-0.1	0.00%
34	99.5	34.5	31	10.14%	54	107	0	-0.1	0.00%
35	103.5	29	23	20.69%	55	110.25	0	-0.1	0.00%
36	107	18	16	11.11%	56	112.85	0	-0.1	0.00%
37	110.25	12	11	8.33%	63	7.5	103.5	70	32.37%
38	112.85	7	6	14.29%	64	30	72	64	11.11%
39	7.5	115	95	17.39%	65	60	69	61	11.59%
40	30	75	69	8.00%	66	85	80	73	8.75%
average= 10.90%									



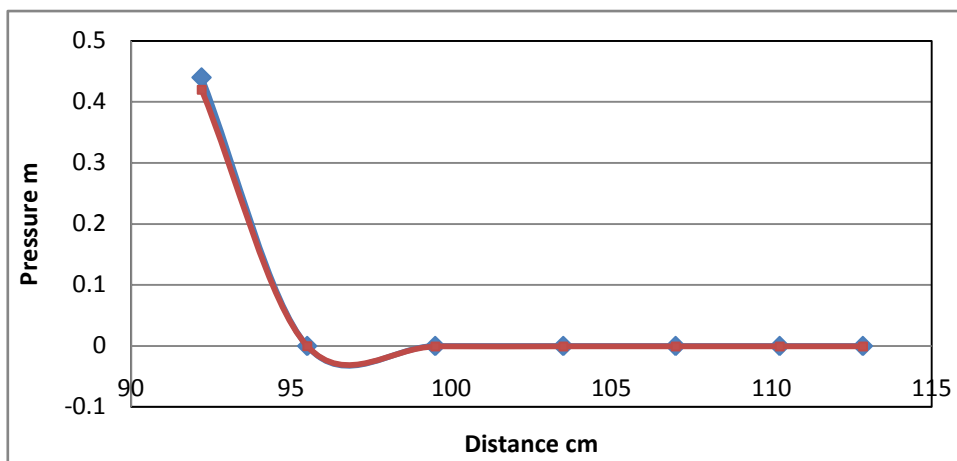
شکل ۴-۲۲: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۱۷ الی ۲۷ و بازشدگی ۹۰٪



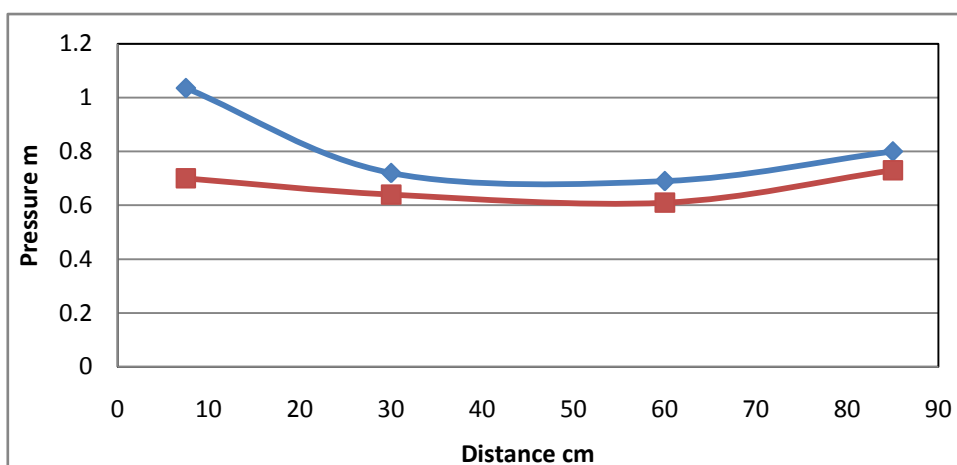
شکل ۴-۲۳: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۳۲ الی ۳۸ و بازشدگی ۹۰٪



شکل ۴-۲۴: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۳۹ الی ۴۹ و بازشدگی ۹۰٪



شکل ۴-۲۵: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۵۰ الی ۵۶ و بازشدگی ۹۰٪.



شکل ۴-۲۶: مقایسه نتایج فشار پیزومتریک مدل عددی و آزمایشگاهی در پیزومترهای ۶۳ الی ۶۶ و بازشدگی ۹۰٪.

با توجه به نتایج مقایسه ای بین مدل عددی و آزمایشگاهی، در فصل بعد این مدل جهت تحلیل عددی جریان عبوری از دریچه فوق با زوایای لبه دریچه ۴۵ و ۶۰ درجه با بازشدگی های ۹۰٪، ۷۰٪ و ۵۰٪ مورد استفاده و نتایج آن ارائه می گردد.

فصل پنجم

۵ - فصل پنجم : ارائه و تفسیر نتایج

۵ - مقدمه

در فصل قبل مدل عددی بر اساس نتایج آزمایشگاهی انتخاب و کالیبره شد. در این فصل تأثیر زاویه لبه دریچه (زاویه لبه دریچه با افق) بر جریان، هوادهی و میزان غلظت هوا در جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. غلظت جریان بر اساس مقدار فاز آب در مقطع مورد نظر جریان ارائه می‌شود. اگر در هر سلول از مدل عددی ۵۰٪ و یا بیشتر از ماده فاز یک که همان آب می‌باشد قرار گیرد، می‌توان آن سطح را جزء آب در نظر گرفت. در این مطالعه سه مقطع به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است :

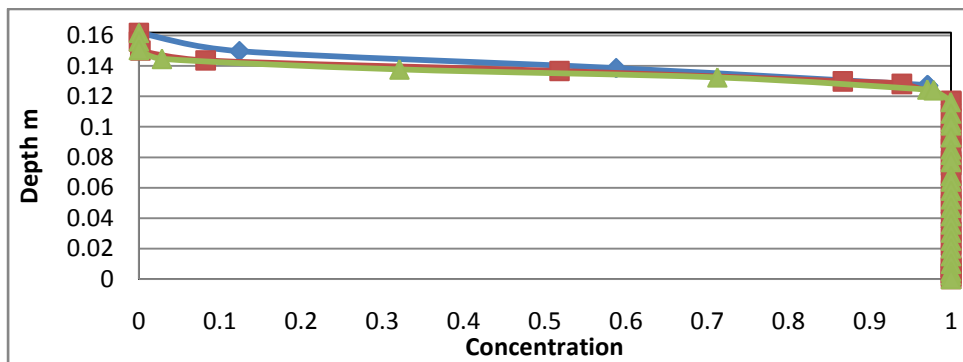
- مقطع پس از دریچه به فاصله ۲/۵ سانتیمتر از زیر لبه دریچه
- مقطع پس از دریچه و پس از هواده به فاصله ۶/۵ سانتیمتر از زیر لبه دریچه
- مقطع در انتهای کانال به فاصله ۱۹/۸۵ سانتیمتر از زیر لبه دریچه

۵ - ارائه نتایج

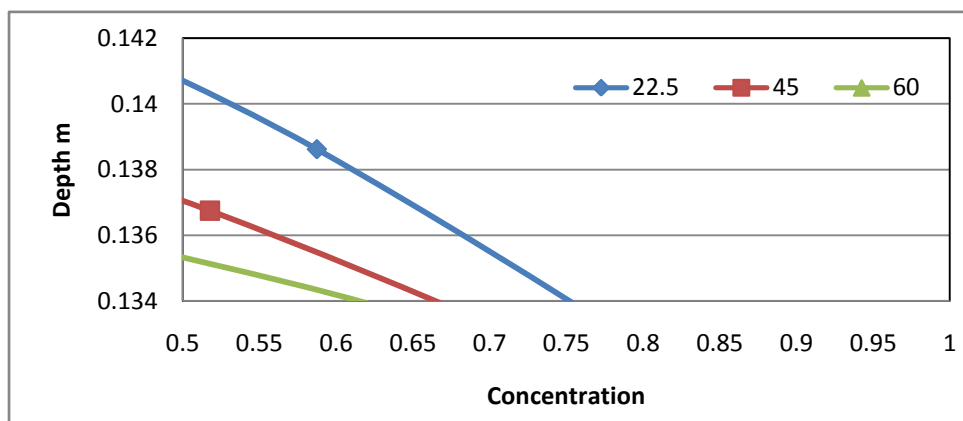
در این بخش ابتدا بازشدگی ۹۰٪ مورد بررسی قرار گرفته است. در نمودار شکل های ۵-۱ الی ۵-۳ مقدار غلظت جریان در آب بر حسب ارتفاع کانال در آن مقطع در راستای عمودی نشان داده شده است. محور افق معرف غلظت و محور قائم معرف فاصله عمودی از کف می‌باشد. در این نمودارها عدد ۱ به منزله پر بودن کامل آن قسمت از جریان (۱۰۰٪) از فاز یک یا آب می‌باشد. در نمودار اول کل مقطع نشان داده شده، ولی از آنجا که دقت مشاهده ای نتایج به دلیل مقیاس کوچک پائین می‌باشد، لذا نمودار دوم بخشی از جریان با بیش از ۵۰٪ آب را بصورت بزرگنمایی برجسته نموده است. هر یک از نمودارهای نشان داده شده مربوط به یک زاویه لبه دریچه است.

در این نمودارها، غلظت آب ۰/۵ معرف وجود ۵۰٪ آب در سلول می‌باشد. مطابق نتایج حاصل ملاحظه می‌شود که برای لبه دریچه با زاویه های مختلف، غلظت ۵۰٪ در ارتفاع های مختلفی بدست

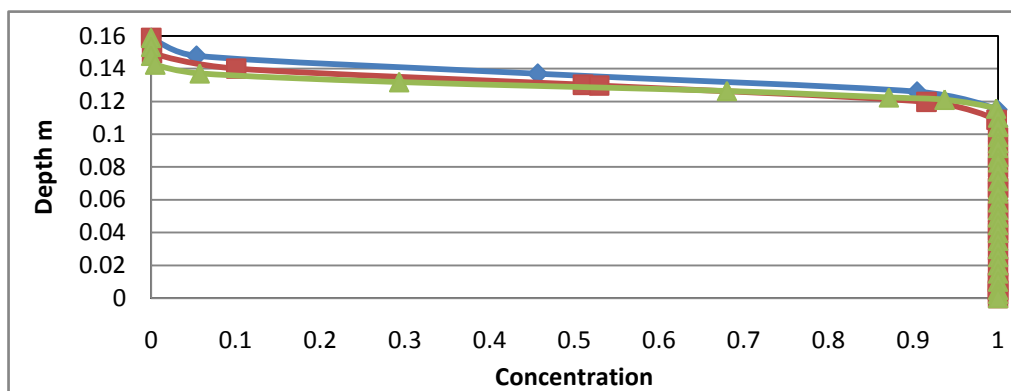
آمده است. در لبه دریچه با زاویه $22/5$ درجه در فاصله $2/5$ سانتیمتری از لبه دریچه ارتفاع مترادف آب با غلظت 50% هوا برابر $14/1$ سانتیمتر و ارتفاع آب با غلظت 100% برابر با $11/5$ سانتیمتر می باشد. این ارتفاعات برای لبه دریچه با زاویه 45 درجه به ترتیب برابر $13/7$ و $10/6$ سانتیمتر و برای لبه دریچه با زاویه 60 درجه به ترتیب برابر $13/5$ و $10/9$ سانتیمتر می باشد (شکل ۱-۵ و ۲-۵). در مقطعی در فاصله $6/5$ سانتیمتر ارتفاع کف تا سقف کانال برابر با $15/9$ سانتیمتر می باشد. این مقطع بعد از هواده دریچه قرار دارد (شکل ۳-۵ و ۴-۵). همانگونه که در نمودار شکل ۴-۵ ملاحظه می شود، در لبه دریچه با زاویه $22/5$ درجه ارتفاع مترادف غلظت 50% برابر $13/6$ سانتیمتر و ارتفاع معادل با غلظت 100% آب برابر با $10/5$ سانتیمتر می باشد. این مقادیر برای لبه دریچه با زاویه 45 درجه به ترتیب برابر با $13/05$ سانتیمتر و $9/8$ سانتیمتر می باشد و برای لبه دریچه با زاویه 60 درجه برابر $12/9$ سانتیمتر و $11/02$ سانتیمتر می باشد.



