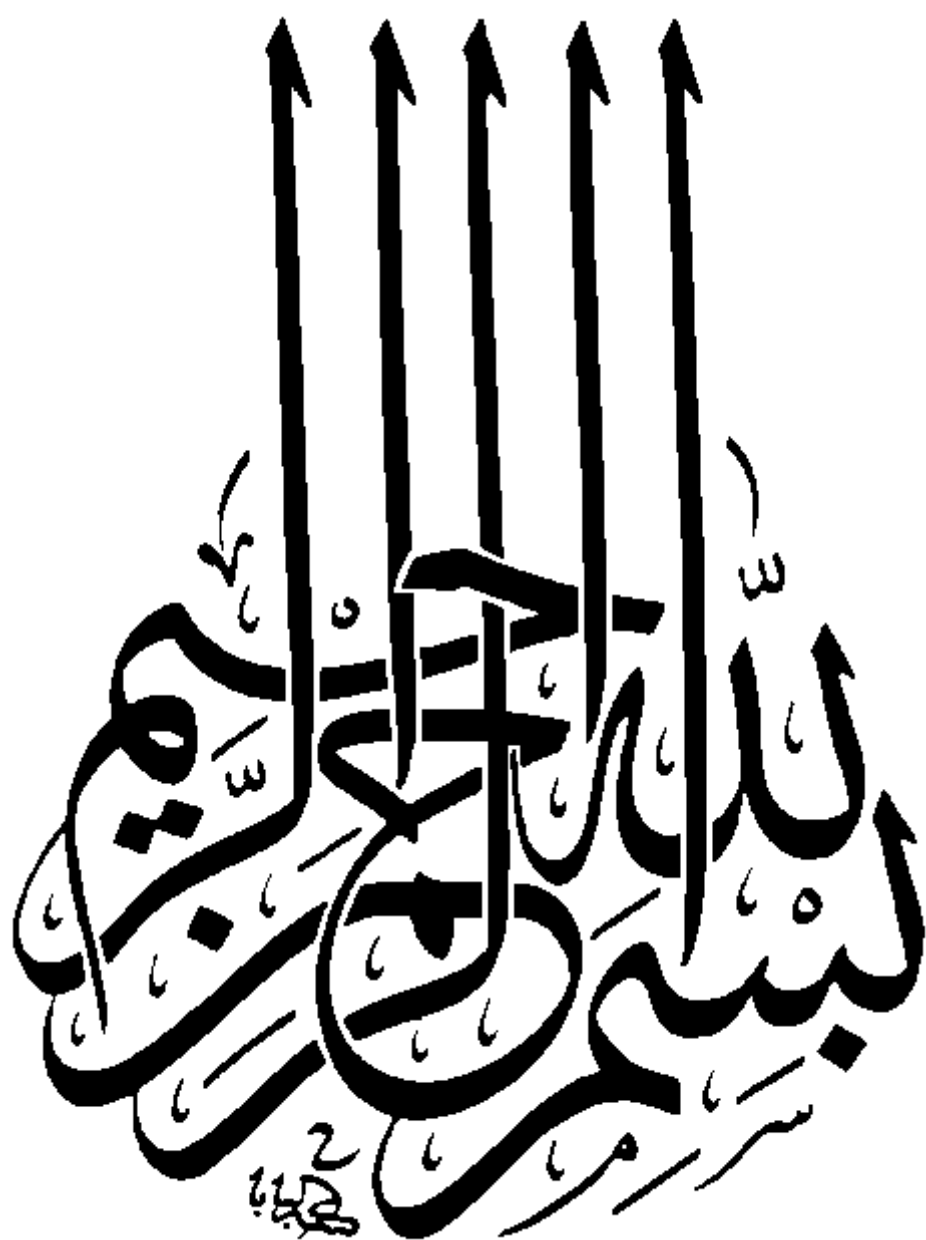






دانشکده مهندسی عمران و معماری

گروه مهندسی عمران

تعیین میزان هوادهی در دریچه تخلیه کننده تحتانی سدها با استفاده از پارامترهای مختلف جریان

دانشجو: پیمان سلیمانی

استاد راهنما :

دکتر رامین امینی

استاد مشاور :

مهندس رضا روشن

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

بهمن ماه ۱۳۹۱



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

ویرایش:

تاریخ:

شماره:

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای پیمان سلیمانی رشته عمران گرایش هیدرولیک تحت عنوان: تعیین میزان هوادهی در دریچه تخلیه کننده تحتانی سدهای با استفاده از پارامترهای مختلف جریان که در تاریخ ۹۱/۱۱/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: <u>بسیار</u> امتیاز <u>۱۸</u>)	☒	دفاع مجدد	☐	مردود	☐
--	-------------------------------------	-----------	--------------------------	-------	--------------------------

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر رامین امینی	استاد یار	
۲- استاد مشاور	مهندس رضا روشن	-	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استاد یار	
۴- استاد ممتحن	دکتر سعید گلپایان	استاد یار	
۵- استاد ممتحن	دکتر صمد امام قلی زاده	استاد یار	

رئیس دانشکده: احمد احمدی

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

تشکر و قدردانی

با سپاس و ستایش به درگاه خالق هستی، از استاد ارجمند جناب آقای دکتر رامین امینی که مرا در انجام این پایان نامه یاری نمودند و با پشتیبانی بی دریغ خویش، سختی های راه را هموار نموده و با راهنمایی های صاحب نظرانه خود به پایان نامه ارزش و اعتبار بخشیدند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم و برای ایشان در تمام مراحل زندگی آرزوی موفقیت را دارم.

در به تحقق رسیدن و به سرانجام رساندن این پایان نامه از پشتیبانی استاد مشاور جناب آقای مهندس رضا روشن بهره جستیم که در اینجا از ایشان صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

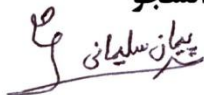
در اینجا لازم می دانم از جناب آقای مهندس عباس مقسومی کارشناس بخش سازه های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب برای پشتیبانی فنی و کمک های فراوانی که به اینجانب نمودند، صمیمانه تشکر نمایم. همچنین از تمام کسانی که در موسسه تحقیقات آب به طرق مختلف به اینجانب یاری رساندند، قدردانی می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **پیمان سلیمانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **عمران - هیدرولیک** دانشکده **عمران و معماری** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین میزان هوا دهی در دریچه تخلیه کننده تحتانی سدها با استفاده از پارامترهای مختلف جریان تحت راهنمایی **دکتر رامین امینی** به عنوان استاد راهنما 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: ۱۳۹۱/۱۱/۲۹
امضای دانشجو

 پیمان سلیمانی

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.

چکیده

در پایان نامه حاضر تلاش شده است با بررسی هواده‌ها در تونل های تخلیه کننده تحتانی سدها، طبیعت موضوع به صورت دقیقتر مورد شناسایی قرار گیرد. این ارزیابی بر پایه ضریب هوادهی استوار است. جهت دست یافتن به این هدف، از داده های اندازه گیری میزان هوادهی جریان در مدل های تخلیه کننده چند سد ساخته شده در آزمایشگاه موسسه تحقیقات آب و همچنین از منابع خارجی موجود استفاده گردید. با توجه به تحقیقات پیشین و تاثیر کارکرد دریاچه ها بر میزان هوادهی، ارزیابی میزان هوادهی هواده‌ها در مدل های تخلیه کننده به دو بخش اصلی پایین دست یک دریاچه و بین دو دریاچه تقسیم شده است. بخش هوادهی پایین دست یک دریاچه نیز با توجه به بررسی های انجام شده بر روی داده های تجربی موجود و نتایج تحقیقات پیشین، به علت وجود دو مکانیزم حاکم بر سیستم هوادهی، به دو قسمت هوادهی پایین دست یک دریاچه بدون افزایش سطح مقطع تونل در پایین دست و هوادهی پایین دست یک دریاچه با افزایش سطح مقطع تونل در پایین دست تقسیم گشته است.

به دلیل عدم کفایت داده ها برای انجام تحلیل های مورد نظر و نیز نبودن داده هایی در زمینه هوادهی بین دو دریاچه در زمان عملکرد دریاچه اضطراری، اندازه گیری هایی جدیدی روی مدل های موجود در آزمایشگاه موسسه تحقیقات آب صورت گرفته است. بر اساس بررسی نتایج آزمایشگاهی موجود، دقت روابط پیشنهادی محققان مختلف در ارتباط با پیش بینی میزان هوادهی مورد بررسی قرار گرفت. اختلافات بدست آمده از بررسی فوق نشان دهنده خطاهای قابل توجه در بکارگیری از این روابط در ارزیابی عملکرد هواده‌ها می باشد. لذا تلاش گردیده تا با تحلیل داده های تجربی، پارامترهای موثر بر هوادهی مشخص گردد و با در نظر گرفتن هندسه و مشخصه های هیدرولیکی جریان، روابط تجربی جدیدی بر مبنای تقسیم بندی مطرح شده جهت پیش بینی میزان هوادهی ارائه گردد.

سرانجام با مطالعه جریان دوفازی آب و هوا در سازه های هیدرولیکی میزان هوادهی در دریچه تخلیه کننده تحتانی سدها با استفاده از پارامترهای مختلف جریان تعیین گشته است.

واژه های کلیدی: تخلیه کننده تحتانی، جریان آب و هوا، دریچه، ضریب هوادهی،
کاویتاسیون، هوادهی

فصل اول: مقدمه و کلیات..... ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- اهداف و دستاوردهای پایان نامه ۴

۱-۳- ساختار پایان نامه ۶

فصل دوم: کاویتاسیون در سازه های هیدرولیکی..... ۷

۲-۱- مقدمه ای بر مفهوم کاویتاسیون ۸

۲-۲- اثرات کاویتاسیون ۹

۲-۳- شاخص کاویتاسیون ۱۰

۲-۴- اهمیت نوسانات فشار و تاثیر هوادهی ۱۳

۲-۵- تخریب در اثر کاویتاسیون ۱۴

۲-۶- خسارات کاویتاسیون در سرریز سد کارون یک (شهید عباسپور) ۱۵

۲-۷- روش های کنترل کاویتاسیون ۱۶

فصل سوم: هوادهی در تونل های تخلیه کننده تحتانی سدها..... ۲۰

۳-۱- تعریف ۲۱

۳-۲- انواع هواگیری در سازه های هیدرولیکی ۲۱

۳-۳- تاثیرات هوادهی بر جریان ۲۲

۳-۴- هوادهی جریان برای پیشگیری از کاویتاسیون ۲۳

۳-۵- ساختار عمودی و طولی جریان آب و هوا ۲۵

۳-۶- تخلیه کننده تحتانی سدها ۲۷

۳-۶-۱- دریچه های کنترل ۲۸

۳-۷- لزوم هوادهی پایین دست دریچه ها ۳۰

۳-۸- طبقه بندی جریان پائین دست دریچه ۳۱

۳-۹- فرایند هواگیری جریان ۳۲

۳-۱۰- عوامل موثر بر هواگیری جریان پایین دست دریچه ۳۷

۳-۱۱- ارزیابی میزان هوادهی در پایین دست دریچه ها ۳۸

۳-۱۲- هوادهی بین دو دریچه ۴۸

۳-۱۳- ملاحظات طراحی ۴۹

فصل چهارم: اطلاعات و بررسی های آزمایشگاهی..... ۵۰

- ۴-۱- مقدمه ۵۱
- ۴-۲- مدل هیدرولیکی تونل انتقال دشت عباس ۵۲
- ۴-۳- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه کننده سد ژاوه ۵۳
- ۴-۴- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه کننده سد گتوند علیا ۵۵
- ۴-۵- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه کننده سد جره ۵۷
- ۴-۶- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه کننده سد البرز ۶۰
- ۴-۷- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه کننده سد Folsom ۶۴
- ۴-۸- روش اندازه گیری داده های تجربی ۶۸
- ۴-۹- جمع بندی نتایج اندازه گیری ۶۹