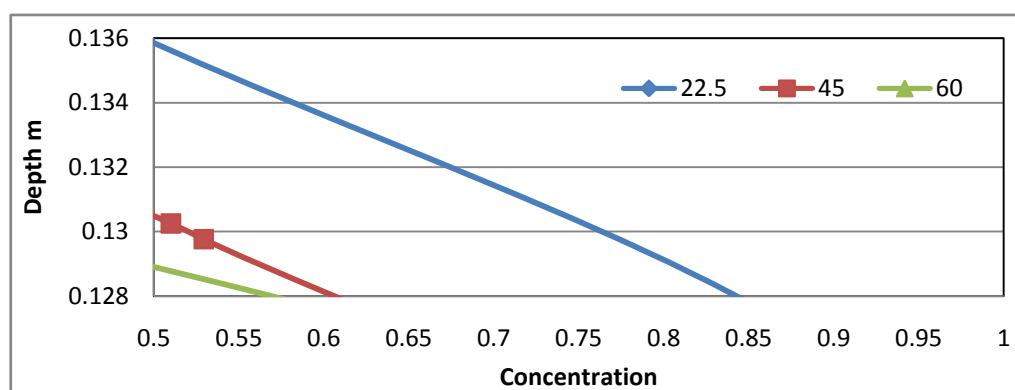
شکل ۱-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی 90% و فاصله $x=2.5\text{cm}$



شکل ۲-۵: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی 90% و فاصله $x=2.5\text{cm}$

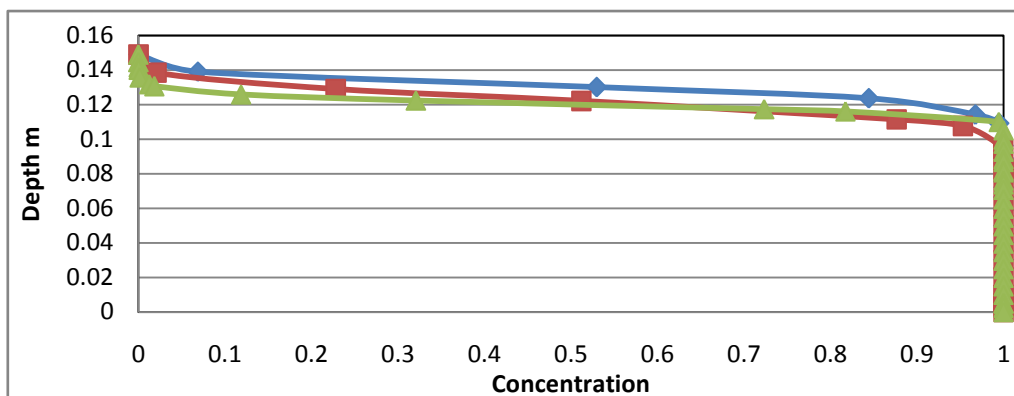


شکل ۳-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $x=6.5\text{cm}$

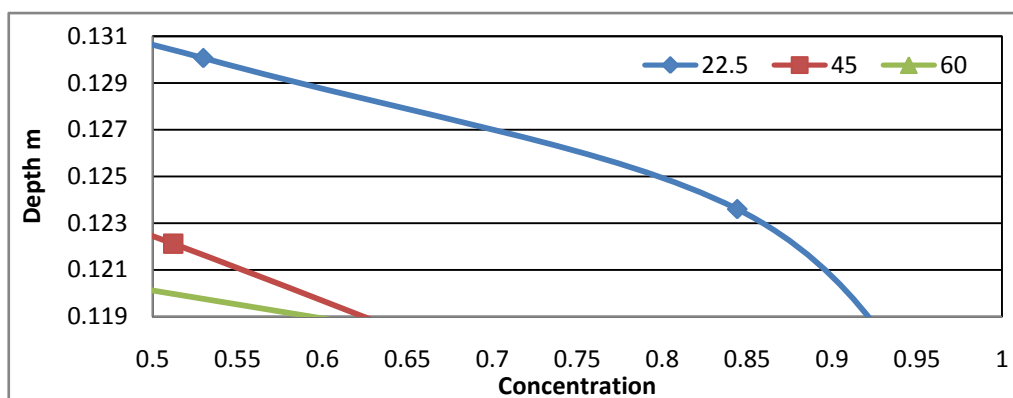


شکل ۴-۵: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $x=6.5\text{cm}$

در انتهای کانال و در مقطع به فاصله $19/85$ سانتیمتر، ارتفاع کف تا سقف کانال برابر با $14/9$ سانتیمتر می باشد (شکل ۵-۵ و ۶-۵).. همانگونه که در شکل ۵-۶ ملاحظه می شود، در لبه دریچه با زاویه $22/5$ درجه ارتفاع مترادف با غلظت 50% برابر $13/06$ و ارتفاع معادل با غلظت 100% آب برابر با $9/63$ سانتیمتر می باشد. این مقادیر برای لبه دریچه با زاویه 45 درجه برابر $12/24$ و $8/31$ سانتیمتر و برای لبه دریچه با زاویه 60 درجه برابر 12 و $10/52$ سانتیمتر می باشد.



شکل ۵-۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $x=19.85\text{cm}$



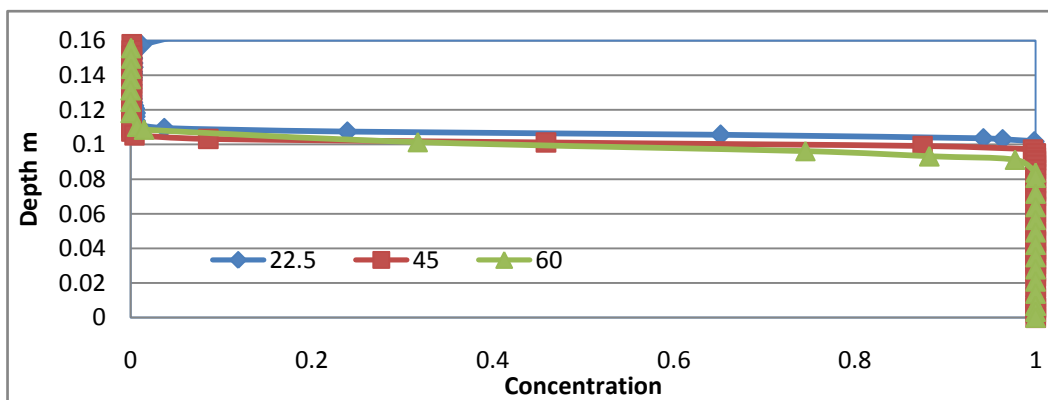
شکل ۵-۶: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۹۰٪ و فاصله $x=19.85\text{cm}$

چنانچه در نمودار شکل های ۵-۱ الی ۵-۶ ملاحظه می شود، با افزایش زاویه لبه دریچه در غلظت ۵۰٪ ارتفاع معادل آن غلظت کاهش می یابد. این تفاوت بین دو لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ و ۴۵ درجه بیشتر قابل مشاهده است، بطوریکه در مقطع ۲/۵cm اختلاف تراز برابر با ۰/۴cm، در مقطع ۶/۵cm برابر ۰/۵۵cm و در مقطع ۱۹/۸۵cm واقع در انتهای کانال این اختلاف به ۰/۸cm می رسد. این اختلاف ارتفاع در غلظت ۵۰٪ آب برای دو لبه دریچه با زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه مقادیر کمتری را نشان می دهد، چنانچه این مقادیر در فاصله های ۲/۵ cm و ۶/۵ cm و ۱۹/۸۵ cm از زیر لبه دریچه به ترتیب برابر با ۰/۲ cm و ۰/۱۵ cm و ۰/۲۵ cm می باشد. لازم به ذکر است که دبی خروجی مجرا در هر سه حالت برابر ۷۶lit/sec در این بازشدگی می باشد. البته متذکر می گردد که ارتفاع هد آب

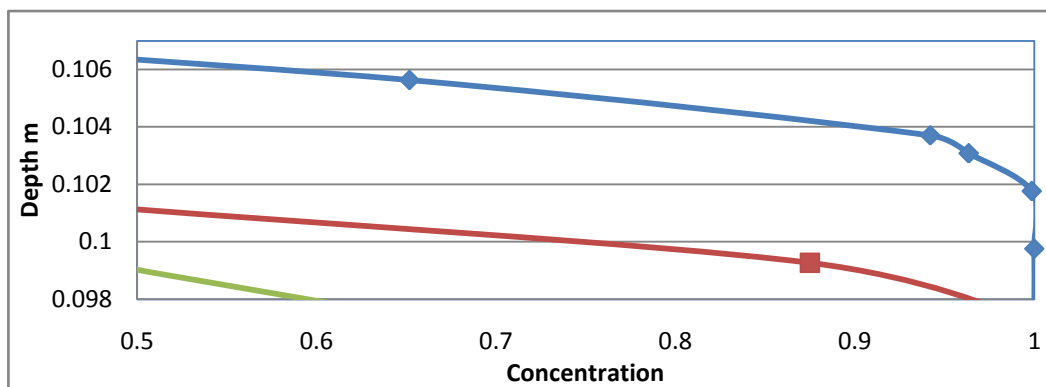
برای زاویه های ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب برابر با ۲/۳۸ و ۲/۵۶ متر برای تامین این دبی یکسان می باشد. برای زاویه ۲۲/۵ درجه این هد جهت تامین دبی ۷۶lit/sec معادل ۲ متر می باشد.

در مدل آزمایشگاهی با باز شدگی ۹۰٪ دبی برابر ۷۸/۱۷ lit/sec می باشد و با توجه به عرض کانال دریچه که برابر با ۱۱ سانتیمتر می باشد دبی واحد عرض برابر با ۷۱ lit/sec می گردد، از آنجا که نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی دارای درصدی اختلاف می باشد، برای تامین هد ۲ متر در مدل آزمایشگاهی، مقدار دبی ۷۶ lit/sec با سعی و خطا به دست آمد. برای زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه لبه دریچه نیز از همین مقدار دبی استفاده شد، ولی ملاحظه گردید که ارتفاع هد آب بالا می باشد.

در باز شدگی ۷۰٪ دریچه فاصله کف کانال تا زیر لبه دریچه برابر ۱۱/۴۵cm می باشد. در این بخش نیز غلظت هوای ۵۰٪ در فواصل ۲/۵cm و ۶/۵cm و ۱۹/۸۵cm بعد از دریچه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج برای زوایای مختلف در شکل ۵-۷ و بزرگنمایی شده آن در شکل ۵-۸ ارائه شده است. در فاصله ۲/۵cm از لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ درجه ارتفاع آب با غلظت هوای ۵۰٪ برابر ۱۰/۶۳cm و در غلظت آب ۱۰۰٪ برابر ۹/۹۸ سانتیمتر می باشد. این مقادیر برای لبه دریچه با زاویه ۴۵ درجه به ترتیب برابر ۱۰/۱۱cm و ۹/۵۰ سانتیمتر و برای لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه برابر ۹/۹۲cm و ۸/۳۹ سانتیمتر می باشد. اختلاف ارتفاع در غلظت ۵۰٪ هوا در دو حالت اول یعنی زوایای ۲۲/۵ و ۴۵ درجه برابر ۰/۵۲cm و برای زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه برابر ۰/۱۹cm می باشد.

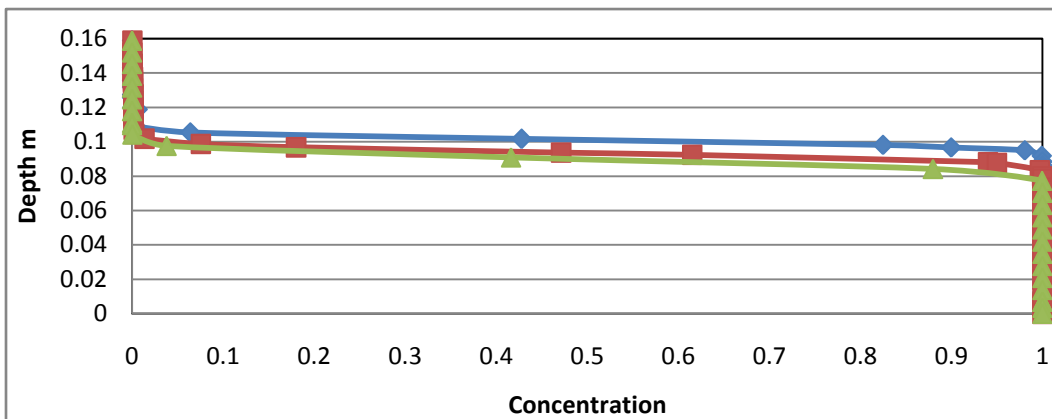


شکل ۵-۷: نمودار تغییرات غلظت در عمق در باز شدگی ۷۰٪ و فاصله x=2.5cm

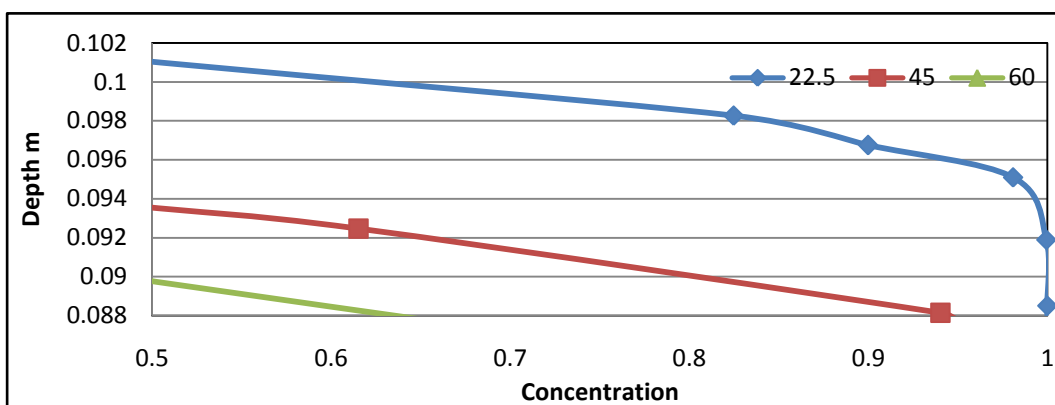


شکل ۵-۸: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $x=2.5\text{cm}$

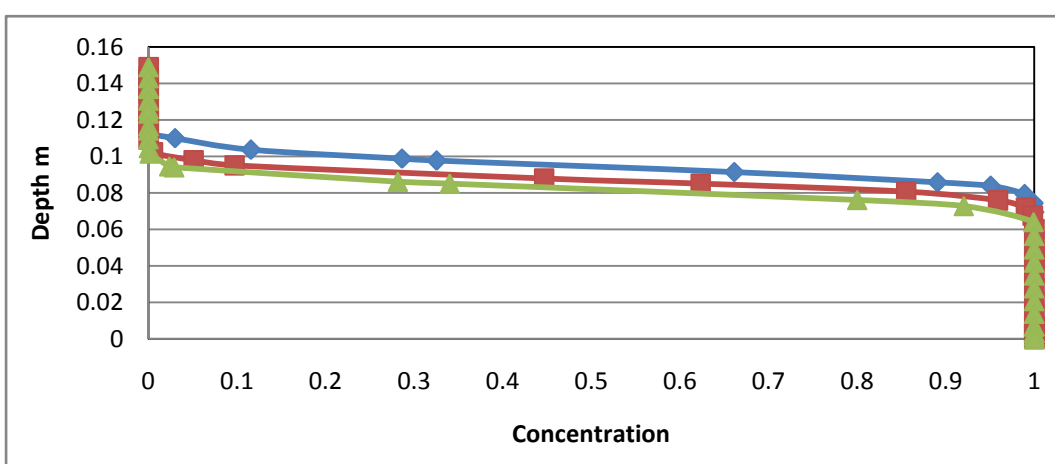
مطابق شکل ۵-۹ و ۵-۱۰ در مقطع به فاصله $6/5\text{cm}$ از دریچه با زاویه $22/5$ درجه ارتفاع آب در غلظت هوای ۵۰٪ برابر با $10/11\text{cm}$ و در غلظت آب ۱۰۰٪ برابر با $8/49\text{cm}$ می باشد، برای لبه دریچه با زاویه ۴۵ درجه به ترتیب برابر با $9/36\text{cm}$ و $7/84\text{cm}$ و برای لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه برابر $8/98\text{cm}$ و $7/04\text{cm}$ می باشد. اختلاف ارتفاع آب در غلظت هوای ۵۰٪ در حالت زوایای $22/5$ و ۴۵ درجه برابر $0/75\text{cm}$ و زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه برابر $0/38\text{cm}$ می باشد. مطابق شکل ۵-۱۱ و ۵-۱۲ در مقطع به فاصله $19/85$ سانتیمتری، در لبه دریچه با زاویه $22/5$ درجه ارتفاع آب در غلظت هوای ۵۰٪ برابر $9/45\text{cm}$ و در غلظت آب ۱۰۰٪ برابر $5/25\text{cm}$ می باشد، برای لبه دریچه با زاویه ۴۵ درجه این مقادیر به ترتیب برابر با $8/71\text{cm}$ و $6/02\text{cm}$ می باشد و برای لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه برابر $8/2\text{cm}$ و $5/65\text{cm}$ می باشد. اختلاف ارتفاع آب در غلظت هوا ۵۰٪ در دو حالت زوایای $22/5$ و ۴۵ درجه برابر $0/74\text{cm}$ و برای زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه برابر $0/51\text{cm}$ می باشد.



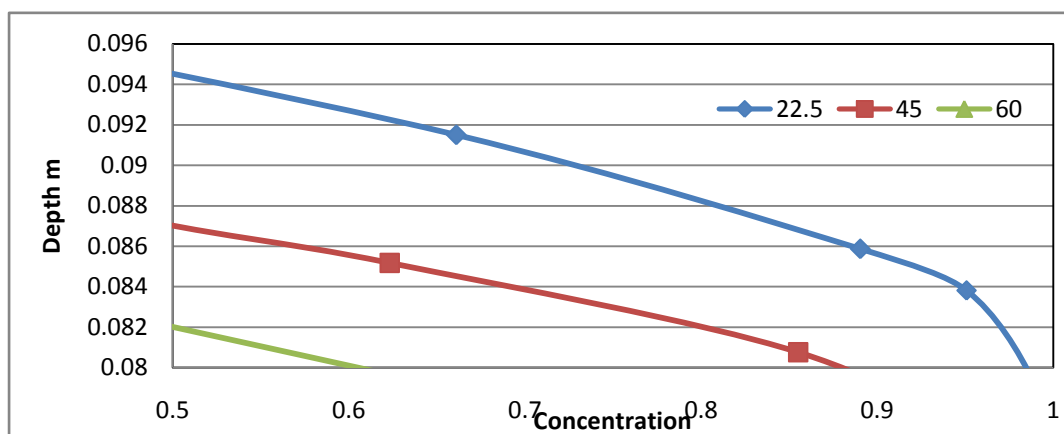
شکل ۵-۹: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $x=6.5\text{cm}$



شکل ۵-۱۰: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $x=6.5\text{cm}$

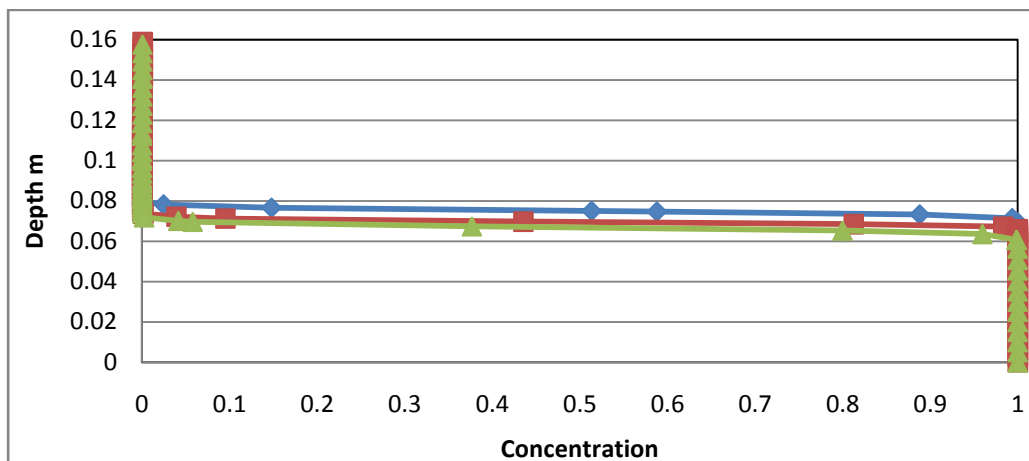


شکل ۵-۱۱: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $x=19.85\text{cm}$

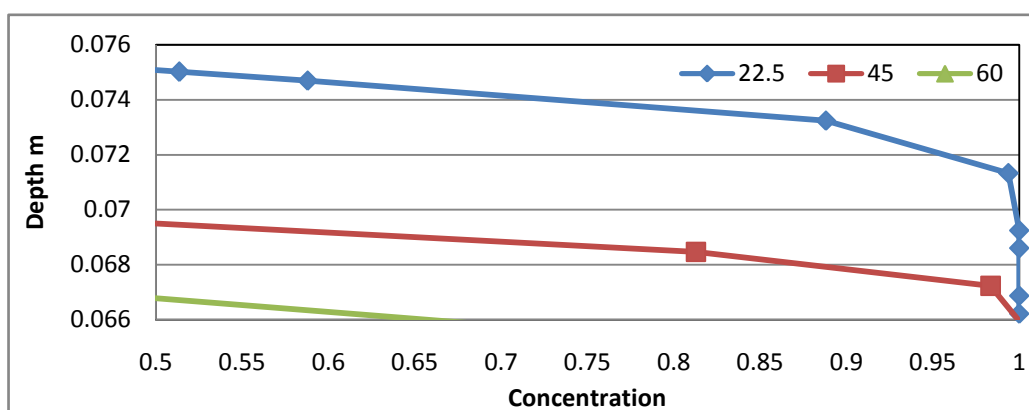


شکل ۵-۱۲: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۷۰٪ و فاصله $x=19.85\text{cm}$

چنانچه در نمودارهای شکل ۵-۷ الی ۵-۱۲ ملاحظه می شود، با افزایش زاویه لبه دریچه در غلظت هوای ۵۰٪ ارتفاع آب کاهش می یابد. لازم به ذکر است که در هر سه حالت لبه دریچه، دبی خروجی برابر بوده و برای بازشدگی ۷۰٪ معادل 5lit/sec می باشد. ضمناً هد آب ۲ متر برای لبه دریچه ۲۲/۵ درجه و برای زاویه های ۴۵ و ۶۰ درجه هد آب به ترتیب برابر $2/58\text{m}$ و $2/61\text{m}$ می باشد. در بازشدگی ۵۰٪ مطابق شکل ۵-۱۳ و ۵-۱۴ فاصله کف کانال تا لبه دریچه برابر $8/175\text{cm}$ می باشد. در فاصله $2/5\text{cm}$ از دریچه با زاویه لبه ۲۲/۵ درجه ارتفاع آب در غلظت ۵۰٪ برابر $7/51\text{cm}$ و در غلظت آب ۱۰۰٪ برابر با $6/92\text{cm}$ است، برای لبه دریچه با زاویه ۴۵ درجه این مقادیر برابر با $6/95\text{cm}$ و $6/60\text{cm}$ و برای لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه برابر با $6/68\text{cm}$ و $5/63\text{cm}$ می باشد. اختلاف ارتفاع در غلظت هوای ۵۰٪ برای زوایای ۲۲/۵ و ۴۵ درجه برابر $0/56\text{cm}$ و برای زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه برابر $0/27\text{cm}$ می باشد.



شکل ۵-۱۳: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $x=2.5\text{cm}$

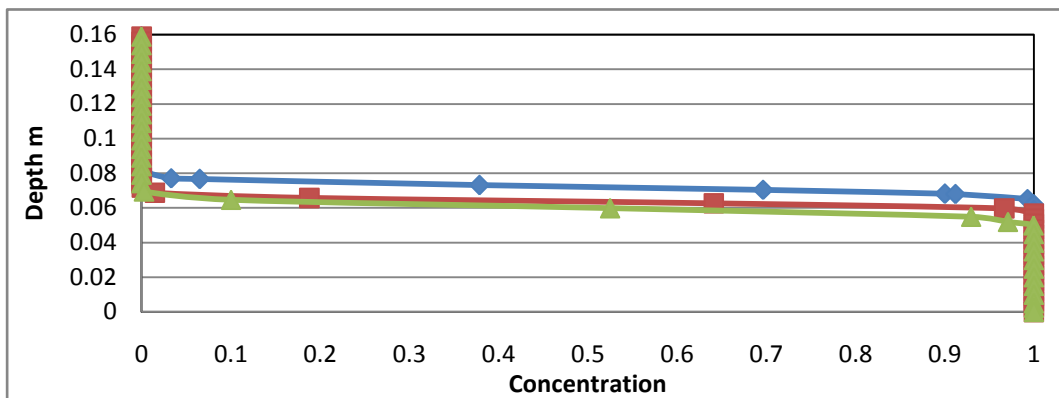


شکل ۵-۱۴: نمودار بزرگنمایی شده تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $x=2.5\text{cm}$

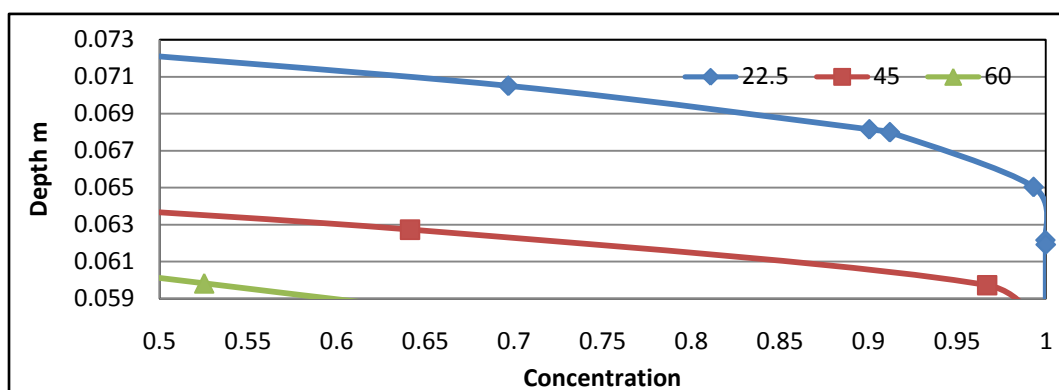
در مقطع به فاصله $6/5\text{cm}$ مطابق شکل ۵-۱۵ و ۵-۱۶ در لبه دریچه با زاویه $22/5$ درجه ارتفاع آب در غلظت ۵۰٪ هوا برابر $7/21\text{cm}$ و در غلظت آب ۱۰۰٪ برابر $6/19\text{cm}$ می باشد، برای لبه دریچه با زاویه ۴۵ درجه این مقادیر به ترتیب برابر $6/37\text{cm}$ و $5/67\text{cm}$ و برای لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه برابر با $6/01\text{cm}$ و $4/5\text{cm}$ می باشد. اختلاف ارتفاع آب در غلظت هوا ۵۰٪ برای زوایای $22/5$ و ۴۵ درجه برابر $0/84\text{cm}$ و برای زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه برابر $0/36\text{cm}$ می باشد. در مقطع به فاصله $19/85\text{cm}$ مطابق شکل ۵-۱۷ و ۵-۱۸ در لبه دریچه با زاویه $22/5$ درجه ارتفاع آب در غلظت ۵۰٪ هوا برابر $6/7\text{cm}$ و در غلظت آب ۱۰۰٪ برابر $4/41\text{cm}$ می باشد، برای لبه دریچه با زاویه ۴۵ درجه این مقادیر برابر $6/05\text{cm}$ و $5/36\text{cm}$ و برای لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه برابر $5/72\text{cm}$ و $4/47\text{cm}$ می