فصل پنجم: نتایج تحلیل داده های آزمایشگاهی..... ۷۸

- ۵-۱- اهداف تحلیل داده ها ۷۹
- ۵-۲- محاسبه پارامترهای مورد نیاز از نتایج اندازه گیری ۸۰
- ۵-۳- ارزیابی میزان هوادهی توسط هواده در پایین دست یک دریچه ۸۲
- ۵-۳-۱- تحلیل داده های مربوط به $a \leq 1$ (دسته نخست) ۹۱
- ۵-۳-۲- تحلیل داده های مربوط به $a > 1$ (دسته دوم) ۹۸
- ۵-۴- ارزیابی میزان هوادهی بین دو دریچه ۱۰۳
- ۵-۵- دبی هوادهی ماکزیمم ۱۰۸

فصل ششم: جمع بندی و ارائه پیشنهادات..... ۱۱۲

- ۶-۱- مقدمه ۱۱۳
- ۶-۲- جمع بندی نتایج ۱۱۴
- ۶-۲-۱- نتایج تحلیل داده های هوادهی پایین دست یک دریچه مربوط به دسته $a \leq 1$ ۱۱۵
- ۶-۲-۲- نتایج تحلیل داده های هوادهی پایین دست یک دریچه مربوط به دسته $a > 1$ ۱۱۶
- ۶-۲-۳- نتایج تحلیل داده های هوادهی بین دو دریچه ۱۱۸
- ۶-۳- پیشنهاداتی برای ادامه تحقیق ۱۲۱
- مراجع ۱۲۴

- شکل (۱-۲): موقعیتهای مختلف مرجع و پروفیل‌های سرعت مربوطه در جریان عبوری از پله رو به
جریان ۱۱
- شکل (۲-۲): مراحل پیشرفت کاویتاسیون در جریان عبوری از پله رو به جریان ۱۳
- شکل (۳-۲): خسارت کاویتاسیون در سرریز سد کارون یک (شهید عباسپور) ۱۶
- شکل (۴-۲): نمودار افت وزنی نمونه‌های بتن بر حسب غلظت هوا ۱۹
- شکل (۱-۳): ساختار جریان در کانال باز (Falvey 1980) ۲۶
- شکل (۲-۳): پروفیل طولی سد Folsom واقع در امریکا و تونل‌های تخلیه‌کننده واقع در بدنه سد ۲۸
- شکل (۳-۳): موقعیت دریچه‌های اضطراری و سرویس از نوع کشویی در یک تونل تخلیه‌کننده ۲۹
- شکل (۴-۳): طبقه‌بندی جریان پایین‌دست دریچه ۳۲
- شکل (۵-۳): پروفیل طولی جریان تونل پایین‌دست دریچه به همراه توزیع در سرعت در دو مقطع از
جریان ۳۶
- شکل (۶-۳): رابطه بین Q_{av} و Q_{ad} و Q_{at} بر حسب m^3/s نسبت به بازشدگی نسبی دریچه
در حالت بررسی تاثیر درصد بازشدگی اریفیس هواده بر دبی هوا برای تونلی به طول ۲۰ متر ۳۸
- شکل (۷-۳): نمودارهای Q_{av} و Q_{ad} و Q_{at} بر حسب m^3/s نسبت به بازشدگی نسبی دریچه
در حالت بررسی تاثیر طول تونل پایین‌دست (L_t) بر دبی هوا برای هد انرژی ۱۵ متر ۳۹
- شکل (۸-۳): نمودار ضریب هوادهی نسبت به Fr_c-1 ، مقایسه رابطه (۸-۳) با داده‌های پروتوتیپ ... ۴۰
- شکل (۹-۳): نمودار Q_{av} بر حسب m^3/s نسبت به بازشدگی نسبی دریچه در بررسی تاثیر هندسه
تونل بر دبی هوا ۴۱
- شکل (۱۰-۳): نمودار ضریب هوادهی نسبت به Fr_c-1 ، مقایسه رابطه (۹-۳) با داده‌های پروتوتیپ ۴۲
- شکل (۱۱-۳): نمودار $\beta+1$ نسبت به $1/(A_c/A_t)$ و Fr_c ۴۵
- شکل (۱۲-۳): تصویر شماتیکی از مدل تحقیقاتی Speerli ۴۶
- شکل (۱۳-۳): نمودار دبی بی بعد هوا نسبت به بازشدگی نسبی دریچه ۴۶
- شکل (۱۴-۳): نمودار ضریب هوادهی نسبت به Fr_c-1 ۴۷
- شکل (۱-۴): پروفیل طولی اتاقک دریچه‌های تونل انتقال دشت عباس ۵۳
- شکل (۲-۴): تغییرات ضریب هوادهی نسبت به بازشدگی های مختلف دریچه اضطراری مدل ژاوه ۵۴
- شکل (۳-۴): تغییرات دبی هوادهی نسبت به بازشدگی های مختلف دریچه اضطراری مدل ژاوه ۵۵
- شکل (۴-۴): نتایج آزمایش‌های هوادهی مدل گتوند علیا در مقایسه با تحقیقات پیشین ۵۷
- شکل (۵-۴): نقشه سازه‌ای مدل تونل سد جره ۵۸
- شکل (۶-۴): نتایج آزمایش‌های هوادهی مدل جره در مقایسه با تحقیقات پیشین ۶۰
- شکل (۷-۴): نقشه سازه‌ای مدل تونل سد البرز ۶۱

- شکل (۴-۸) : نتایج آزمایشهای هوادهی مدل البرز در مقایسه با تحقیقات پیشین..... ۶۴
- شکل (۴-۹) : نمایی از مدل سد Folsom و تجهیزات جنبی دیگر ۶۵
- شکل (۴-۱۰) : نتایج آزمایشهای هوادهی مدل Folsom در مقایسه با تحقیقات پیشین..... ۶۷
- شکل (۴-۱۱) : مقایسه نتایج آزمایشهای هوادهی دریاچه اضطراری مدل ها و دریاچه کنترل مدل Folsom با تحقیقات پیشین ۷۰
- شکل (۴-۱۲) : مقایسه نتایج آزمایشهای هوادهی دریاچه سرویس مدل ها با تحقیقات پیشین ۷۱
- شکل (۴-۱۳) : نمودار درصد خطای رابطه USACE ۷۱
- برای نتایج آزمایشات دریاچه اضطراری مدل ها و دریاچه کنترل مدل Folsom ۷۱
- شکل (۴-۱۴) : نمودار درصد خطای رابطه Sharma ۷۱
- برای نتایج آزمایشات دریاچه اضطراری مدل ها و دریاچه کنترل مدل Folsom ۷۲
- شکل (۴-۱۵) : نمودار درصد خطای رابطه Cambpel & Guyton ۷۲
- برای نتایج آزمایشات دریاچه اضطراری مدل ها و دریاچه کنترل مدل Folsom ۷۲
- شکل (۴-۱۶) : نمودار درصد خطای رابطه کاویانپور (حد بالا) ۷۲
- برای نتایج آزمایشات دریاچه اضطراری مدل ها و دریاچه کنترل مدل Folsom ۷۳
- شکل (۴-۱۷) : نمودار درصد خطای رابطه کاویانپور (حد پایین) ۷۳
- برای نتایج آزمایشات دریاچه اضطراری مدل ها و دریاچه کنترل مدل Folsom ۷۳
- شکل (۴-۱۸) : نمودار درصد خطای رابطه USACE برای نتایج آزمایشات دریاچه سرویس مدل ها. ۷۴
- شکل (۴-۱۹) : نمودار درصد خطای رابطه Sharma برای نتایج آزمایشات دریاچه سرویس مدل ها. ۷۴
- شکل (۴-۲۰) : نمودار درصد خطای رابطه Cambpel & Guyton برای نتایج آزمایشات دریاچه سرویس مدل ها ۷۵
- شکل (۴-۲۱) : نمودار درصد خطای رابطه کاویانپور (حد بالا) برای نتایج آزمایشات دریاچه سرویس مدل ها ۷۵
- شکل (۴-۲۲) : نمودار درصد خطای رابطه کاویانپور (حد پایین) برای نتایج آزمایشات دریاچه سرویس مدل ها ۷۶
- شکل (۵-۱) : نمونه‌ای از نتایج بدست آمده از تحلیل رگرسیون با ۴ پارامتر ۸۸
- برای داده‌های هوادهی پایین دست یک دریاچه در حالت $a > 1$ ۸۸
- برای داده‌های هوادهی پایین دست یک دریاچه در حالت $a > 1$ ۸۹
- شکل (۵-۳) : نمودار β_t نسبت به Fr_c برای مدل های مختلف دسته $a \leq 1$ ۹۱
- شکل (۵-۴) : نمودار خطای محاسباتی رابطه (۵-۱۸) ۹۴
- شکل (۵-۵) : نمودار خطای محاسباتی رابطه (۵-۱۹) ۹۵
- شکل (۵-۶) : مقایسه نتایج آزمایشهای هوادهی دریاچه اضطراری مدل ژاوه با روابط (۵-۲۰) و (۵-۲۱) ۹۶

- شکل (۵-۷): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه اضطراری مدل گتوند علیا با روابط (۵-۲۰) و (۵-۲۱) ۹۷
- شکل (۵-۸): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه اضطراری مدل البرز با روابط (۵-۲۰) و (۵-۲۱) ۹۷
- شکل (۵-۹): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه اضطراری مدل جره با روابط (۵-۲۰) و (۵-۲۱) ۹۸
- شکل (۵-۱۰): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه کنترل مدل Folsom با روابط (۵-۲۰) و (۵-۲۱) ۹۸
- شکل (۵-۱۱): نمودار β_t نسبت به Fr_c برای مدل‌های مختلف دسته $a > 1$ ۹۹
- شکل (۵-۱۲): نمودار خطای محاسباتی رابطه (۵-۲۴) ۱۰۱
- شکل (۵-۱۳): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه سرویس مدل ژاوه با روابط (۵-۲۵) و (۵-۲۶) ۱۰۲
- شکل (۵-۱۴): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه سرویس مدل گتوند علیا با روابط (۵-۲۵) و (۵-۲۶) ۱۰۲
- شکل (۵-۱۵): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه سرویس مدل البرز با روابط (۵-۲۵) و (۵-۲۶) ۱۰۳
- شکل (۵-۱۶): نمودار β_t نسبت به Fr_c برای مدل‌های مختلف در حالت هوادهی بین دو دریچه ۱۰۴
- شکل (۵-۱۷): نمودار خطای محاسباتی رابطه (۵-۳۰) ۱۰۶
- شکل (۵-۱۸): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی بین دو دریچه مدل ژاوه با روابط (۵-۳۱) و (۵-۳۲) ۱۰۷
- شکل (۵-۱۹): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی بین دو دریچه مدل گتوند علیا با روابط (۵-۳۱) و (۵-۳۲) ۱۰۸
- شکل (۵-۲۰): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی بین دو دریچه مدل دشت عباس با روابط (۵-۳۱) و (۵-۳۲) ۱۰۸
- شکل (۵-۲۱): نمودار دبی هوای عبوری از هواده در مقیاس واقعی نسبت به بازشدگی ۱۰۹
- دریچه برای حالت هوادهی پایین دست یک دریچه با $a \leq 1$ ۱۰۹
- شکل (۵-۲۲): نمودار دبی هوای عبوری از هواده در مقیاس واقعی نسبت به بازشدگی ۱۱۰
- دریچه برای حالت هوادهی پایین دست یک دریچه با $a > 1$ ۱۱۰
- شکل (۵-۲۳): نمودار دبی هوای عبوری از هواده در مقیاس واقعی نسبت به بازشدگی ۱۱۰
- دریچه اضطراری برای حالت هوادهی بین دو دریچه ۱۱۰
- شکل (۶-۱): نمایی از یک دستگاه Hot wire جهت اندازه گیری سرعت هوا ۱۲۱