باشد. اختلاف ارتفاع آب در غلظت ۰.۵٪ برای زوایای ۲۲/۵ و ۴۵ درجه برابر ۰/۶۵cm و برای زوایای

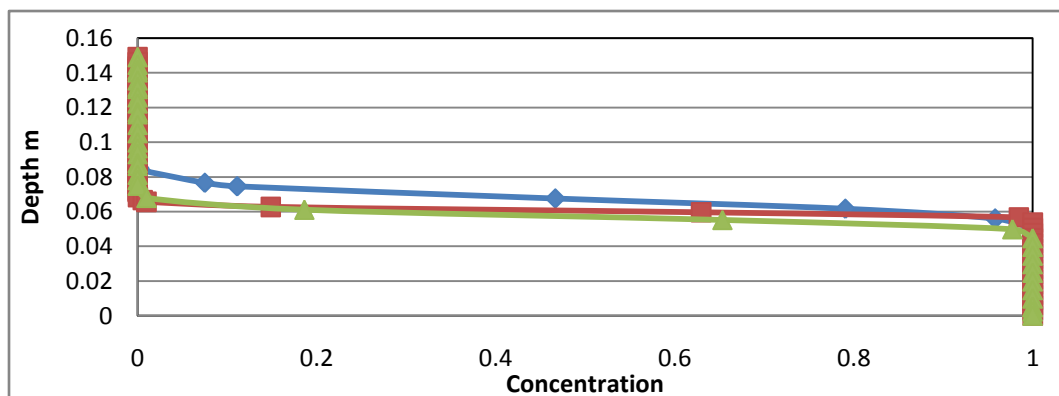
۴۵ و ۶۰ درجه برابر ۰/۳۳cm می باشد.



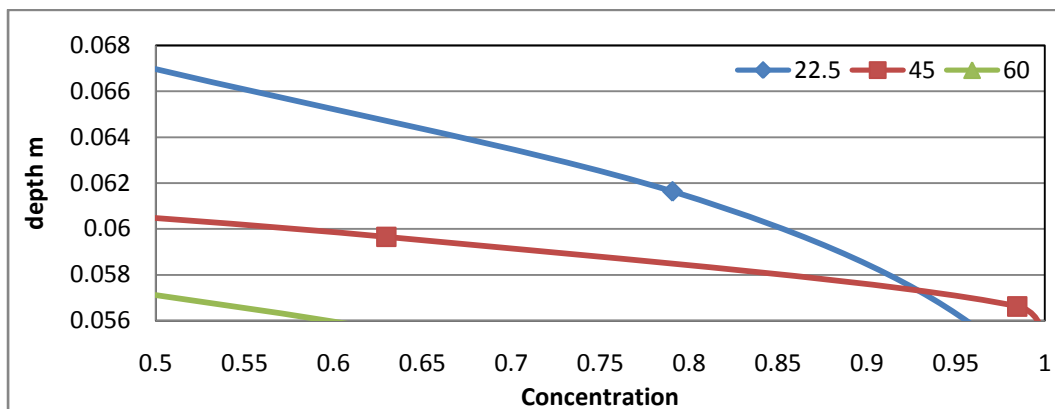
شکل ۵-۱۵: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۰.۵٪ و فاصله x=6.5cm



شکل ۵-۱۶: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۰.۵٪ و فاصله x=6.5cm



شکل ۵-۱۷: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۰.۵٪ و فاصله x=19.85cm



شکل ۵-۱۸: نمودار تغییرات غلظت در عمق در بازشدگی ۵۰٪ و فاصله $x=19.85\text{cm}$

لازم به ذکر است که در هر سه لبه دریچه، دبی خروجی در این بازشدگی معادل 38lit/sec می باشد. هد آب ۲ متر برای زاویه $22/5$ درجه در زاویه های ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب برابر $2/46\text{m}$ و $2/73\text{m}$ می باشد. بر اساس مطالب ارائه شده در سه بازشدگی و سه فاصله از دریچه، می توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه لبه دریچه ارتفاع آب معرف غلظت هوای ۵۰ درصد (معرف سطح آزاد آب) کاهش یافته و ارتفاع معادل غلظت آب ۱۰۰ درصد (معرف میزان نفوذ هوا در آب) نیز کاهش یافته است. تغییرات ضخامت تیغه آب و هوا از مقدار ۵۰٪ غلظت هوا تا ۱۰۰٪ غلظت آب (صفر درصد غلظت هوا) در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۵-۱: تغییرات نفوذ هوا در داخل آب در بازشدگی و زاویه لبه دریچه مختلف

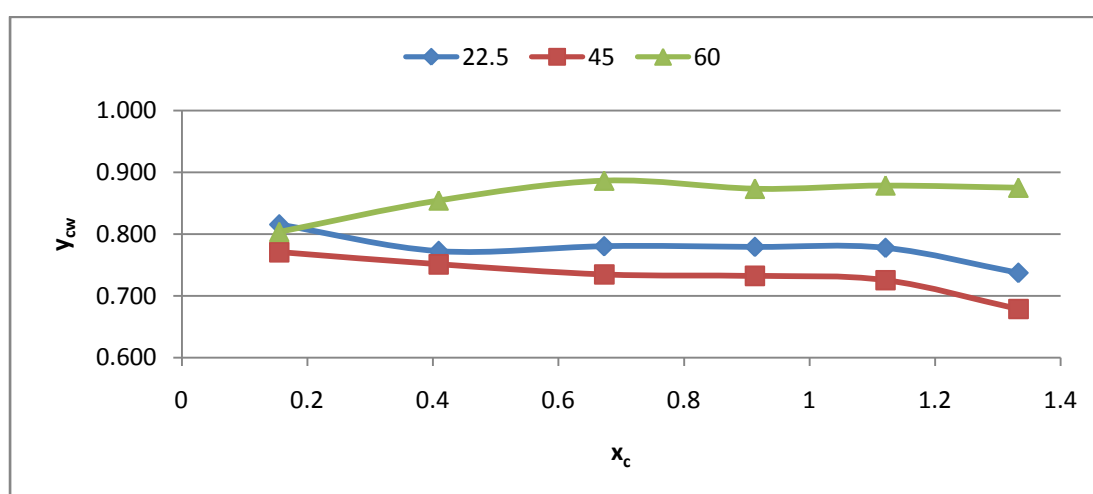
بازشدگی			۹۰ درصد			۷۰ درصد			۵۰ درصد			
زاویه لبه دریچه	$22/5^\circ$	45°	60°	$22/5^\circ$	45°	60°	$22/5^\circ$	45°	60°	ارتفاع آب معادل غلظت هوا ۵۰٪	ارتفاع آب معادل غلظت آب ۱۰۰٪	اختلاف
زاویه لبه دریچه	$22/5^\circ$	45°	60°	$22/5^\circ$	45°	60°	$22/5^\circ$	45°	60°	۱۳/۶	۱۰/۵	۳/۱
ارتفاع آب معادل غلظت هوا ۵۰٪	۱۳/۶	۱۳/۰۵	۱۲/۹	۱۰/۱۱	۹/۳۶	۸/۹۸	۷/۲۱	۶/۳۷	۶/۰۱	۱۱/۰۲	۹/۸	۱/۸۸
ارتفاع آب معادل غلظت آب ۱۰۰٪	۱۰/۵	۹/۸	۱۱/۰۲	۸/۴۹	۷/۸۴	۷/۰۴	۶/۹	۵/۶۷	۴/۵	۳/۲۵	۳/۱	۱/۸۸
اختلاف	۳/۱	۳/۲۵	۱/۸۸	۱/۶۲	۱/۵۲	۱/۹۴	۰/۳۱	۰/۷۰	۱/۵۱			

مقدار اختلاف ارائه شده در جدول فوق معرف ضخامت از سیال است که با هوا درگیر می گردد و عبارتی هوا در داخل آن نفوذ نموده که از نقطه نظر کاویتاسیون حائز اهمیت است. از نقطه نظر هیدرولیکی بازشدگی های زیر ۵۰٪ قابل تامل نمی باشد زیرا تجربه نشان داده که ضریب هوادهی افزایش یافته و هوا به میزان زیاد جت با ضخامت کم می گردد. در بازشدگی های بالاتر افت فشار قابل توجه بوده و ضخامت تیغه آب افزایش یافته و نفوذ هوا به داخل جریان جهت کنترل کاویتاسیون حائز اهمیت می گردد. مطابق جدول ملاحظه می گردد که زاویه ۶۰ درجه در بازشدگی های نزدیک ۵۰٪ و زاویه ۴۵ درجه در بازشدگی های نزدیک ۹۰٪ که اهمیت بیشتری دارد منجر به افزایش میزان نفوذ هوا به داخل آب گردیده است. بنابراین در جمع زاویه ۴۵ درجه از نقطه نظر هیدرولیکی توصیه مناسب تشخیص داده می شود. در ادامه به بررسی نسبت عمق آب و عمق هوا به عمق کل کانال و میزان تغییرات این دو عمق با افزایش زاویه لبه دریچه پرداخته شده است.

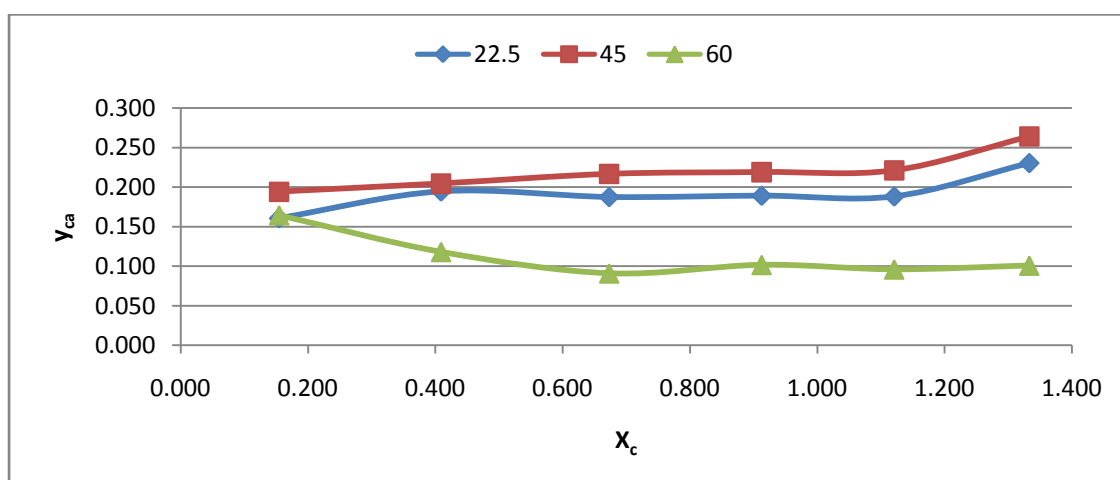
پروفیل سطح آب در جایی در نظر گرفته شده است که مقدار غلظت هوا برابر با ۵۰٪ می باشد و برای اندازه گیری غلظت هوا از ارتفاعی که غلظت هوا در جریان از ۰٪ به ۵۰٪ می رسد استفاده گردیده است. جهت این بررسی، پارامتر y_{cw} برابر عمق نسبی آب معرفی می شود که از تقسیم عمق آب در هر مقطع به کل عمق آن مقطع حاصل می شود. پارامتر y_{ca} برابر عمق نسبی هوا است که از تقسیم عمق هوای مخلوط در آب هر مقطع به کل عمق آن مقطع کانال بدست می آید. برای رسم نمودار طولی کانال از طول نسبی x_c برای معرفی فواصل از لبه دریچه استفاده شده که با تقسیم فاصله آن مقطع از لبه دریچه بر ارتفاع کل مقطع حاصل می شود. در ابتدا بررسی نتایج بازشدگی ۹۰٪ مطابق جدول ۲-۵ ارائه شده است. در این جدول ها مقاطع در فواصل معین معرفی شده از لبه دریچه به همراه ارتفاع کانال در آن مقطع مشخص شده است. در ستون سوم نسبت این دو و در ستون های بعد مقدار y_{cw} برای هر لبه دریچه معادل عمق نسبی آب به ازای غلظت ۵۰٪ آب ارائه شده است. پارامتر y_{ca} نیز که معرف عمق نسبی هوای مخلوط در آب به عمق کل کانال است در ستون های انتهائی آورده شده است.

جدول ۵-۲: تغییرات عمق نسبی آب و هوا در طول مجرا در باز شدگی ۹۰٪

X (cm)	y_w (cm)	$x_c = x/y_w$	Y_{cw}			Y_{ca}		
			22.5	45	60	22.5	45	60
2.5	16.17	0.155	0.815	0.771	0.804	0.185	0.229	0.196
6.5	15.89	0.409	0.772	0.751	0.855	0.228	0.249	0.145
10.5	15.6	0.673	0.780	0.735	0.887	0.220	0.265	0.113
14	15.34	0.913	0.779	0.732	0.873	0.221	0.268	0.127
17.25	15.39	1.121	0.778	0.726	0.879	0.222	0.274	0.121
19.85	14.89	1.333	0.737	0.679	0.875	0.263	0.321	0.125
		average	0.777	0.732	0.862	0.223	0.268	0.138



شکل ۵-۱۹: نمودار تغییرات عمق نسبی آب در طول مجرا در باز شدگی ۹۰٪

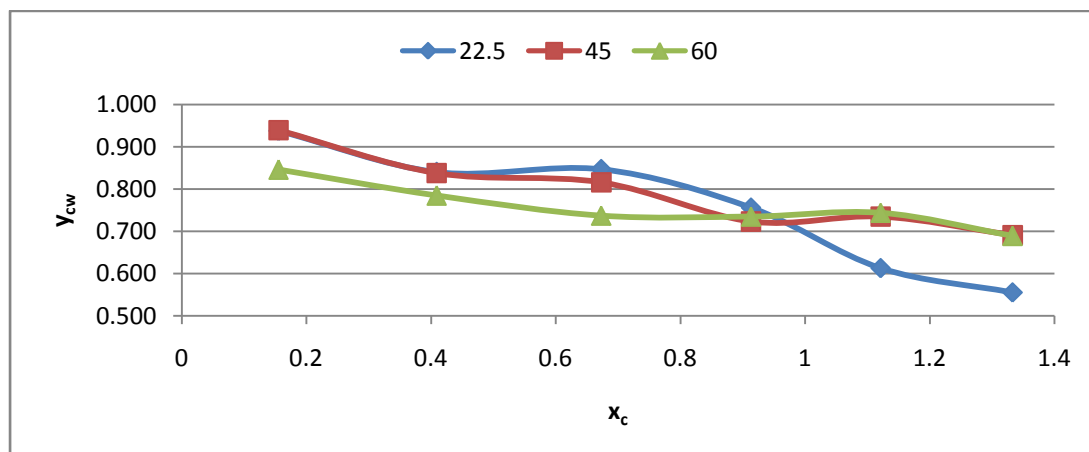


شکل ۵-۲۰: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در باز شدگی ۹۰٪

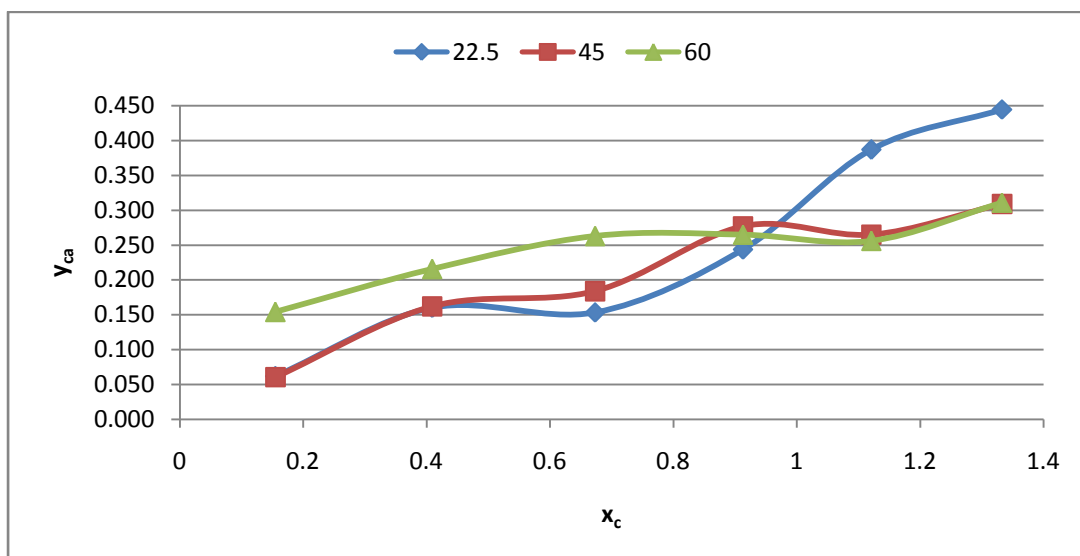
همانگونه که در جدول ۲-۵ و نمودار شکل ۵-۱۹ و ۵-۲۰ مشاهده می شود در بازشدگی ۹۰٪ غلظت نسبی هوا در جریان در لبه دریچه ۲۲/۵ و ۴۵ درجه در طول کانال با شیب ملایمی افزایش یافته و در لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه با شیب ملایمی کاهش یافته است. همچنین با افزایش زاویه لبه دریچه از ۲۲/۵ درجه به ۴۵ درجه غلظت نسبی هوا با افزایش همراه است در صورتیکه با افزایش زاویه لبه دریچه از ۴۵ به ۶۰ درجه از غلظت هوا کاسته شده است. جدول ۳-۵ و نمودار شکل های ۵-۲۱ و ۵-۲۲ نتایج مدل در بازشدگی ۷۰٪ را نشان می دهد.

جدول ۳-۵: تغییرات عمق نسبی آب و هوا در طول مجرا در باز شدگی ۷۰٪

X (cm)	y_w (cm)	$x_c = x/y_w$	Y_{cw}			Y_{ca}		
			22.5	45	60	22.5	45	60
2.5	16.17	0.155	0.938	0.940	0.846	0.062	0.060	0.154
6.5	15.89	0.409	0.840	0.838	0.784	0.160	0.162	0.216
10.5	15.6	0.673	0.847	0.816	0.737	0.153	0.184	0.263
14	15.34	0.913	0.756	0.723	0.735	0.244	0.277	0.265
17.25	15.39	1.121	0.613	0.735	0.744	0.387	0.265	0.256
19.85	14.89	1.333	0.555	0.691	0.689	0.445	0.309	0.311
		average	0.758	0.790	0.756	0.242	0.210	0.244



شکل ۲۱-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی آب در طول مجرا در بازشدگی ۷۰٪

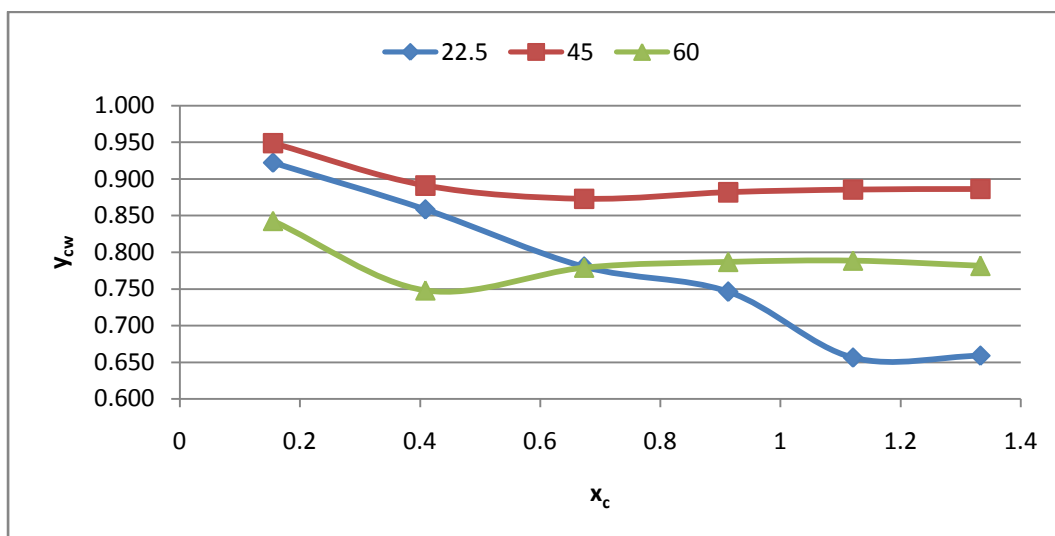


شکل ۵-۲۲: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۷۰٪

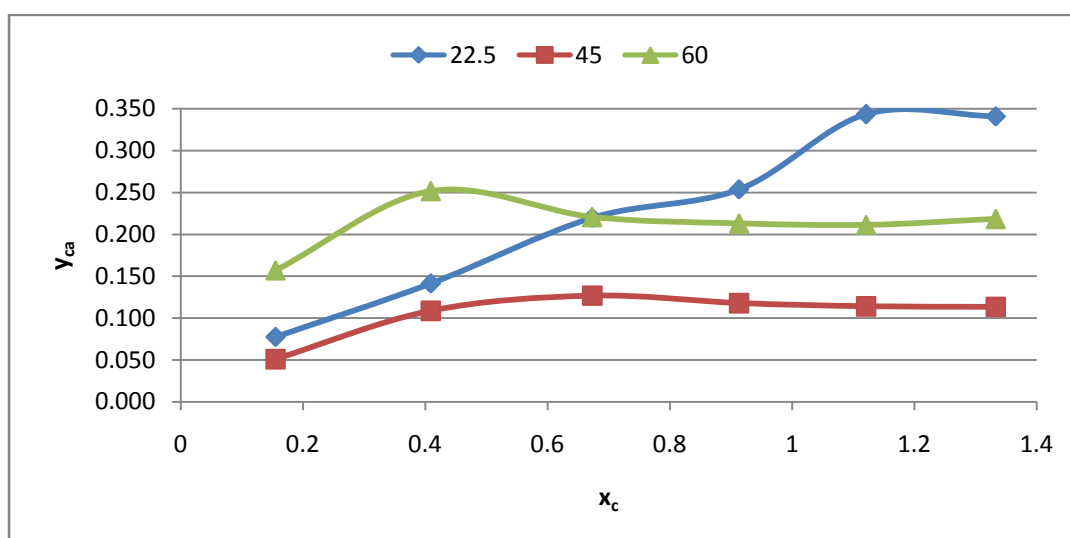
همانگونه که در جدول ۵-۳ و نمودار شکل ۵-۲۱ و ۵-۲۲ ملاحظه می شود، در باز شدگی ۷۰٪ غلظت نسبی هوا در جریان در لبه دریچه ۲۲/۵ و ۴۵ و ۶۰ درجه در طول کانال با افزایش همراه است. تا طول نسبی ۱ در کانال پس از دریچه، با افزایش زاویه لبه دریچه از ۲۲/۵ به ۶۰ درجه غلظت نسبی هوا با افزایش همراه است در صورتی که بعد از طول نسبی ۱ در کانال از غلظت هوا کاسته شده است. جدول ۵-۴ و نمودار شکل ۵-۲۳ و ۵-۲۴ نتایج مدل در بازشدگی ۵۰٪ را نشان می دهد.

جدول ۵-۴: تغییرات عمق نسبی آب و هوا در طول مجرا در باز شدگی ۵۰٪

X	y_w	$x_c=x/y_w$	Y_{cw}			Y_{ca}		
			22.5	45	60	22.5	45	60
2.5	16.17	0.155	0.922	0.949	0.843	0.078	0.051	0.157
6.5	15.89	0.409	0.859	0.891	0.748	0.141	0.109	0.252
10.5	15.6	0.673	0.780	0.873	0.779	0.220	0.127	0.221
14	15.34	0.913	0.746	0.882	0.787	0.254	0.118	0.213
17.25	15.39	1.121	0.657	0.886	0.789	0.343	0.114	0.211
19.85	14.89	1.333	0.659	0.886	0.782	0.341	0.114	0.218
		average	0.770	0.895	0.788	0.230	0.105	0.212



شکل ۲۳-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی آب در طول مجرا در بازشدگی ۵۰٪