جدول (۴-۱): نتایج آزمایشگاهی هوادهی بین دو دریچه تونل انتقال دشت عباس.....	۵۳
جدول (۴-۲): نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه اضطراری سد گتوند علیا.....	۵۶
جدول (۴-۳): نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه اضطراری سد جره.....	۵۹
جدول (۴-۴): نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه اضطراری سد البرز.....	۶۲
جدول (۴-۵): نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه سرویس سد البرز.....	۶۳
جدول (۴-۶): نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه کنترل سد Folsom.....	۶۶
جدول (۵-۱): ضریب فشردگی جریان بر حسب درصد بازشدگی دریچه.....	۸۲
جدول (۵-۲) : نتایج بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف در تحلیل داده‌های مربوط به $a \leq 1$	۹۲
جدول (۵-۳) : نتایج بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف در تحلیل داده‌های مربوط به $a > 1$	۱۰۰
جدول (۵-۴): نتایج بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف در تحلیل داده‌های مربوط به هوادهی بین دو دریچه.....	۱۰۴

فهرست علائم و نشانه‌ها

علائم	توضیحات
A_a	۱) سطح مقطع گذرگاه هوا بالای سطح آب در مجرای بسته (m^2)
	۲) سطح مقطع هواده (m^2)
A_{av}	سطح مقطع مجرای هوا (m^2)
A_c	سطح مقطع جریان در محل فشردگی آن (m^2)
A_d	سطح مقطع تونل پایین دست دریچه (m^2)
A_g	سطح مقطع تونل در محل دریچه (m^2)
A_t	سطح مقطع کل مجرای بسته (m^2)
A_w	سطح مقطع جریان در محل دریچه (m^2)
$(A_w)_{max}$	سطح مقطع ماکزیمم جریان آب در مجرای بسته (m^2)
$A_{۹۰}$	سطح مقطع جریان آب- هوا برای غلظت هوای کمتر از ۹۰٪ (m^2)
a	۱) ضریب تجربی برای ناهمواریهای سطحی
	۲) نسبت سطح مقطع تونل پایین دست به سطح مقطع تونل در محل دریچه
$adj R_p^r$	ضریب R_p^r اصلاح شده
b	ضریب تجربی برای ناهمواریهای سطحی
b_g	عرض تونل در محل دریچه (m)
b_t	عرض تونل (m)
C_c	ضریب فشردگی جریان
C_d	ضریب تخلیه دریچه
C_g	عدد ثابت بر اساس دمای مطلق، جرم و ثابت مهندسی گاز (J)
C_m	ضریب تجربی در ارتباط با برآورد ضریب هوادهی
C_o	ضریب تجربی در ارتباط با برآورد ضریب هوادهی
C_{pr}	ضریب فشار در زبری سطح
C_v	نسبت سرعت واقعی به سرعت تئوری جت خروجی از دریچه
$C_{۱,۲,۳}$	ضرایب وابسته به هندسه شیار دریچه

ضریب تجربی برای ناهمواریهای سطحی	c
درصد بازشدگی اریفیس هواده	D_o
درصد بازشدگی دریچه اضطراری	E
عدد فرود جریان آب (Froude)	Fr
عدد فرود جریان در محل فشردگی آن	Fr_c
عدد فرود جریان در محل دریچه	Fr_g
بازشدگی نسبی دریچه اضطراری یا سرویس	G
شتاب ثقل (m/s^2)	g
ارتفاع پله در مرز جریان (m)	H
هد فشار در پایین دست شیر یا دریچه (m)	H_d
هد انرژی بالادست دریچه (m)	H_e
هد فشار بالادست دریچه (m)	H_p
هد کل (هد فشار + هد سرعت) در بالادست شیر یا دریچه (m)	H_t
هد فشار بخار آب (m)	H_v
ارتفاع جریان آب در محل فشردگی آن (m)	h_c
ارتفاع تونل در محل دریچه (m)	h_g
ارتفاع گذرگاه هوا در بالای سطح آب در محل دریچه (m)	h_{g-w}
ارتفاع تونل (m)	h_t
ارتفاع جریان آب در محل دریچه (m)	h_w
شاخص کاویتاسیون اولیه در لبه بالادست یا پایین دست شیر دریچه	K_{is}
شاخص کاویتاسیون در دریچه ها، شیرها و اریفیسها	K_t
طول مجرا (m)	L
بعد طولی در مدل (m)	L_m
بعد طولی در پروتوتیپ (m)	L_p
طول تونل در پایین دست دریچه (m)	L_t
جرم (kg)	m
عدد تجربی در ارتباط با برآورد ضریب هوادهی	m_i
عدد تجربی در ارتباط با برآورد ضریب هوادهی	n_i
عدد ثابت (معکوس توان تابع توزیع سرعت در جریان برشی)	n_v

فشار جریان (Pa)	P
فشار در هسته جت (Pa)	P_e
فشار جریان آزاد در صفحه پله (Pa)	P_h
۱) فشار جریان در مرجع (Pa)	P_o
۲) فشار مرجع در محل انفجار حباب کاویتاسیون (Pa)	
۳) فشار مرجع مایع پیرامون حباب کاویتاسیون (Pa)	
فشار جزئی گاز درون حباب کاویتاسیون (Pa)	P_p
فشار اشباع گاز درون حباب کاویتاسیون (Pa)	P_s
فشار در جریان آزاد بالادست محل شروع لایه مرزی (Pa)	P_u
فشار بخار آب (Pa)	P_v
دبی هوای ورودی از انتهای پایین دست تونل (m^3/s)	Q_{ad}
دبی هوا در جریان آب- هوا، دبی هوای وارد شده به جریان آب (m^3/s)	Q_{ae}
دبی جریان هوا در فضای بین سطح آزاد آب و سقف مجرا (m^3/s)	Q_{af}
دبی ماکزیمم جریان هوا در فضای بین سطح آب و سقف مجرا (m^3/s)	$(Q_{af})_{max}$
دبی جریان هوا در هواده (m^3/s)	Q_{air}
کل دبی هوا در مجرای بسته، کل تقاضای هوای جریان آب (m^3/s)	Q_{at}
دبی جریان هوا در هواده (m^3/s)	Q_{av}
۱) دبی جریان آب (m^3/s)	Q_w
۲) دبی آب در جریان مخلوط آب- هوا (m^3/s)	
دبی جریان آب در مجرا (m^3/s)	Q_{water}
دبی هوای بی بعد شده در هواده بوسیله عرض مجرا و هد انرژی بالادست	q_{av}
عدد رینولدز جریان (Reynolds)	Re
ثابت مهندسی گاز ($J/kg.K$)	R_g
ضریب تعیین کننده میزان اعتبار رابطه رگرسیون	R_p^r
شعاع حباب کاویتاسیون (m)	r
شعاع بحرانی حباب کاویتاسیون (m)	r_c
شعاع اولیه حباب کاویتاسیون (m)	r_o
نسبت سرعت متوسط هوا به آب	$\bar{r}$

S	(۱) بازشدگی نسبی دریچه
	(۲) درصد بازشدگی دریچه سرویس
Sc	مقیاس مدل
T	عرض سطح آزاد جریان آب (m)
T_k	دمای مطلق (K)
U	سرعت میانگین جریان (m/s)
U_{∞}	سرعت موضعی جریان آب- هوا در ارتفاع Y_{∞} (m/s)
u	سرعت موضعی در امتداد جریان (m/s)
V_H	سرعت جریان بلافاصله بالادست پله و در ارتفاع ماکزیمم آن (m/s)
V_b	سرعت جریان آزاد در صفحه پله (m/s)
V_c	سرعت در محل فشردگی جریان بعد از دریچه (m/s)
V_e	سرعت در هسته جت (m/s)
V_g	سرعت جریان آب در محل دریچه (m/s)
V_m	سرعت در مدل (m/s)
V_o	سرعت جریان در مرجع (m/s)
V_p	سرعت در پروتوتیپ (m/s)
V_r	نسبت سرعت در مدل و پروتوتیپ
V_u	سرعت جریان آزاد بالادست محل شروع لایه مرزی (m/s)
We_c	عدد وبر جریان (Weber) در محل فشردگی آن
x	فاصله از دریچه در مجرای بسته (m)
Y_{∞}	عمقی که غلظت هوا در آن برابر ۹۰٪ و مشخص کننده ضخامت جریان آب- هوا می باشد (m)
y_a	ارتفاع از سطح آب (m)
y_e	عمق موثر جریان آب - هوا (m)
β	ضریب هواگیری یا هوادهی جریان، نسبت دبی هوا به دبی آب
β_c	ضریب هوادهی محاسباتی
β_f	نسبت دبی هوای جاری در بالای سطح آب به دبی جریان آب در مجرای بسته
β_t	ضریب هوادهی آزمایشگاهی
Δp_a	اختلاف فشار اتمسفر و هوا در انتهای بالادست مجرای آب (Pa)

مدت زمان انفجار حباب کاویتاسیون (s)	Δt_e
ضخامت لایه مرزی (m)	δ
کشش سطحی (N/m)	ε
مقیاس مدل	λ_r
لزجت سینماتیکی (m^2/s)	ν
لزجت سینماتیکی آب (m^2/s)	ν_w
چگالی آب (kg/m^3)	ρ_w
چگالی هوا (kg/m^3)	ρ_a
(۱) شاخص کاویتاسیون جریان	σ
(۲) شاخص کاویتاسیون جریان بر روی سطح تخت	
شاخص کاویتاسیون بحرانی	σ_c
شاخص کاویتاسیون اولیه	σ_i
شاخص کاویتاسیون بر اساس سرعت میانگین در ارتفاع پله	σ_k
شاخص کاویتاسیون بر روی سطح منحنی	σ_r
شاخص کاویتاسیون اولیه در شیار دریچه	σ_{si}
شاخص کاویتاسیون برای زبری تک	σ_{sr}
شاخص کاویتاسیون بدون لایه مرزی	σ_u
کشش سطحی آب (N/m)	σ_w
ضریب افت کل در هواده	ξ_0

فصل اول:

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

کاربرد آب با توجه به پتانسیل بالای آن برای تولید انرژی، آبیاری مزارع و سایر مصارف دیگر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از منابع مهم برای تامین آب استفاده از جریان های سطحی می‌باشد. اما مشکل اصلی جریان های سطحی، عدم وجود آنها در تمام طول سال و به عبارتی توزیع غیریکنواخت زمانی آنها می باشد. براین اساس غالبا حجم عمده آب این نوع جریان‌ها در فصول خاصی از سال جاری بوده و در نتیجه برای استفاده بهینه از این منبع حیاتی در کل طول سال نیاز به سازه‌های کنترل و ذخیره سازی جریان همانند سدها و بندهای انحرافی می باشد. در این میان سدهای مخزنی یکی از مهمترین این سازه ها هستند که بسته به شرایط توپوگرافی و ارتفاع سد، مخزن این سازه ها قابلیت ذخیره حجم قابل توجهی از آب را دارا می باشند. بنابراین خطراتی که موجب تخریب این سازه ها می شود می تواند بر مناطق پائین دست تاثیر داشته باشد. بنابراین توجه به طراحی دقیق و مناسب آنها از اهمیت خاصی برخوردار است.