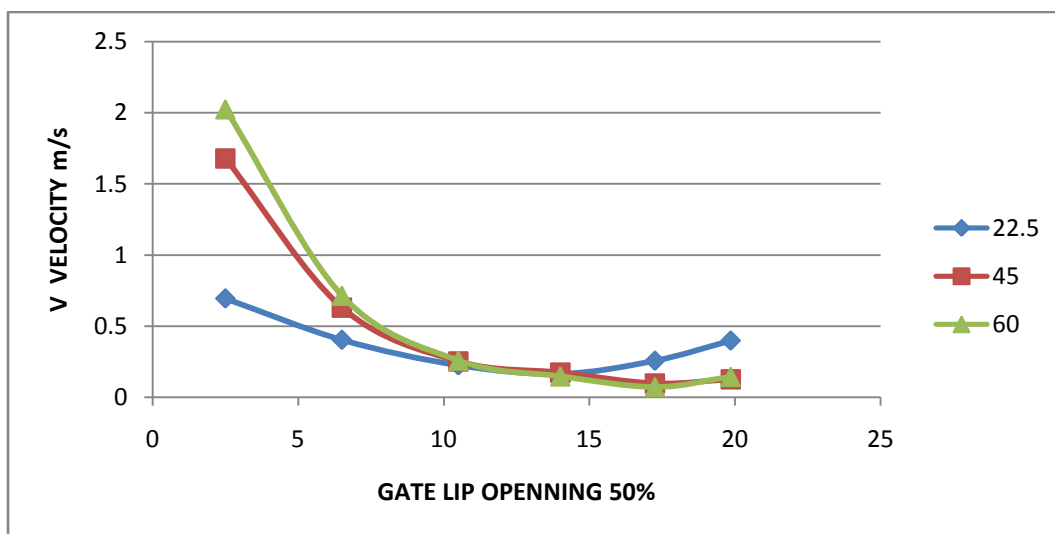


شکل ۲۴-۵: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۵۰٪

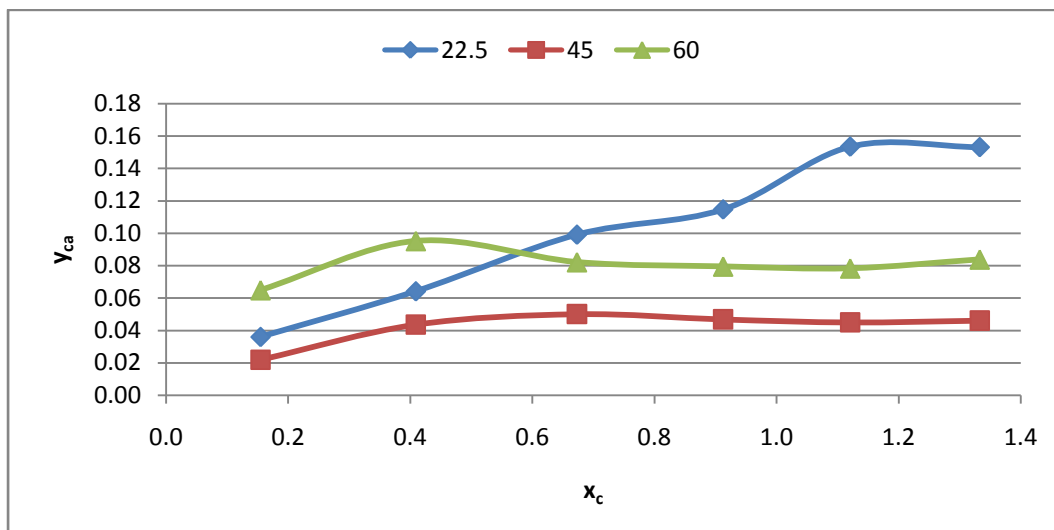
همانگونه که در جدول ۳-۵ و نمودار شکل های ۲۳-۵ و ۲۴-۵ ملاحظه می شود، در باز شدگی ۵۰٪ تا طول نسبی ۰/۶ از لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ تا ۴۵ درجه غلظت هوا در جریان کاهش یافته است و از زاویه ۴۵ تا ۶۰ درجه غلظت هوا افزایش پیدا کرده است و در لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه از لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ درجه غلظت هوا بیشتر می باشد. در صورتیکه بعد از طول نسبی ۰/۶ در طول کانال غلظت هوا در لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه از لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ درجه کمتر می باشد.

در ادامه سرعت قائم جریان پس از لبه دریچه با مقدار غلظت هوا در جریان مورد مطالعه قرار گرفته است. و نمودار این دو پارامتر با یکدیگر مقایسه شده است. آنچه که باعث ورود هوا به درون جریان آب می شود نوسانات قائم سرعت جریان آب است که افزایش آن باعث افزایش غلظت هوا در جریان می گردد.

با توجه به شکل ۵-۲۵ در بازشدگی ۵۰٪ ملاحظه می گردد که در نیمه اول تونل پس از لبه دریچه افزایش زاویه لبه دریچه باعث افزایش سرعت قائم جریان آب گردیده است و همین روند در شکل ۵-۲۶ که بیانگر غلظت است مشاهده می شود. ولی در نیمه دوم ملاحظه می گردد که سرعت قائم در زاویه لبه دریچه ۲۲/۵ بیشتر است به همانصورت غلظت هوا در جریان بیشتر می باشد. ستون افقی نمودار شکل ۵-۲۵ و ۵-۲۷ فاصله افقی سطح جریان از زیر لبه دریچه بر حسب سانتیمتر می باشد و ستون قائم نمودار بیانگر سرعت ماکزیمم عمودی جریان در سطح پروفیل آب می باشد.

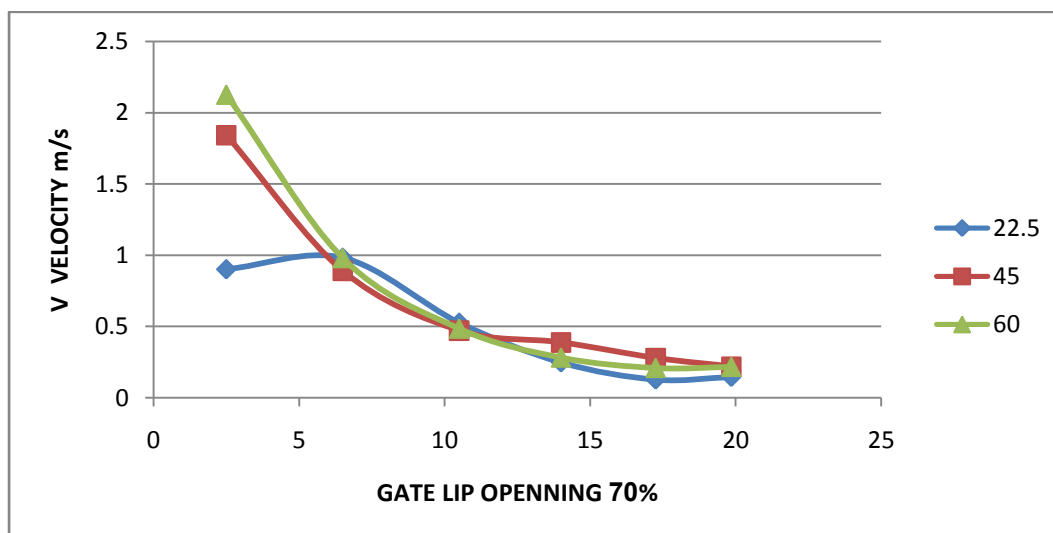


شکل ۵-۲۵: نمودار سرعت عمودی جریان آب در بازشدگی ۵۰٪

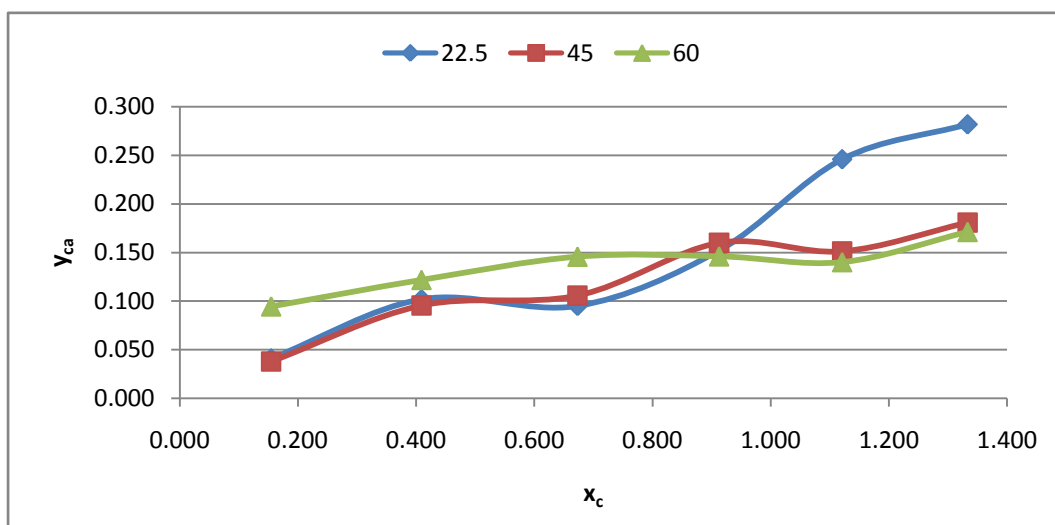


شکل ۵-۲۶: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۵۰٪

با توجه به شکل ۵-۲۷ در بازشدگی ۷۰٪ با افزایش زاویه لبه دریچه مقدار سرعت قائم افزایش یافته است و به همانصورت با توجه به شکل ۵-۲۸ مقدار غلظت جریان نیز افزایش داشته است.

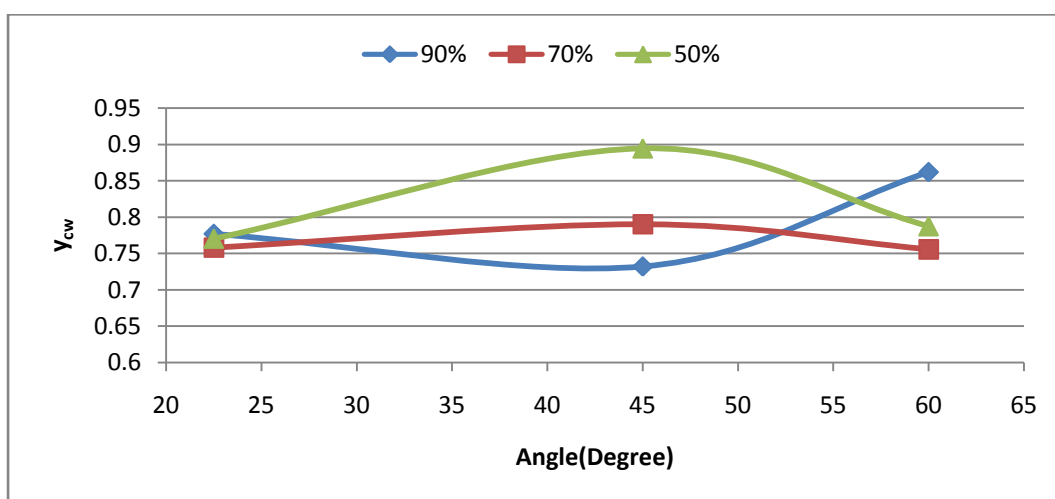


شکل ۵-۲۷: نمودار سرعت عمودی جریان آب در بازشدگی ۷۰٪



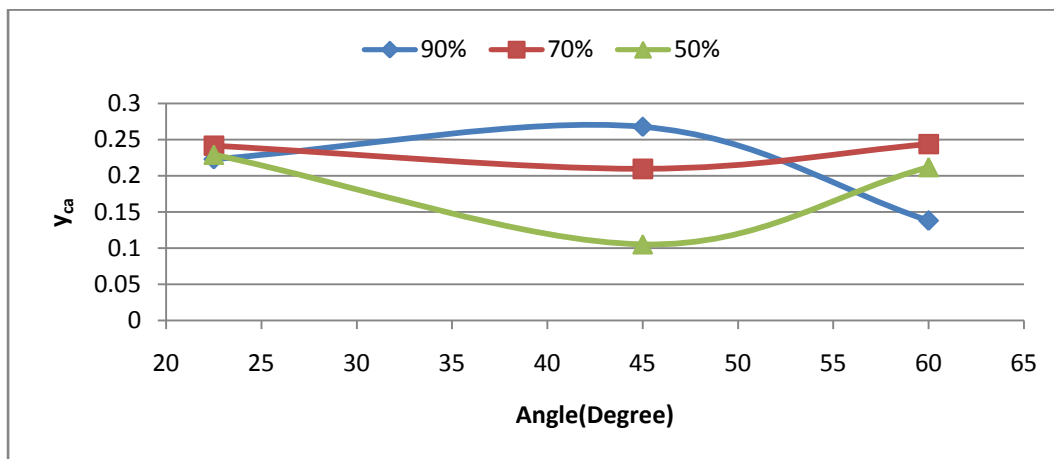
شکل ۵-۲۸: نمودار تغییرات عمق نسبی هوا در طول مجرا در بازشدگی ۷۰٪

شکل های ۵-۲۹ و ۵-۳۰ بر اساس میانگین مقادیر y_{cw} و y_{ca} در سه نقطه در طول کانال محاسبه شده است. بنابراین هر نقطه روی این شکل ها معرف میانگین شش نقطه در طول کانال می باشد. با توجه به نمودار شکل ۵-۲۹ تغییرات برای عمق نسبی معادل آب مشاهده می شود و اثر تغییر زاویه در بازشدگی های مختلف درجه بخوبی نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۹: تغییرات عمق معادل آب با زاویه لبه درجه در بازشدگی های مختلف

در نمودار شکل ۵-۳۰ تغییرات عمق معادل هوا در طول کانال برای زاویه و بازشدگی مختلف ملاحظه می شود. چنانچه مشاهده می شود با افزایش باز شدگی مقدار غلظت هوا افزایش پیدا کرده است. در بازشدگی ۵۰٪ و ۷۰٪ با افزایش زاویه لبه دریچه از ۲۲/۵ تا ۴۵ درجه غلظت جریان کاسته شده ولی با افزایش زاویه لبه دریچه از ۴۵ به ۶۰ درجه غلظت هوا افزوده شده است در باز شدگی ۹۰٪ این روند متفاوت بوده و ابتدا با افزایش زاویه لبه دریچه از ۲۲/۵ به ۴۵ درجه غلظت هوا افزوده می شود و از لبه دریچه ۴۵ تا ۶۰ درجه مقدار غلظت هوا کاسته شده است.



شکل ۵-۳۰: تغییرات عمق معادل هوا با زاویه لبه دریچه در بازشدگی های مختلف

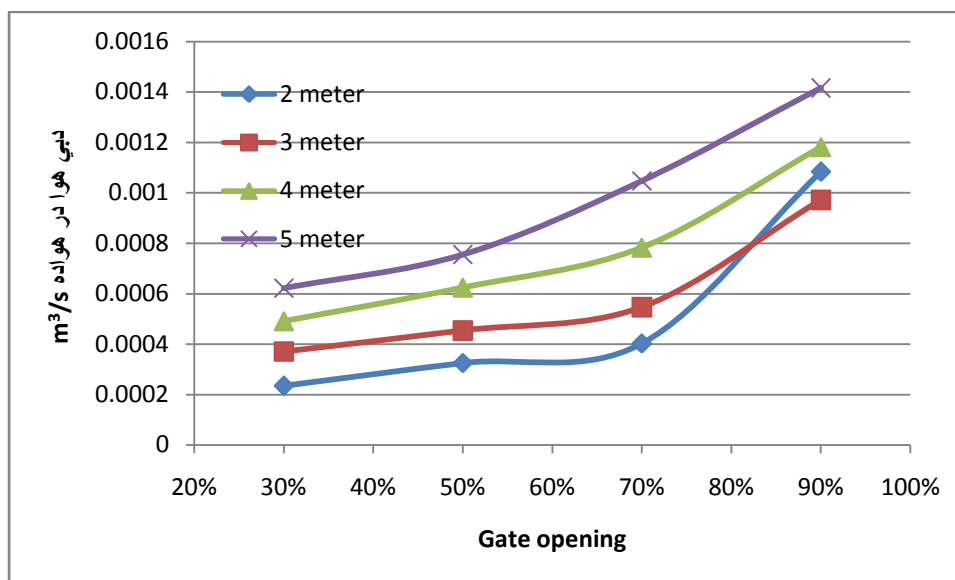
۵-۴ - ارائه نتایج سرعت هوا در هواده

در مدل فیزیکی سرعت هوا در تمام آزمایش ها با بازشدگی و هدهای مختلف اندازه گیری شد. هواده مدل آزمایشگاهی یک لوله دایره ای به قطر ۲ سانتیمتر بوده است. لذا در مدل عددی ورودی هوا به عرض ۲ سانتیمتر مدل شده است. نتایج مدل آزمایشگاهی در جدول ۵-۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۵: تغییرات سرعت و دبی هوا در هواده های تخلیه کننده تحتانی در هد و بازشدگی های مختلف

water head m	Gate Opening	speed of air (m/s)			Qa(m ³ /s)
		Left aerator	Right aerator	average	
2	90%	3.32	3.58	3.45	0.00108
2	70%	1.26	1.3	1.28	0.0004
2	50%	0.97	1.1	1.035	0.00032
2	30%	0.77	0.72	0.745	0.00023
3	90%	3.1	3.09	3.095	0.00097
3	70%	1.74	1.74	1.74	0.00055
3	50%	1.52	1.37	1.445	0.00045
3	30%	1.25	1.11	1.18	0.00037
4	90%	3.63	3.9	3.765	0.00118
4	70%	2.39	2.6	2.495	0.00078
4	50%	1.88	2.1	1.99	0.00062
4	30%	1.63	1.5	1.565	0.00049
5	90%	4.54	4.48	4.51	0.00142
5	70%	3.47	3.2	3.335	0.00105
5	50%	2.42	2.39	2.405	0.00076
5	30%	1.99	1.97	1.98	0.00062

شکل ۵-۳۱ تغییرات سرعت هوا در هواده را نشان می دهد. روند تغییرات افزایشی سرعت با بازشدگی دریچه و هد کاملاً مشهود می باشد. همانطور که در شکل مشاهده می شود، با افزایش باز شدگی بر میزان دبی در هواده افزوده می شود و این سیر در همه هدها تکرار می شود. همچنین با افزایش هد آب در اکثر بازشدگی ها سرعت هوا افزایش یافته است.

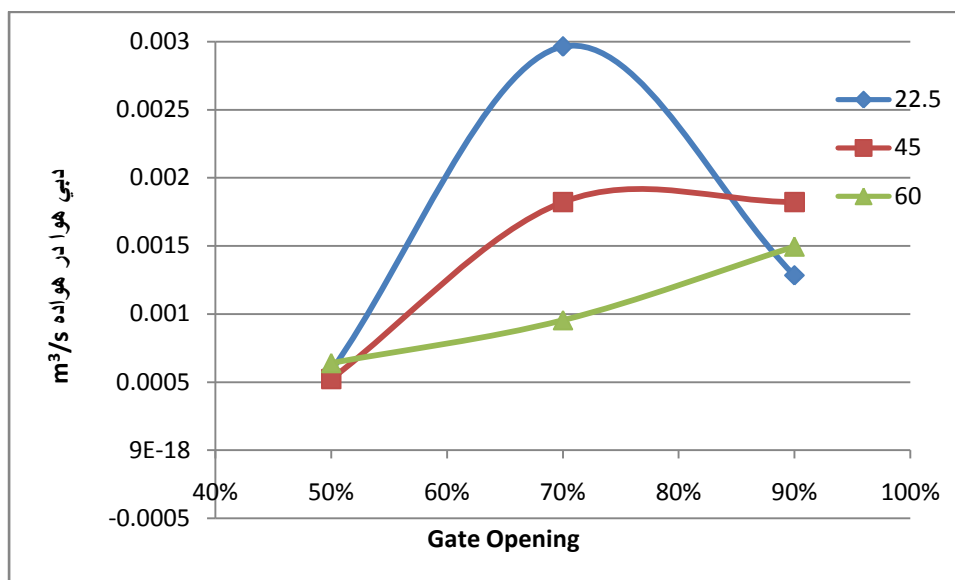


شکل ۵-۳۱: تغییرات دبی هوا در هواده با هد و بازشدگی دریچه

در مدل عددی تحقیق حاضر سرعت هوا در هواده با هد ۲ متر بررسی گردیده است. در جدول ۵-۶ حداکثر سرعت هوا در هواده برای تستهای مختلف ارائه شده است. شکل ۵-۳۲ نیز تغییرات دبی هوا در هواده را بر حسب درصد بازشدگی دریچه برای زاویه های مختلف لبه دریچه نشان می دهد.

جدول ۵-۶: تغییرات دبی هوا در هواده دریچه تحتانی با بازشدگی و هد

Gate Lip	22.5	45	60
Opening	Qa (m ³ /s)		
50%	0.00058	0.00052	0.00064
70%	0.00296	0.00182	0.00095
90%	0.00128	0.00182	0.0015



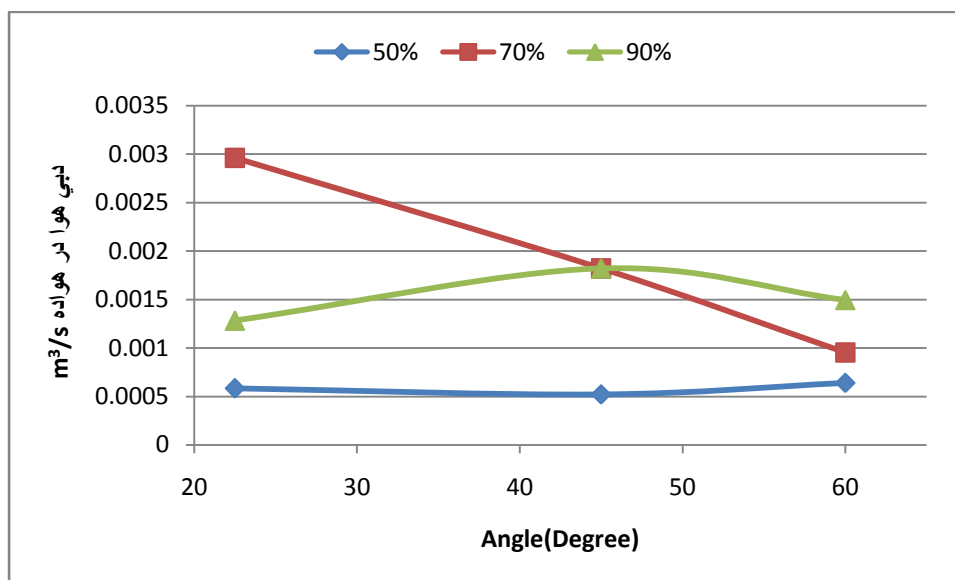
شکل ۳۲-۵ نتایج عددی تغییرات دبی هوا در هواده دریچه تحتانی با بازشدگی و هد

در این شکل ملاحظه می شود که در زاویه ۲۲/۵ درجه، با افزایش بازشدگی از ۵۰٪ تا ۷۰٪ دبی هوا در هواده افزایش یافته است. بعد از بازشدگی ۷۰٪ دبی هوا در هواده کاهش می یابد. در دریچه های با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه با افزایش بازشدگی دریچه دبی هوا در هواده بطور نسبی افزوده می شود. در نتیجه دیده می شود که زاویه لبه دریچه در بازشدگی ۷۰ درصد بیشترین تأثیر را بر دبی هوای هواده دارد.

. در جدول ۷-۵ و شکل ۳۳-۵ نتایج دبی هوا در هواده برای زاویه های مختلف در بازشدگی های مختلف نمایش داده شده است.

جدول ۷-۵: تغییرات دبی هوا در هواده دریچه تحتانی با بازشدگی و زاویه های مشخص شده

Gate Lip	Opening		
	50%	70%	90%
22.5	0.00058	0.00296	0.00128
45	0.00052	0.00182	0.00182
60	0.00064	0.00095	0.0015



شکل ۵-۳۳: تغییرات دبی هوا در هواده با بازشدگی و زاویه های مشخص شده

آنگونه که در شکل ۵-۳۳ مشاهده می شود شرایط افزایش میزان دبی هوا در هواده برای هر کدام از باز شدگی ها مختلف می باشد. برای باز شدگی ۵۰٪ با افزایش زاویه لبه دریچه دبی هوا در هواده ابتدا کمتر شده و در نهایت افزایش می یابد و می توان گفت تغییرات اندکی در کل گراف مشاهده می شود. در باز شدگی ۷۰٪ با افزایش زاویه لبه دریچه مشاهده می شود که افت شدیدی در دبی هوا در هواده رخ می دهد. و این شرایط در کل این باز شدگی ثابت است. در باز شدگی ۹۰٪ مشاهده می شود که با افزایش زاویه لبه دریچه ابتدا بر میزان دبی هوا در هواده افزوده و سپس با افت دبی هوا در هواده مواجه می شود. البته ذکر این نکته ضروری است که اگرچه سرعت هوا در هواده بعنوان معیاری از هوادهی مورد توجه می باشد، ولی با توجه به افزایش دبی هوا و ضخامت تیغه آب، نسبت دبی هوا به دبی آب معمولاً بعنوان پارامتر موثر در بحث هوادهی مورد عنایت طراحان می باشد.

فصل ششم

۶ - فصل ششم : جمع بندی و پیشنهادات

۶ - مقدمه

برای تحقق اهداف مورد نظر این پایان نامه، ابتدا با استفاده از مدل آزمایشگاهی موجود در مؤسسه تحقیقات آب ایران (مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۱۰ سد مخزنی ژاوه) آزمایشات مورد نظر انجام شده است. پس از تستهای آزمایشگاهی که توسط نگارنده به انجام رسید اقدام به شبیه سازی مدل عددی با استفاده از نرم افزار FLUENT گردید. مدل عددی اولیه مدلی با شرایط شکل لبه دریاچه در مدل آزمایشگاهی بوده است و با استفاده از نتایجی که از مدل آزمایشگاهی حاصل شده است نتایج مدل سازی عددی کالیبره شده و بهترین نوع مش بندی و روش های حل معادلات میدان جریان و فشار و همچنین مدل آشفتگی، انتخاب شده است. پس از آنکه مدل عددی با زاویه لبه دریاچه مطابق با مدل آزمایشگاهی سد ژاوه کالیبره شد، لبه های مختلف دیگر با زاویه های ۴۵ و ۶۰ درجه مدل سازی گردید.

در مشبندی همانگونه که در جداول ۱-۴ و ۲-۴ مشخص شده است درصد اختلاف بین مش بندی با تعداد کمتری مش در مدل ۱ با مدل ۲ با تعداد بیشتر مش در حدود ۲/۸۳٪ شده است. این مقدار اختلاف بیش از مقدار ۰/۵٪ اختلاف مجاز است که توصیه می شود. بنابراین با توجه به تعداد بسیار زیاد مش در مدل ۲، مبادرت به تولید مدل ۳ با تعداد مش کمتر از مدل ۲ و تعداد مش بیشتر از مدل ۱ شد. در مدل ۳ تعداد مش در کنار مرزها دارای اندازه ریزتری نسبت به مش مدل ۱ هستند تا مدل قابلیت بهتری را داشته باشد. نتایج مدل ۲ و مدل ۳ دارای اختلاف نسبی برابر با ۰/۴٪ می باشد که قابل قبول می باشد. در نتیجه برای مدل سازی در این تحقیق از مشهایی با این نوع خصوصیت یعنی ریز تر در کنار دیواره استفاده شد. در این تحقیق برای مدل سازی جریان آشفتگی از روش مدل سازی آشفتگی تنش رینولدز (Reynolds Stress) استفاده و مشاهده گردید که نتایج این مدل آشفتگی با مدل آزمایشگاهی دارای تطابق بسیار خوبی می باشد. در حل میدان جریان سرعت و فشار نتایج روش

حل PISO با نتایج مدل آزمایشگاهی از روش حل Simple دارای تطابق مناسبتری می باشد. برای بدست آوردن نتایج بهتر با کوچکتر کردن شبکه مش بندی مدل در نقاط حساس و همچنین در کناره های دیوار تلاش گردید نتایج بهتری بدست آید. در ادامه شرایط مدل عددی برای زاویه ۲۲/۵ درجه با مدل آزمایشگاهی کنترل شده و سپس مدل های دیگر با زاویه های ۴۵ و ۶۰ درجه و هد ۲ متر و بازشدگی ۵۰٪ و ۷۰٪ و ۹۰٪ مدل سازی شد تا تاثیر زاویه لبه دریچه بر توزیع غلظت هوا در پائین دست دریچه ها ارزیابی گردد. جمع بندی نتایج حاصل به شرح زیر می باشد.