یکی از سازه های جنبی سدها که نیازمند طراحی دقیق با توجه به نقش ویژه آن در تخلیه سیلاب و کنترل آن و همچنین مصارف آبیاری می باشد، تونل‌های تخلیه کننده تحتانی هستند. این تونل‌ها به همراه سرریز قادر به تخلیه حجم آب سیلاب های محتمل در حوزه آبریز سد در مدت زمان مناسب می باشند. سازه های تخلیه کننده تحتانی شامل یک مجرای ورودی، تونل اصلی انتقال و سازه‌های کنترل و تنظیم جریان شامل دریچه ها و شیرها می باشند. علاوه بر آن سازه های جنبی دیگر نظیر تبدیل ها و شیرهای هواگیر نیز در این تخلیه کننده ها بر حسب نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مسائل مهم در سیستم های انتقال آب به ویژه در نیروگاه های برقی نحوه کنترل مقدار دبی حجمی عبوری از تونل آب بر می باشد. در صورتی که قطر مجرای آب بر کوچک باشد، از شیرهای کنترل و برای مجراهای بزرگ انتقال آب و تونل ها از دریچه های کشویی استفاده می‌گردد. برای انتخاب مناسب این دریچه ها باید شرایط دینامیکی جریان سیال در اطراف دریچه مشخص باشد تا بتوان با تغییر پارامترهای مختلف به طرح بهینه رسید.

همچنین نیاز به دانستن نیروهای هیدرودینامیکی وارده توسط سیال در زیر و اطراف این دریچه ها در بازشدگی های مختلف می باشد. یکی از مهمترین این نیروها، نیروی هیدرودینامیکی پائین کشنده (downpull) است. در هر حالت از قرارگیری دریچه، به دلیل مومنتم و سرعت زیاد جریان سیال، فشار در امتداد سطح زیرین دریچه و پشت دریچه کاهش می یابد. در حالیکه فشار در بالای دریچه تغییرات کمی دارد. نتیجه این گرادیان فشار، تولید نیروی هیدرودینامیکی پائین کشنده است که در تعیین ظرفیت سیستم بالابر دریچه نقش مهمی خواهد داشت. بنابراین پیش بینی صحیح آن از لحاظ ایمنی و اقتصادی دارای اهمیت خاصی است. جهت محاسبه این نیرو، باید به طریقی توزیع فشار و مولفه های سرعت در اطراف دریچه در بازشدگی های مختلف بدست آید. مساله مهم دیگری که درباره دریچه ها مطرح است، نحوه کنترل کاویتاسیون و حداقل نمودن فشارهای منفی ایجاد شده در پائین دست دریچه می باشد که به خصوص در تخلیه کننده های تحتانی نمود می یابد. فشارهای منفی در نهایت منجر به وارد شدن صدماتی به سازه پائین دست دریچه خواهند شد.

با پیشرفت علم و فناوری در زمینه طراحی و ساخت سازه های هیدرولیکی و بخصوص سازه های ذخیره آب، سدهای فراوانی با ارتفاع بیش از ۲۰۰ متر و دبی در واحد عرض سرریز بیش از ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه بر متر و دبی تخلیه کننده تحتانی ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه ساخته شده یا در حال ساخت می باشند. با افزایش دبی سرریزها و تخلیه کننده های تحتانی، خطراتی جدی این سازه ها را تهدید می کند که بروز فشارهای منفی در جریان نمونه ای از این خطرات می باشد. یکی از اثرات مخرب بروز فشارهای منفی، پدیده کاویتاسیون است. این پدیده در توربوماشین ها از مدت ها پیش شناخته شده بود. در سال ۱۸۹۵ برای نخستین بار در بررسی های انجام گرفته توسط Barnaby و Thornycroft پیرامون علل نقص فنی ناوشکن بریتانیایی به هنگام رسیدن آن به سرعت طراحی، پدیده کاویتاسیون شناسایی و مورد توجه قرار گرفت. ولی در زمینه سازه های هیدرولیکی بررسی و کنترل آن با تاخیر آغاز شد. وقوع کاویتاسیون باعث بروز صدمات و تخریب سطح سازه شده که با ادامه بهره برداری از سازه، دامنه این تخریب گسترش می یابد. مروری بر منابع اطلاعاتی نشان می دهد

که در سالهای گذشته موارد متعددی از وقوع کاویتاسیون که باعث تخریب سرریزها و تونل‌های تخلیه‌کننده سدهای مختلف و توقف بهره‌برداری از آنها در نقاط مختلف جهان گشته، گزارش شده است که از میان آنها می‌توان به سرریز سدهای Hoover، Yellowtail، Glen Canyon همگی واقع در امریکا و کارون یک یا شهید عباسپور در ایران و تونل تخلیه‌کننده سدهای Grand Coulee در امریکا Tarbela در پاکستان و Folsom در امریکا اشاره نمود. در نتیجه پدیده کاویتاسیون و مقابله با آن مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته و جنبه‌های مختلف این پدیده و روش‌های مقابله و کنترل و کاهش صدمات آن به عنوان موضوع جذاب در هیدرولیک سدها و سازه‌های متعلقه تبدیل گشته است.

امروزه طراحان سازه‌های هیدرولیکی هوادهی جریان را به عنوان راهی مطمئن، آسان و نسبتاً کم هزینه جهت کاهش و حذف خطر وقوع کاویتاسیون در ابنیه‌هایی که در معرض سرعت جریان بالا و افت فشار موضعی می‌باشند شناخته و مورد توجه قرار داده اند. در این میان یکی از بحث‌های مهم، میزان هوادهی و همچنین میزان هواگیری جریان آب در سرریزها و پایین‌دست دریچه‌های تونل تخلیه‌کننده تحتانی سدها می‌باشد. بررسی‌ها و تحقیقات پیرامون کاویتاسیون و مقابله با آن در سرریز سدها با پیشرفت‌های زیادی همراه بوده است. اما پیرامون تونل‌های تخلیه‌کننده علیرغم توجه محققان، به دلیل وجود عوامل مختلف تاثیرگذار بر جریان در این تونل‌ها و نادیده گرفتن برخی از این عوامل در تحقیقات مختلف، نتایج گزارش شده از دقت کافی برخوردار نبوده و بعضاً اختلافات قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر دارند. به همین دلیل انتظار می‌رود که تحقیق جهت دستیابی به روابط مطمئن و قابل استفاده در طراحی هوادهی در تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها، کماکان ادامه یابد.

۱-۲- اهداف و دستاوردهای پایان نامه

دریچه تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها به عنوان سازه‌های هیدرولیکی کنترل‌کننده جریان، در معرض نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی ناشی از عبور آب هستند که مقدار آنها

تابعی از شرایط عملکردی دریچه نظیر میزان بازشدگی، دبی و ارتفاع آب می باشد. دریچه تونل‌های تخلیه کننده تحتانی سدها تحت شرایط کاری بسیار سختی از نظر نیروهای وارده، ارتعاشات ناشی از بارهای هیدرودینامیکی نوسانی و عوارض ناشی از کاویتاسیون عمل می نمایند. با توجه به تجربه سدسازی در کشور و مشکلاتی که مشاوران در استفاده از روابط موجود در زمینه میزان هوادهی جریان در پایین دست دریچه‌ها دارند، در پایان نامه حاضر سعی شده است با مطالعه هواده‌ها در تونل‌های تخلیه کننده تحتانی سدها طبیعت موضوع دقیقتر مورد شناسایی قرار گیرد. در نتیجه به منظور بررسی کارکرد هواده‌ها، میزان هوادهی جریان از طریق آنها در پایین دست دریچه‌های تخلیه کننده مورد بررسی قرار گرفته است و ملاک این ارزیابی کارکرد، ضریب هوادهی (β) می باشد. بررسی های فوق بر مبنای آزمایش های صورت گرفته بر روی مدل تخلیه کننده چند سد مختلف، بنا نهاده شده است. این مطالعات با توجه به هندسه و عملکرد دریچه‌ها به سه بخش مجزا تفکیک شده است:

- ارزیابی میزان هوای پایین دست یک دریچه بدون افزایش سطح مقطع تونل در پایین دست.

- ارزیابی میزان هوای پایین دست یک دریچه با افزایش سطح مقطع تونل در پایین دست.

- ارزیابی میزان هوای بین دو دریچه سرویس و اضطراری در هنگام عملکرد دریچه اضطراری.

جهت نیل به این اهداف، نتایج اندازه گیری بر روی مدل های تخلیه کننده چند سد ساخته شده در آزمایشگاه بخش سازه های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو جمع آوری شده و نتایجی نیز از منابع خارجی به این مجموعه اضافه گشته است. به علت ناکافی بودن داده ها برای انجام تحلیل های مورد نظر و نیز نبودن داده هایی در زمینه هوادهی بین دو دریچه در زمان عملکرد دریچه اضطراری، اندازه گیری هایی در مدل تخلیه کننده سد ژاوه و گتوند علیا ساخته شده در آزمایشگاه بخش سازه های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب صورت گرفت. با استفاده از داده های آزمایشگاهی بدست آمده در حالات مختلف، روابط پیشنهادی محققان در ارتباط با پیش بینی میزان هوادهی ارزیابی

گشته‌اند. با توجه به اختلاف نتایج این روابط با یکدیگر و اختلاف آنها با نتایج آزمایشگاهی و نیز خطاهای بدست آمده، تلاش گردید تا با در نظر گرفتن هندسه و مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، روابط تجربی بر مبنای تقسیم‌بندی مطرح شده جهت پیش بینی میزان هوادهی ارائه گردد. با بررسی دقیق پدیده تلاش شده است تا روابط قابل قبول بر اساس اطلاعات حاضر ارائه گردد که می‌تواند مورد توجه محققان و طراحان سازه‌های هیدرولیکی قرار گیرد.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

مطالب ارائه شده در فصل‌های بعدی بر اساس اهداف مورد نظر در این پایان‌نامه تهیه و تنظیم شده‌اند. بنابراین در فصل دوم مطالبی پیرامون پدیده کاویتاسیون و موضوعات مرتبط با آن از جمله استفاده از هواده‌ها در سازه‌های هیدرولیکی، ارائه شده است. در فصل سوم، به بررسی موضوع هوادهی جریان پایین‌دست دریچه‌های تونل‌های تخلیه کننده تحتانی سدها پرداخته و روابط بدست‌آمده توسط محققان مختلف در زمینه میزان هوادهی ارائه شده و فرضیات و دیدگاه‌های مورد استفاده آنها در خصوص دستیابی به این روابط بررسی شده‌اند. در فصل چهارم بررسی‌های آزمایشگاهی و روش‌های اندازه‌گیری مورد توجه بوده و مدل‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق معرفی و نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از آنها ارائه شده است. همچنین روابط تحقیقات پیشین با این داده‌های تجربی ارزیابی شده‌اند. سپس در فصل پنجم، فرضیات و دیدگاه‌های بکار رفته و روش تحلیل داده‌ها و نتایج حاصل از آن ارائه گشته و در جهت رسیدن به اهداف مورد نظر این مجموعه، روابطی پیشنهاد شده‌اند. در فصل ششم ضمن جمع‌بندی نتایج بدست آمده جدید، با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و اطلاعات و نتایج بدست آمده، پیشنهادات و راهکارهایی برای ادامه تحقیقات در این زمینه بیان شده‌اند.

فصل دوم:

کاویتاسیون در سازه های هیدرولیکی

۲-۱- مقدمه ای بر مفهوم کاویتاسیون

معمولاً هنگامی که سرعت جریان در قسمتی از سازه هیدرولیکی از یک حد مجاز فراتر رود، آن سازه در معرض خسارت ناشی از خوردگی قرار می گیرد. اصولاً فرایند تبخیر در اثر کاهش فشار موضعی در دمای ثابت، حفره زایی (کاویتاسیون) نامیده می شود. برجستگی ها و ناصافی های سطوح بتنی که به هنگام ساخت یا پس از آن ایجاد می گردد، باعث ایجاد انحراف خطوط جریان و کاهش فشار در بعضی نقاط می گردد که چنانچه این کاهش فشار در ازای افزایش سرعت باشد، شرایط آستانه یا آغاز خوردگی پیش خواهد آمد. در این حالت فشار در ناحیه جدایی، کمتر از فشار بخار آب P_v شده و در این مناطق خلا ایجاد می شود. در نتیجه در دمای معمولی، تبخیر آب صورت گرفته و حباب های بخار آب تشکیل می شوند. این حباب ها با جریان، به سمت پائین دست رانده شده و هنگامی که به یک ناحیه پر فشار برسند، منفجر خواهند شد. در اثر این پدیده حفره های کوچکی بر سطح بتن بوجود می آید که خود این حفره ها به عنوان یک ناهموار ثانویه عمل نموده و باعث جدایی بیشتر جریان و در نهایت تخریب سازه می گردند.

در سازه های هیدرولیکی، آب حاوی انواع ناخالصی ها با اندازه های مختلف می باشد. ناخالصی ها بر شرایط شروع کاویتاسیون در جریان تاثیرگذار هستند. کاویتاسیون از نظر محتوای حفرات ایجاد شده به دو دسته گازدار (gaseous) و بخاردار (vaporous) تقسیم می شود. حباب با حل شدن گاز یا انقباض بخار درون آن از بین می رود. با عنایت به موارد فوق می توان نتیجه گرفت که کاویتاسیون تمامی مراحل ایجاد، رشد و انفجار حباب ها را در بر می گیرد. با توجه به وسعت تعریف ارائه شده می توان نتیجه گرفت که کاویتاسیون پدیده ای است که در اثر کاهش فشار در مایع، البته به مدت کافی، اتفاق افتاده و لذا قابل کنترل می باشد. همچنین پدیده فوق با آشکار شدن و اضمحلال حباب های درون مایع مرتبط بوده و لذا پدیده ای دینامیکی می باشد. در سازه های هیدرولیکی محدوده وقوع کاویتاسیون در جریان به ندرت قابل مشاهده می باشد و در نتیجه آثار آن بیشتر از خود پدیده شناخته شده است. صورت های مختلف ظهور کاویتاسیون به چشم انسان یکسان نیستند و اساساً

کاویتاسیون پدیده‌ای است که در جریان‌هایی با سرعت بالا اتفاق می‌افتد و تغییرات ناشی از آن بسیار سریع روی می‌دهد و لذا قابل تشخیص برای چشم انسان یا دوربین‌های معمولی نمی‌باشد.

۲-۲- اثرات کاویتاسیون

کاویتاسیون از آن جهت که تاثیرات مهمی بر شرایط هیدرودینامیکی جریان می‌گذارد و همچنین اثرات جنبی آن با تخریب مرزهای صلب جریان همراه است، حائز اهمیت می‌باشد. معمولاً در سازه‌های هیدرولیکی، به علت بروز فشارهای منفی در جریان، همچون سرریز سدها (spillway)، دریچه (gate) و شیار (gate slot)، بلوک آرام‌کننده (baffle pier)، ورودی مجراها (conduit entrance)، خم مجراها (bend)، تونل‌ها (tunnel)، لوله‌ها (pipeline) و غیره، وقوع پدیده کاویتاسیون مورد انتظار می‌باشد.

تاثیرات مختلف هیدرودینامیکی کاویتاسیون بر جریان در نتیجه اختلال در پیوستگی مایع بر اثر ایجاد حباب‌ها می‌باشد. جابجایی مایع با توجه به وجود این حباب‌ها به تغییر شکل جریان و نیز اندرکنش دینامیکی مایع با مرزهایش می‌گردد. معمولاً جدایی جریان از مرز بر اثر کاویتاسیون باعث کاهش یا محدود شدن نیروهای وارد بر مایع از طرف جداره‌ها می‌شود.

در اثر وقوع کاویتاسیون مواد سازنده سطح سازه از آن جدا شده و مرزهای صلب جریان تخریب می‌گردند. تجربه نشان داده است که کاویتاسیون می‌تواند سطوح ساخته شده از انواع مختلف مصالح را تخریب نماید. فلزات، لاستیک و پلاستیک، شیشه، کوارتز و بتن از جمله مواد مستعد خرابی در برابر کاویتاسیون هستند.

ایجاد صدا و ارتعاش از جمله دیگر اثرات مهم کاویتاسیون می‌باشند. تجربه نشان داده است که بر اثر کاویتاسیون صدای قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌شود. اهمیت تاثیر صدای ایجاد شده به نوع و محل تاسیسات سازه‌ای بستگی دارد. همچنین از آنجا که کاویتاسیون ذاتاً پدیده‌ای غیر دائمی و

دربرگیرنده نیروهای نوسانی می‌باشد، چنانچه فرکانس این نوسان ها با فرکانس طبیعی سازه یکسان شود، پدیده تشدید روی خواهد داد و باعث ارتعاش و در نتیجه خرابی سازه می‌گردد.

۲-۳- شاخص کاویتاسیون

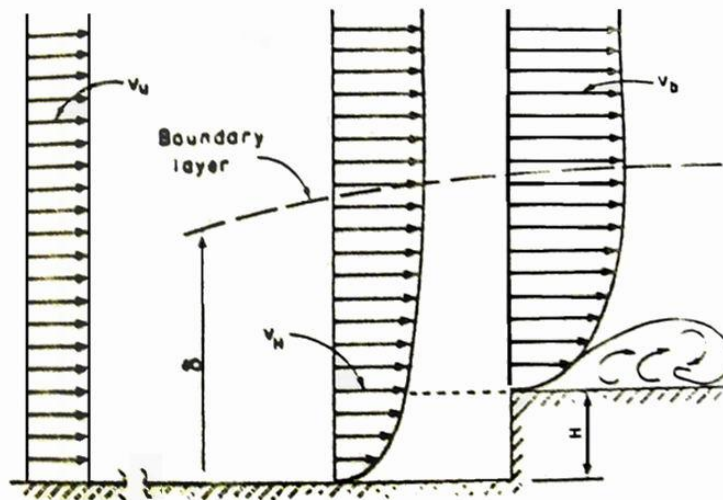
بررسی وقوع کاویتاسیون به کمیت قابل محاسبه‌ای که دربرگیرنده شرایط دینامیکی جریان باشد نیاز دارد. این پارامتر باید به ازای شرایط دینامیکی مشخص امکان پیش بینی وقوع پدیده را دارا بوده و نیز باید معرف شرایط جریان متناسب با مراحل مختلف کاویتاسیون (عدم وقوع، شروع و مراحل مختلف پیشرفت) باشد. پیشتر محققان پتانسیل وقوع کاویتاسیون را با توجه به سرعت جریان تعیین می‌نمودند. به عنوان مثال Eisenhaver (1987) سرعت بحرانی جریان عبوری از سرریزها (سرعتی که در آن کاویتاسیون آغاز می‌گردد) را بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه توصیه می‌نمود که بستگی به نحوه اجرا و کیفیت بتن و مقاومت آن دارد. با توجه به بررسی‌های وی، سرعت بحرانی با افزایش مقاومت بتن، افزایش می‌یابد [۶]. با توجه به شرایط مختلف وقوع کاویتاسیون، تعیین دقیق سرعت بحرانی مشکل و از طرفی در برگیرنده تمامی شرایط لازم برای وقوع این پدیده نمی‌باشد. به همین دلیل پارامتری که در برگیرنده ویژگی‌های تاثیرگذار جریان باشد، به صورت زیر تعریف گردید که آن را شاخص کاویتاسیون (cavitation index) می‌نامند:

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho_w V_o^2 / 2} \quad (1-2)$$

در این رابطه σ شاخص کاویتاسیون جریان، P_o و V_o به ترتیب معرف فشار و سرعت جریان در مرجع، P_v فشار بخار آب (تابعی از فشار اتمسفر و دما) و ρ_w چگالی آب می‌باشند.

موقعیت انتخابی نقطه مرجع از جمله مسائل مهم می‌باشد. برای مثال برای یک پله رو به جریان که در لایه مرزی قرار دارد، تعریف شاخص کاویتاسیون بستگی به موقعیت انتخابی نقطه مرجع دارد. با توجه به شکل (۱-۲) می‌توان موقعیت‌های متفاوتی برای مرجع در نظر گرفت. برای مرجعی

واقع در فاصله دور در بالادست و خارج از محدوده تاثیر لایه مرزی، سرعت V_u و فشار P_u (فشار در جریان آزاد در بالادست محل شروع لایه مرزی) را باید در رابطه (۱-۲) قرار داد. به همین ترتیب برای مرجعی بلافاصله بالادست پله و در ارتفاع ماکزیمم پله، از V_H و در خارج لایه مرزی و در صفحه پله از V_b و برای فشار در این دو حالت از P_h (فشار جریان آزاد در صفحه پله) باید استفاده نمود.