۴۶ - جمع بندی و نتیجه گیری

- در بازشدگی ۵۰٪ میانگین اختلاف نتایج فشار آزمایشگاهی و عددی ۱۰/۴۲٪ و در بازشدگی ۷۰٪ برابر ۷/۷۵٪ و در بازشدگی ۹۰٪ معادل ۱۰/۹٪ است. میانگین سه حالت برابر ۹/۶۹٪ می باشد.

- بر اساس نتایج حاصل روند صعودی و نزولی مقادیر فشار پیزومتریک در دو حالت عددی و آزمایشگاهی همخوانی بسیار خوبی را نشان داده است.

- در تمام مدل ها، با افزایش زاویه لبه دریچه ارتفاع عمق نسبی آب با غلظت ۵۰٪ کاهش می یابد.

- در باز شدگی ۹۰٪ حداکثر غلظت نسبی هوا در لبه دریچه با زاویه ۴۵ درجه اتفاق می افتد و کمترین مقدار غلظت نسبی هوا در لبه دریچه با زاویه ۶۰ درجه می باشد.

- در باز شدگی ۵۰٪ حداکثر غلظت نسبی هوا در لبه دریچه با زاویه ۲۲/۵ درجه اتفاق می افتد و کمترین مقدار غلظت نسبی هوا در لبه دریچه با زاویه ۴۵ درجه می باشد.

- زاویه ۶۰ درجه در بازشدگی های نزدیک ۵۰٪ و زاویه ۴۵ درجه در بازشدگی های نزدیک ۹۰٪ که اهمیت بیشتری دارد منجر به افزایش میزان نفوذ هوا به داخل آب گردیده است. بنابراین در جمع، زاویه ۴۵ درجه از نقطه نظر هیدرولیکی توصیه و مناسب تشخیص داده می شود.
- در بازشدگی های ۵۰٪ و ۹۰٪ تغییر اندازه زاویه لبه دریچه تأثیر چندانی بر میزان دبی هوا در هواده ندارد. ولی در باز شدگی ۷۰٪ با افزایش زاویه لبه دریچه میزان دبی هوا در هواده کاهش می یابد. به نظر می رسد علت این امر انحنای خطوط جریان بعد از لبه دریچه می باشد که باعث ایجا توربولنس بیشتر می گردد.

۳۶ - پیشنهادات :

- در راستای ارتقای نتایج حاصل از این تحقیق موارد زیر پیشنهاد می گردد :
- آزمایشات لازم بیشتری با بازشدگی های مختلف و هدهای مختلف انجام شده و تغییرات غلظت هوا در طول مجرا اندازه گیری شود و سپس مدل عددی برای شرایط فوق دوباره کالیبره شود.
 - آزمایشات و شبیه سازی عددی با زوایای متفاوت دیگری از صفر تا ۹۰ درجه انجام شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گیرند.
 - در طول تونل بعد از دریچه به بررسی تأثیر شکل لبه دریچه بر میزان هوادهی و تغییرات غلظت جریان در فواصل مختلف انجام شود. این کار با تونل های با طول های مختلف جهت ارزیابی پارامتر طول تونل انجام پذیرد تا تأثیر آن بر میدان نیز ملاحظه شود.
 - در کنار پارامترهای مطرح هیدرولیکی، تأثیر هندسه مجرا بر عملکرد لبه دریچه حائز اهمیت بوده که توصیه می گردد مورد توجه قرار گیرد.

- با توجه به تاثیر همه این عوامل بر کاویتاسیون، در نهایت ارزیابی وقوع کاویتاسیون بر میدان ایجاد شده ناشی از اختلاط آب و هوا مد نظر قرار گیرد.
- با توجه به شرایط پائین دست مجرا بر عملکرد آن، این تاثیر بخصوص در اندرکنش با تاثیر لبه دریچه مورد توجه قرار گیرد.
- کاربرد مدل های مطرح دیگر در کنار مدل حاضر امکان ارزیابی آنها را فراهم نموده و کاستی ها و توانمندی های این مدل ها پیش روی طراحان قرار می دهد.

- (۱) راهنمای طراحی و بهره برداری تخلیه کننده های تحتانی مخازن سدها، استاندارد مهندسی آب، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو.
- (۲) میری، م، ۱۳۸۸، پایان نامه ارشد، بررسی عددی و آزمایشگاهی عملکرد هواده ها در سرریز های آزاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- (۳) Speerli and Hager, W.H., "Air water flow in bottom outlets". Canadian journal of civil Engineering, Vol.27, (2000)
- (۴) Falvey, H.T.(1980), "Air water flow in Hydraulic structures", USBR Engrg. Monograph, No. 41, Denver, Colorado, USA.
- (۵) Peterka A,J., The effect of entrained air on cavitations pitting , Proceeding of Minnesota International Hydraulic Convection, USA,(1953).
- (۶)Kavianpour, M.R. (1997), " The Reattaching Flow Downstream of Deflectors Including the Effect of Air Injection", A thesis submitted to the University of Manchester Institute of Science and Technology for the degree of PhD.
- (۷)Kavianpour, M.R. (2000), "Statistical Characteristics of Pressure Fluctuations Downstream Of Deflectors", 8th Int. Symp. On Stochastic Hydraulics, Beijing, china.
- (۸) Falvey, H.T.(1990), "Cavitation in Chutes and Spillways", USBR Engrg. Monograph, No. 42, Denver, Colorado, USA.
- Falvey, H.T.(1980), "Air water flow in Hydraulic structures", USBR Engrg. Monograph, No. 41, Denver, Colorado, USA.
- (۹) Harshbarger, E. D., Vigander, s., Hecker G. E., "Air Entrainment in High Head gated Conduits", Discussion of paper by H. R. Sharma, Proc., Am. Soc. Civ. Eng., vol. 93, No. HY12, pp. 1486-1489, December 1977.
- (۱۰) Sikora, A., "Zavdusnenie Sachtovych Priepadov," Vyskumny Ustav Vodohospodarsky, Bratislava, Prace a studie 37, p. 112, (Air Entrainment in Shaft Spillways, Czechoslovakia), 1965.
- (۱۱) Kalinske, A.A., Robertson, J.M. (1943). Closed conduit flow. Transactions, ASCE, 108, 1435-1447.

(۱۲) Sharma, H.R., (1976). Air-Entrainment in high head gated conduits. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 102(HY11), 1629-1646.

(۱۳) U.S. Army Corps of Engineers, 1964. Air-demand Regulated Outlet Works. Hydraulic Design Criteria, Chart 050-1.

(14) Oliveto G., Biggiero V., and Hager W.H., Botto, outlet for sewers, Journal of irrigation and drainage, (1997).

(۱۵) Boes, R.M., and Hager, W. H., (2003a). "Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways," ASCE Journal of Hydraulic Engineering. September 2003, pp. 66 1-670.

(۱۶) Boes, R.M., Hager, W.H., (2003b). "Hydraulic Design of Stepped Spillways". ASCE, Journal of Hydraulic Engineering. 129(9), September, pp. 671-679.

(17) Shamsai A., soleymanzadeh R., Numerical simulation of Air-water flow in bottom outlet, International Journal of Civil Engineering. Vol.4, No.1 March (2006).

(۱۸) معظمی، ص. ۱۳۸۶، پایان نامه ارشد، تحلیل عددی جریان دو فاز آب و هوا در تونل های تخلیه کننده تحتانی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(19) Najafi M.R., Roshan R., Zarrati A.R., Kavianpour M.R., Numerical modeling of flow condition in a bottom outlet, 16th IAHR-APD & 3rd IAHR-ISHS (2008).

(۲۰) حسینی س.ا.، حبیبی م.، پاره کار م.، بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون در مجاری تخلیه کننده تحتانی سدها (مطالعه موردی تخلیه کننده تحتانی سد نرماشیر)، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، (پاییز ۱۳۸۸).

(۲۱) حسینی س.ا.، صانعی م.، پاره کار م.، حبیبی م.، مطالعه آزمایشگاهی ارتعاشات و نیروهای وارد بر دریچه های سرویس و اضطراری در مجاری تخلیه کننده سدها (مطالعه موردی تخلیه کننده تحتانی سد نرماشیر)، مجله علمی کشاورزی علوم و مهندسی آبیاری، انتشارات دانشگاه شهید چمران، جلد سی و سوم شماره ۱، (۱۳۸۹).

(۲۲) نوذری، ن، ۱۳۸۸، پایان نامه ارشد، بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان دو فاز در تونل تخلیه کننده تحتانی سدها، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

- (۲۳) حسینی، م، کاویانپور، م، ر، بررسی خصوصیات جریان دو فازی بر روی سرریز پلکانی (مطالعه موردی: سرریز سیاه بیشه)، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۹.
- (۲۴) مشتاقیان، آ، کاویانپور، م، ر، بررسی مکانیزم هواگیری در سرریزهای پلکانی، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).
- (۲۵) امامی، م، ک، کاویانپور، م، ر، بررسی عددی تأثیر ورود ذرات معلق غیرچسبنده در جریان در تخلیه کننده تحتانی سد ها، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.
- (۲۶) غزالی، ف،، صالحی نیشابوری، ع،، محمدرضا کاویانپور، بررسی عددی تأثیر هندسه مجرا بر میدان فشار پیرامون دریچه های تحتانی، انجمن هیدرولیک ایران، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، (۱۳۹۰)
- (۲۷) منظمی، م، ۱۳۹۰، پایان نامه ارشد، بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر شکل لبه دریچه بر میدان جریان پایین دست دریچه های تحتانی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- (۲۸) Novak, P. and Cabelka. (1981) "Models in Hydraulic Engineering ." Pitman advanced Publishing Program, London.
- (۲۹) مقسومی، ۱۳۸۹، گزارش اولیه مدل هیدرولیکی تخلیه کننده تحتانی و حوضچه آرامش سد مخزنی زاوه، مؤسسه تحقیقات آب ایران، گروه سازه های هیدرولیکی.
- (۳۰) مقیمی، م، ۱۳۸۷، پایان نامه ارشد، بررسی پارامترهای هیدرولیکی و خلازایی جریان بر روی سرریزهای تندآب و پایانه های کاهنده انرژی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- (۳۱) وایت، ا، ف، (۱۳۸۲) " مکانیک سیالات ". موسوی نسب، ک. مترجم، جلد اول
- (۳۲) Yakhot, V. and Orszag, S.A. (1986) "Renormalization Group Analysis of Turbulence." I. Basic Theory. Journal of Scientific Computing, 11-51.
- (۳۳) Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1972). "Lectures in Mathematical Model of Turbulence." Academic Press, London, England.
- (۳۴) Henkes, R.A.W.M. and Van Der Flugt, F.F. and C.J. (1991). | Hoogendoorn Turbulence Models." Int. J. Heat Mass Transfer, 34:1543-1557.
- (۳۵) Manual Fluent 6.1. "Overview of Numerical Schemes." Vol 3, 17-1-1, 17-1-2

(۳۶) هافمن.ک.، ۱۳۷۷، " دینامیک سیالات محاسباتی " ترجمه، دکتر احمد رضا عظیمیان

(۳۷) Patankar, S.V,(1980) "Numerical Heat transfer and Fluid Flow." Hemi-sphere Washington, D.C.

(۳۸) Barth, T.J. and Jespersen , D. (1989) " The design and application of up-wind schemes on unstructured meshes." Technical Report AIAA-89-0366, AIAA 27 th Aerospace Sciences Meeting , Reno, Nevada.

(۳۹) Vandoormaal, J. P. and Raithby, G. D. (1984) "Enhancements of the SIM-PLE method for Predicting Incompressible Fluid Flows."

(۴۰) امامی، م، ۱۳۸۹، پایان نامه ارشد، تحلیل عددی جریان رسوب در تونل تخلیه کننده تحتانی سدها، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(۴۱) Hirt C. W. and Nichols, B. D. (1981) "volume of Fluid (VOF) Method for the dynamics of free Boundaries." J. Comput. Phys., 39:201-225.

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. Previous investigations have shown that air entrainment into the flow reduces cavitations damages; thus, aeration just downstream of the gates by air vents has become a common solution for such problem.

The main aim of this research is to study the effects of gate lip on aeration process and its distribution downstream of the gates. The effect of gate lip is examined experimentally, and then is supported by numerical simulation. A physical model was constructed at Water Research Institute of Iran and examined with gate openings of 50%, 70% and 90% with the gate lip angel of 22.5° , and water head of 2m. Then, a numerical model was provided and calibrated by experimental results. The model was used to simulate the lip angles of 45° and 60° degrees to check its impact on the aeration mechanism. The results showed the reasonable agreements between the numerical and experimental information. It is also concluded that, increasing the gate lip angle changes the flow characteristics and thus, the air density downstream of outlet gates.

Keywords: Gate Lip Angle, Aeration, Cavitation, Numerical Model, Physical Model.