شکل (۱-۲): موقعیتهای مختلف مرجع و پروفیلهای سرعت مربوطه در جریان عبوری از پله رو به جریان برای جریانهای برشی (shear flows)، شکل های متعددی از شاخص کاویتاسیون ارائه شده است. هر یک از این روابط بر پایه شرایط مرجعی که پارامترهای آن به سادگی قابل اندازه گیری می باشند، استوار هستند. به عنوان نمونه می توان به شاخص کاویتاسیون در جت مستغرق به فرم زیر اشاره نمود:

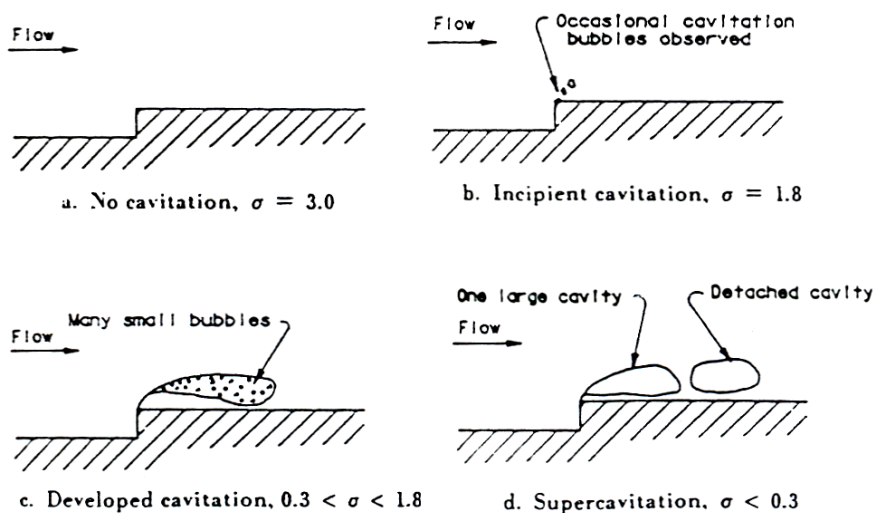
$$\sigma_j = \frac{P_e - P_v}{\rho_w V_e^2 / 2} \quad (2-2)$$

که در آن σ_j شاخص کاویتاسیون در جت مستغرق، P_e فشار در هسته جت و V_e سرعت در هسته جت می باشند. در دریچه ها، شیرها و اریفیس ها به علت آنکه تعیین مرجع مناسب برای جریان و سرعت دشوار می باشد، شکل دیگری از شاخص کاویتاسیون (K_t) بصورت زیر توسط Ball (1957) بر

حسب H_d هد فشار در پایین دست شیر یا دریچه، H_t هد کل (هد فشار + هد سرعت) در بالادست شیر یا دریچه و H_v هد فشار بخار آب پیشنهاد شده است [۸].

$$K_t = \frac{H_d - H_v}{H_t - H_d} \quad (۳-۲)$$

البته شاخص کاویتاسیون، در هر شرایطی قادر به تشریح تمام پیچیدگی‌های پدیده کاویتاسیون نمی‌باشد، ولی به عنوان پارامتری سودمند برای تشخیص وضعیت کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال، برای جریان عبوری از یک پله واقع در جریان، مراحل مختلف کاویتاسیون با توجه به شاخص کاویتاسیون (بر اساس رابطه ۲-۱) و مرجعی در بالادست دور) در شکل (۲-۲) ارائه شده است [۸]. با توجه به توضیحات فوق، کاویتاسیون هنگامی اتفاق می‌افتد که شاخص کاویتاسیون جریان (σ) از حد بحرانی کوچکتر گردد. این مقدار بحرانی را شاخص کاویتاسیون بحرانی (σ_c) می‌نامند که بیانگر شرایط وقوع کاویتاسیون اولیه می‌باشد و به همین دلیل می‌توان آن را شاخص کاویتاسیون اولیه (σ_i) نیز نامید.



شکل (۲-۲): مراحل پیشرفت کاویتاسیون در جریان عبوری از پله رو به جریان

۲-۴- اهمیت نوسانات فشار و تاثیر هوادهی

مطالعات نشان می دهند که به دلیل آشفتگی جریان در سرتاسر سرریزهای آزاد و دریچه‌های تحتانی، نوسانات جریان شرایط مناسبی را برای وقوع کاویتاسیون فراهم می آورند. نوسانات فشار همچنین ممکن است باعث ارتعاش و خستگی مصالح شوند. صدمات ناشی از نوسانات فشار در سازه‌های مختلفی همچون سرریزها، حوضچه های آرامش و در سازه های همراه با جریان های چرخشی بسیار جدی بوده است.

بر اساس مطالعات انجام گرفته، کاویتاسیون هنگامی رخ می‌دهد که فشار لحظه‌ای جریان که برابر است با مجموع فشار میانگین و نوسانات لحظه‌ای آن، کمتر از فشار بخار آب گردد. Narayanan (1984) نشان داد که حتی در شرایط بالا بودن میانگین فشار جریان از فشار بخار آب، شدت نوسانات فشار می‌تواند شرایط مناسب برای وقوع کاویتاسیون را ایجاد نماید. (Lopardo 1982) و همکارانش با بررسی مدل و پروتوتیپ یک حوضچه آرامش با بلوک های آرام‌کننده، نشان دادند که نوسانات شدید فشار خطر وقوع کاویتاسیون را افزایش می‌دهند. آنها نوسانات اندازه گیری شده در یک حوضچه آرامش و مدل فرودی آن با مقیاس ۵۰:۱ را مقایسه و احتمال وقوع کاویتاسیون در نمونه اصلی با

اندازه‌های مدل را مقایسه نموده و نشان دادند که اگر فشار آبی برای بیش از ۰/۲٪ زمانی، زیر فشار بخار مایع افتد، احتمال وقوع کاویتاسیون ممکن می باشد.

نوسانات فشار ماهیتی تصادفی دارند و تغییرات فشار در زمان کوتاهی رخ می‌دهند. حباب‌هایی که در این مدت زمان فرصت ایجاد داشته‌اند، ممکن است در همان محل شکل‌گیری منفجر شوند و موجب تشدید و تسریع روند تخریب گردند و یا ممکن است به همراه جریان به نواحی با فشار بالا منتقل گردند و منفجر شوند. قابل ذکر است که مدت زمانی که فشار لحظه‌ای جریان کمتر از فشار بخار آب می‌گردد، باید از مدت زمان بحرانی لازم برای تشکیل حباب های کاویتاسیون بیشتر باشد. در غیر این صورت حباب ها فرصت تشکیل نخواهند داشت و شرایط وقوع کاویتاسیون مهیا نمی‌گردد.

۲-۵- تخریب در اثر کاویتاسیون

عوامل مکانیکی متعددی در تخریب سازه‌های هیدرولیکی در اثر کاویتاسیون دخیل هستند. بطور مثال هنگامی که کاویتاسیون بعلت ناهمواریهای سطحی سازه اتفاق می‌افتد، تخریب سطح در انتهای پایین‌دست توده حباب های کاویتاسیون به علت وارد آمدن فشارهای بالا بر سطح در اثر انفجار این حباب ها، آغاز می‌گردد. با ادامه بهره‌برداری از سازه، تشکیل حباب های کاویتاسیون و انفجار آنها به طور مرتب تکرار می‌شود. در اثر فشارهای وارده بر سطح، تخریب کاویتاسیون ادامه پیدا می‌کند و به تدریج شتاب می‌گیرد و بعد از مدتی حفره‌های بزرگی بر روی سطح بتن و فلز ایجاد می‌گردد که در ادامه بزرگتر می‌شوند. جریان سریع فشار بالایی در ترک های ریز پیرامون سنگ‌دانه‌های بتن و یا در ترک های حرارتی ایجاد می‌کند. اختلاف فشار بین منطقه برخورد و پیرامون آن باعث جدا شدن سنگ‌دانه‌ها و یا حتی کنده شدن تکه‌های بزرگ بتن از سطح می‌گردد. البته این مرحله از تخریب به فرسایش (erosion) موسوم است، در حالیکه به جدا شدن مواد از سطح بر اثر کاویتاسیون، فرسایش

نمی‌گویند. اگر فرسایش بوسیله جریان سریع ادامه پیدا کند، امکان دارد آرماتورها آشکار شوند و به ارتعاش درآیند که به تخریب مکانیکی سطح انجامد.

عوامل مختلفی که تعیین کننده امکان وقوع و وسعت تخریب سطح می‌باشند، شامل علت وقوع کاویتاسیون، محل تخریب، شدت کاویتاسیون، سرعت جریان، میزان هوای موجود در آب، مقاومت سطح در برابر تخریب و مدت زمان قرارگیری سطح در معرض عوامل تخریب می‌باشند.

۲-۶- خسارات کاویتاسیون در سرریز سد کارون یک (شهید عباسپور)

سد کارون یک (شهید عباسپور) یک سد قوسی با ارتفاع ۲۰۰ متر و حجم مخزن ۲/۹ میلیارد متر مکعب، در سال ۱۳۵۶ روی رودخانه کارون احداث شد. دبی تخلیه کل سرریز ۱۶۵۰ متر مکعب بر ثانیه است. پس از آبگیری مخزن و شروع بارندگی‌ها در سال ۱۳۵۶ و استفاده از سرریز به منظور تخلیه سیل، آثار اولین خوردگی در سطح سرریز مخصوصاً در قسمت‌های انتهایی شوت و حتی در سطح باکت سرریز نیز ظاهر شد. با ادامه بهره برداری از سرریز کار پیشروی این خوردگی‌ها به جایی رسید که در گذرگاه شماره ۱ سمت چپ سرریز، حفره‌ای به عرض ۱۸ متر یعنی تقریباً تمام عرض سرریز و طول ۱ متر بوجود آمد، به طوری که علاوه بر بتن کف سرریز کلیه آرماتورهای کف نیز گسسته شد و حتی سنگ کف زیر بتن سرریز حدود ۲۰ متر و عمق ۵ متر تخریب و از جا کنده شد. میزان جریانی که از این گذرگاه عبور نموده بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ متر مکعب در ثانیه بوده که در مقایسه با دبی حداکثر بسیار کم می‌باشد (وزارت نیرو، خرداد ۱۳۶۳). تصاویری از خسارات کاویتاسیون در سرریز سد کارون یک در شکل (۲-۳) نشان داده شده است [۱۶].



شکل (۲-۳): خسارت کاویتاسیون در سرریز سد کارون یک (شهید عباسپور)

۲-۷- روش های کنترل کاویتاسیون

وقتی شرایط جریان در سازه به گونه‌ای باشد که شاخص کاویتاسیون هر نقطه از جریان (σ) از شاخص کاویتاسیون اولیه یا شاخص شروع کاویتاسیون (σ_i) کمتر گردد، در آن محل کاویتاسیون رخ خواهد داد. در طراحی و اجرای سازه‌های هیدرولیکی برای دست یافتن به طرحی که کاویتاسیون در آن اتفاق نیفتد، فشار و سرعت در نقاط مختلف جریان باید به اندازه‌ای باشد که σ بزرگتر از σ_i گردد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که اولین انتخاب یک طراح در این راستا، بالا بردن فشار و کاهش سرعت جریان است. انتخابی دیگر بکارگیری شکل‌هایی در سازه است که دارای σ_i کوچکتری باشند. البته در مواردی با توجه به دشوار بودن کنترل سرعت و فشار، شرایط وقوع کاویتاسیون در جریان وجود دارد که در این حالت سعی می‌شود به طرق مختلف از آثار مخرب کاویتاسیون کاست یا از وقوع آن جلوگیری نمود. تخریب کاویتاسیون وابسته به زمان است، در نتیجه باید از مدت زمانی که سازه تحت شرایط وقوع کاویتاسیون قرار می‌گیرد کاست. به طور مثال دریچه‌های تحت فشار با هد بالا نباید در بازشدگی‌های کم به مدت طولانی مورد بهره‌برداری قرار گیرند. با توجه به توضیحات

فوق، روش های گوناگون کنترل کاویتاسیون در سازه های هیدرولیکی مختلف در زیر ارائه شده اند. لازم به ذکر است که برای کنترل کاویتاسیون ممکن است ترکیبی از روش های مختلف استفاده گردد:

- با ارائه طرح هیدرولیکی مناسب از جداسازی جریان از مرزهای صلب جلوگیری نمود. باید از تغییرات شیب و انحنا نسبتاً تند و ناگهانی در سرریزها اجتناب کرد. پایه هایی که گذرگاه جریان را به چند قسمت تقسیم می کنند باید به صورت تدریجی باریک شوند تا از جدا شدن جریان از روی آنها جلوگیری گردد. شرایط بروز فشارهای پایین در پایین دست شیار درپچه ها را می توان با ایجاد پله ای در لبه پایین دست شیار و بازگشت تدریجی به امتداد اصلی مجرا تا حدی کنترل نمود.

- با بالا بردن کیفیت ساخت بستر سرریز و جداره های مجرا از به وجود آمدن ناهمواری ها در سطح باید جلوگیری نمود. هر چند دقت در طرح و اجرای سازه احتمال وقوع کاویتاسیون را کاهش می دهد ولی آن را کاملاً از بین نمی برد. برآمدگی ها ممکن است بعدها در سطح سازه به وجود آیند. به طور مثال انقباض و انبساط بتن باعث بالا آمدن سطح بتن در محل مفاصل می شود و یا رسوبات گچی بتدریج باعث ایجاد ناهمواری ها بر سطح سازه خواهند شد.

- بالا بردن کیفیت بتن (بتن با مقاومت بالا) باعث افزایش سرعت بحرانی می شود ولی احتمال وقوع کاویتاسیون از بین نخواهد رفت.

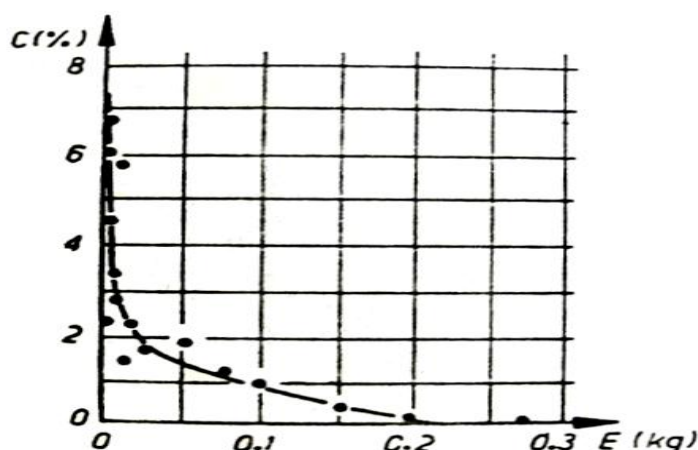
- ساختن و یا پوشاندن بستر از مواد مقاوم در مقابل تخریب کاویتاسیون مانند فولاد ضدزنگ، بتن الیافی، بتن پلیمری و یا لاستیک فشرده روش دیگری می باشد که ممکن است اقتصادی و یا حتی عملی نباشد. Wagner در سال ۱۹۶۷ اظهار نمود که مقاوت فولاد ضدزنگ و فولاد حاوی نیکل به میزان زیاد مقاومت نسبتاً بالاتری در برابر تخریب کاویتاسیون نشان می دهند، درحالی که تخریب در اثر کاویتاسیون بر روی فولاد ضدزنگ در پایین دست درپچه های تنظیمی سد Dartmonth اتفاق افتاده است.

- با دور نمودن عمل درونفجاری حباب های کاویتاسیون از مرزهای صلب، از تخریب سطح جلوگیری نمود.

- با بررسی و تغییر هندسه سازه می توان در سرریزها شاخص کاویتاسیون را کنترل نمود. بدین منظور می توان از روش های طراحی سرریز با شاخص کاویتاسیون ثابت و یا سرریز با فشار کنترل شده استفاده نمود که با تغییر عرض و یا انحنا در طول سرریز قابل دستیابی می باشد. به عنوان مثال توصیه می گردد تا سطح مقطع مجرای تونل های تخلیه کننده پایین دست دریچه کوچکتر گردد تا از بروز فشارهای منفی جلوگیری گردد.

- روش مناسب دیگر وارد کردن هوا به جریان است که بر مبنای تحقیق Peterka بنا نهاده شده که در سال ۱۹۵۳ نشان داد که ۶ تا ۸ درصد غلظت هوا در آب برای جلوگیری از وقوع کاویتاسیون کافی می باشد. تحت شرایطی که امکان وقوع کاویتاسیون در جریان وجود دارد، عمل هوادهی به جریان نسبت به سایر روش های کنترل کاویتاسیون موثرتر، اقتصادی تر و آسان تر است و لذا با توجه به تجربیات مثبت بکارگیری هوادهای در سدهای مختلف و اقتصادی بودن آنها، این روش بهترین راه حل برای کنترل کاویتاسیون در سازه های هیدرولیکی شناخته شده و توصیه می گردد [۹].

Peterka (1953) نشان داد که وجود میزان کمی هوا در نزدیکی سطح بتن تا حد زیادی باعث کاهش اثر تخریبی کاویتاسیون می گردد. وی با انجام آزمایش هایی بر روی بتن در ونتوری با پریودهای ۲ ساعت و سرعت هایی تا حد ۳۵ متر بر ثانیه، نمودار افت وزنی نمونه های بتن را بر حسب غلظت هوا به صورت شکل (۲-۴) بدست آورد. با توجه به این نمودار، غلظت هوای حدود ۱٪ تا ۲٪ باعث کاهش قابل ملاحظه تخریب کاویتاسیون می شود و برای غلظت هوای ۶٪ تا ۸٪ در نزدیکی کف جریان، تخریب متوقف می گردد. وی همچنین نتیجه گرفت که با غلظت هوای ۷/۴٪ در جریانی به سرعت ۳۰/۵ متر بر ثانیه از تخریب کاویتاسیون بتن با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۱۷ مگاپاسکال، جلوگیری می شود [۹].



شکل (۲-۴) : نمودار افت وزنی نمونه‌های بتن بر حسب غلظت هوا

Galperin (1971) و همکارانش نشان دادند که غلظت هوای مورد نیاز برای محافظت سطح به مقاومت بتن و سرعت جریان بستگی دارد. Semenkov & Lentiaev (1973) نتیجه گرفتند که میزان هوای مورد نیاز با کاهش مقاومت بتن، افزایش می‌یابد. آنها غلظت هوای ۳٪ را برای بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال و غلظت هوای ۱۰٪ را برای بتن با مقاومت ۱۰ مگاپاسکال بدست آوردند. Russel & Sheehan (1974) برای تخلیه‌کننده‌ها با مجاری بسته، غلظت هوای ۳٪ تا ۵٪ را با سرعت‌هایی تا حد ۴۶ متر بر ثانیه برای توقف تخریب کاویتاسیون ضروری دانستند. Ball (1976) نشان داد که سرعت ماکزیمم مجاز که باعث وقوع کاویتاسیون نمی‌گردد، به اندازه و فواصل ناهمواری‌های سطحی بستگی دارد. وجود مقدار کافی هوا در نزدیکی کف جریان، این تاثیر زبری سطح را از بین می‌برد. نحوه توزیع حباب هوا در مجاورت مرزهای جریان برای جلوگیری از تخریب کاویتاسیون مهم است. Rutschmann و Volkart (1984) اظهار داشتند که غلظت هوای میانگین در نزدیکی کف و دیوارهای جریان در طراحی سازه‌های هیدرولیکی، معیاری لازم ولی ناکافی از نظر تئوری می‌باشد.

فصل سوم:

هوادهی در تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها

۳-۱- تعریف

اگرچه اختلاف زیاد وزن مخصوص آب و هوا سبب ایجاد مرز مشترک مشخصی بین آنها می‌شود، ولی در سازه‌های هیدرولیکی شرایطی حاصل می‌شود که باعث اختلاط آب و هوا در این مرز می‌گردد. هوا بصورت حباب‌های هوا در اثر فرآیند آشفته‌گی در مرز مشترک، وارد جریان می‌شود و سپس در اثر فرآیند انتقال ممنتوم در جریان پخش می‌شوند. عمل ورود هوا به درون آب را هواگیری می‌نامند. هواگیری در سازه‌های هیدرولیکی در نتیجه عواملی همچون سرعت بالای جریان فوق بحرانی که به دلیل مکانیزم برش، هوا را به داخل جریان وارد می‌کند و پرش هیدرولیکی و جریان چرخشی موضعی که بر اثر برخورد جت به سطح آب تولید می‌شوند به وقوع می‌پیوندد. هواگیری همچنین در محل‌هایی که فشار منفی در جریان ایجاد می‌شود، در صورت وجود منبع تامین هوا قابل مشاهده می‌باشد. هواگیری در سازه‌های آبگیر اغلب بر اثر جریان گردابی روی می‌دهد.

۳-۲- انواع هواگیری در سازه‌های هیدرولیکی

هواگیری توسط آب می‌تواند بصورت طبیعی از سطح آزاد و یا به صورت مصنوعی رخ دهد. خودهواگیری در جریان‌های سریع در کانال‌های باز و در پرش‌های هیدرولیکی، نمونه‌هایی از هواگیری طبیعی از سطح آزاد هستند. هوادهی مصنوعی در تصفیه‌خانه‌های آب برای بالا بردن کیفیت آب و در سرریزها و تونل‌های تخلیه‌کننده سدها برای جلوگیری از وقوع کاویتاسیون استفاده می‌شود. هوا ممکن است بصورت موضعی یا پیوسته در امتداد مرز مشترک آب و هوا وارد جریان شود. نمونه‌ای از هواگیری موضعی، هواگیری توسط جت‌های آب برخوردی (plunging jets) می‌باشد که در آنها حباب‌های هوا بصورت موضعی در محل برخورد جت با آب وارد حجم آب می‌شوند. هواگیری سطحی یا پیوسته به فرآیند ورود هوا در امتداد مرز مشترک آب و هوا گفته می‌شود و در جریان‌های عبوری از سرریزها و شوت‌ها و در سطح جت‌های سریع آب که به اتمسفر تخلیه می‌شوند، روی می‌دهد. مکانیزم ورود حباب‌های هوا به درون جریان در هواگیری موضعی و سطحی با هم اختلاف دارند. در

مواردی که هواگیری جریان در سازه‌های هیدرولیکی به دلایل مختلف همچون جلوگیری از بروز فشارهای منفی در سرریزها و شوت‌ها و مجاری بسته ضرورت دارد، هواده (aerator) به سیستم سازه اضافه می‌گردد. در تصفیه‌خانه‌ها و رودخانه‌ها نیز برای بالا بردن کیفیت آب و افزایش مقدار اکسیژن موجود در آن، از هواده‌ها به شکل های مختلف استفاده می‌شود. این حالت هواگیری که از طریق هواده‌ها انجام می‌گیرد را هواده‌ی مصنوعی می‌نامند.

جریان مخلوط آب و هوا در سازه‌های هیدرولیکی را می‌توان در سه حالت جریان آب-هوا در مجاری باز، مجاری بسته و جریان سقوط آزاد (free fall) بررسی و مورد ارزیابی قرار داد. هواگیری جریان در دو حالت نخست، بر حسب نوع سازه، شرایط جریان و عوامل تاثیرگذار بر هواگیری به انواع مختلف زیر تقسیم‌بندی می‌گردند:

❖ در مجاری باز شامل هواگیری سطحی در جریان های سریع همچون سرریزها و شوت ها با شیب تند، هواگیری در آبراهه‌ها و کانال های با شیب ملایم، هواگیری موضعی در جت های برخوردی و پرش های هیدرولیکی و پایین دست بلوک‌های آرام‌کننده.

❖ در مجاری بسته شامل هواگیری در تونل های نیمه پر و یا مجاری که با پرش هیدرولیکی پر شوند و هواگیری در جریان عبوری از سازه‌های کنترل همچون دریچه‌ها.

به دسته دوم می‌توان هواگیری جریان در لوله‌ها و سیفون ها را که به علت طول زیاد توجه خاصی لازم دارند و هواگیری جریان در شفت های عمودی را که به علت وجود حالات مختلف جریان پیچیدگی ها و مشکلات خاصی دارند، جداگانه به موارد فوق اضافه نمود.

۳-۳- تاثیرات هواده‌ی بر جریان

اندركنش جریان آب در سازه‌های هیدرولیکی با هوای پیرامون در برخی موارد مفید و در برخی مضر و جلوگیری یا حذف آن هزینه‌بر است. عملکرد اکثر سازه‌های هیدرولیکی بر اثر هواگیری تغییر می‌کند. توجه به تاثیر هوای وارد شده بر جریان برای تامین عملکرد مطمئن سازه‌ها، ضروری

می‌باشد. از ویژگی های سودمند هواگیری جریان، جلوگیری از بروز فشارهای منفی در جریان و در نتیجه جلوگیری از وقوع کاویتاسیون و صدمات ناشی از آن، عملکرد سیفون ها، غنی شدن آب از اکسیژن و کاهش فشار اثر جت های برخوردی می‌باشند. از مضرات هواگیری نیز می‌توان به تولید پاکت های هوا در مجاری بسته که باعث ایجاد جریانهای ضرب‌آبی مخرب می‌شوند، کاهش ظرفیت تخلیه مجرا و اشباع آب از هوا که برای ماهی ها زیان‌آور است، اشاره نمود.

در یک جمع‌بندی می‌توان تاثیر ورود هوا به جریان در سازه‌های هیدرولیکی را به مواردی همچون تغییر مشخصات سیال (چگالی و خاصیت ارتجاعی)، تغییر ساختار آشفستگی جریان، جلوگیری از بروز فشارهای منفی و کاویتاسیون در جریان، افزایش فشار میانگین جریان و نیز کاهش شدت نوسانات فشار و تغییر ساختار میدان فشار جریان و تعدیل آن، القای ممنوم عمودی به جریان در اثر شناوری حباب های هوا که می تواند تاثیر مهمی بر میدان جریان گذارد، تورم جریان و افزایش عمق آب در مجاری، کاهش تنش برشی بستر و اصطکاک بین جریان و کف در سرریزها و شوت ها و در نتیجه افزایش سرعت جریان، تغییر دبی و توزیع فشار در مجاری بسته، ایجاد جریان های ضرب‌آبی در مجاری بسته در صورت مسدود شدن مجرا، غنی شدن آب از اکسیژن، افزایش تراکم‌پذیری سیال و کاهش فشار ضربه میکروجت ها و ماکروجت ها تعمیم داد. البته بعلت پیچیدگی های جریان آب-هوا، جمع‌بندی فوق در خصوص تاثیرات هواگیری بر جریان حتماً کامل نمی‌باشد و ورود هوا به جریان می‌تواند تاثیرات مختلف دیگری بر جریان در سازه‌های هیدرولیکی مختلف داشته باشد که مطمئناً راه را برای ادامه تحقیقات باز می‌گذارد.

۳-۴- هوادهی جریان برای پیشگیری از کاویتاسیون

در صورت وجود هوا در داخل جریان آب، کاویتاسیون به تعویق می‌افتد. نظریه‌های متفاوتی برای توضیح چگونگی توقف کاویتاسیون توسط هوای موجود در جریان ارائه شده است.

دو نظریه قدیمی که پیشتر برای تشریح مکانیزم توقف کاویتاسیون ارائه شده بود به شرح زیر است:

۱= حباب های موجود در آب مانند بالشتکی در حد فاصل جداره و جریان قرار گرفته و باعث توقف کاویتاسیون می شود (Bradley1945).

۲- ورود هوا، فشار اتمسفر را همراه خود به داخل جریان منتقل کرده و باعث می شود نرخ و مقدار کاهش فشار موضعی کمتر شود.

بر اساس نظریه های جدید، وجود بالشتک های هوا در داخل جریان آب می تواند سبب استهلاک نیروی ناشی از انفجار حباب های بخار آب شوند. همچنین وجود بالشتک های هوا می توانند مسیر نیروی ناشی از انفجار حباب های بخار آب را از جداره، منحرف نموده و یا آن را به تعویق اندازد. نظریه دیگری که برای کاهش خسارت کاویتاسیون به علت هوادهی جریان ارائه می شود کاهش سرعت صوت در جریان در اثر وجود هوا است. بصورتیکه قبلاً توضیح داده شد، مقدار سرعت موج فشاری که باعث انتقال نیروی فشاری به اطراف می شود متناسب با سرعت صوت در محیط می باشد. با افزایش هوا در داخل جریان، سرعت صوت به شدت کاهش می یابد و بدین ترتیب شدت نیروی ناشی از کاویتاسیون کاهش می یابد.

محققان دیگر همچون Russel & Sheehan (1974) معتقد بودند که حضور هوا در میدان سیال باعث مهار و کم رنگ شدن انفجار حباب ها و نیز کاهش فشارهای ناشی از آن می گردد. همچنین حضور هوا در آب باعث کاهش سرعت امواج شوک و شدت برخورد این موج ها بر سطح سازه می گردد. علاوه بر این، آنها تاکید داشتند که حضور حباب های هوا در جریان می تواند بر مکانیزم انفجار آنها تاثیرگذار بوده و جت های تولید شده را به دور از مرز صلب منحرف کند.

نظریه کاهش خسارت های ناشی از کاویتاسیون با هوادهی جریان به علت کاهش سرعت صوت در مخلوط آب و هوا نسبت به دیگر نظریه های ارائه شده منطقی تر و از اعتبار بیشتری برخوردار

می‌باشد (Falvey 1990). لازم به توضیح است که مکانیزم کاویتاسیون و طبیعتا مکانیزم پیشگیری از آن توسط هوادهی جریان بسیار پیچیده بوده و نظریات ذکر شده تصاویر ساده‌ای است که از مکانیزم پیچیده این پدیده ارائه شده است.

در سال ۱۹۹۷، کاویانپور آزمایشاتی را جهت تعیین اثر هوادهی بر نوسانات فشار پایین‌دست سراسیب‌ها انجام داد. وی نتیجه‌گیری نمود که ورود هوا باعث کاهش نوسانات شدید فشار و افزایش میانگین آن می‌گردد که در نتیجه کاهش احتمال وقوع کاویتاسیون را بدنبال خواهد داشت. همچنین وی اثر هوادهی جریان را بر ساختار میدان فشار شامل طیف انرژی نوسانات، چولگی و تیزی نوسانات و کاهش ریسک وقوع نوسانات منفی فشار بررسی کرده، نتیجه‌گیری نمود که هوادهی باعث تغییر ساختار میدان فشار می‌گردد [۶]. بررسی‌های بعدی وی و همکارانش نشان داد که در پایین‌دست دریچه‌های تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی، هوادهی باعث افزایش فشار و تعدیل میدان نوسانات آن می‌گردد و مطابق با نتایج قبلی محقق به تغییر ساختار میدان فشار می‌انجامد. لذا بر اساس این نتایج هوادهی را می‌توان به عنوان یکی از راه‌های منحصر بفرد در کاهش ریسک وقوع کاویتاسیون در تخلیه‌کننده‌های تحتانی برشمرد.

۳-۵- ساختار عمودی و طولی جریان آب و هوا

ساختار عمودی جریان در کانال‌های باز با جریان‌های به شدت آشفته را می‌توان مطابق

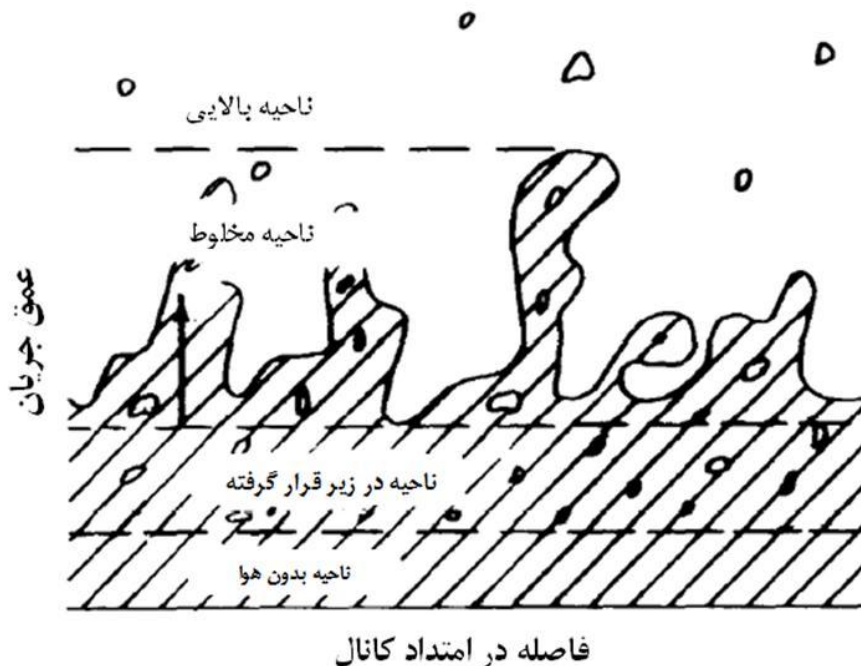
شکل (۳-۱) به چهار منطقه تقسیم کرد که عبارتند از:

۱- ناحیه بالایی حاوی قطرات آب به سرعت گذرنده

۲- ناحیه مخلوط که سطح آب پیوسته است

۳- ناحیه در زیر قرار گرفته که حباب‌های هوا در آب پخش شده است

۴- ناحیه بدون هوا



شکل (۳-۱): ساختار جریان در کانال باز (Falvey 1980)

ناحیه بالایی محتوی ذرات آبی است که از ناحیه مخلوط خارج شده است. این ذرات می‌توانند تا فاصله قابل توجهی روی سطح متوسط آب بالا روند. معمولاً این ناحیه در ملاحظات مهندسی به علت جرم کم آن صرف نظر می‌شود.

ناحیه مخلوط عبارت است از منطقه‌ای از امواج سطحی که دامنه‌ها و فرکانس‌های تصادفی دارد. اطلاع از مشخصات ناحیه مخلوط بسیار با اهمیت است زیرا همه هوایی که به درون جسم آب فرو می‌رود یا از جریان خارج می‌شود باید از این ناحیه بگذرد. همچنین اگر قرار به جلوگیری از بالا آمدن آب در دیواره‌های کانال باز باشد، با استفاده از ارتفاع حداکثر امواج رخ داده در ناحیه مخلوط، می‌توان ارتفاع دیواره‌های کانال‌های باز را بدست آورد.

ناحیه در زیر قرار گرفته ناحیه‌ای است که امواج در آن نفوذ نمی‌کند. غلظت هوا در هر نقطه‌ای در این ناحیه توسط تعداد حباب‌های هوا و اندازه آنها محاسبه می‌شود. اولین عامل تأثیر گذار روی توزیع غلظت هوا توزیع شدت آشفستگی درون جریان است. با استفاده از تئوری لایه مرزی آشفته توسعه رابطه برای توزیع غلظت هوا در این ناحیه امکان پذیر است.

ناحیه بدون هوا فقط در مقطعی از کانال که هواگیری هنوز توسعه نیافته است موجود است. در بسیاری از کاربردهای عملی مرز بین ناحیه بدون هوا و ناحیه در زیر قرار گرفته را نمی‌توان به طور دقیق محاسبه کرد. در مرز، مقدار غلظت هوا خیلی کوچک و نرخ تغییرات غلظت با عمق نیز کوچک است.

علاوه بر تعریف ساختار جریان در صفحه عمودی، امکان تعریف رژیم‌های جریان در جهت طولی برای جریان در کانال باز نیز وجود دارد. Borman در سال ۱۹۶۸ سه ناحیه متمایز در جریان‌های با هواگیری طبیعی را در کانال‌های عریض مشخص کرده بود که عبارتند از:

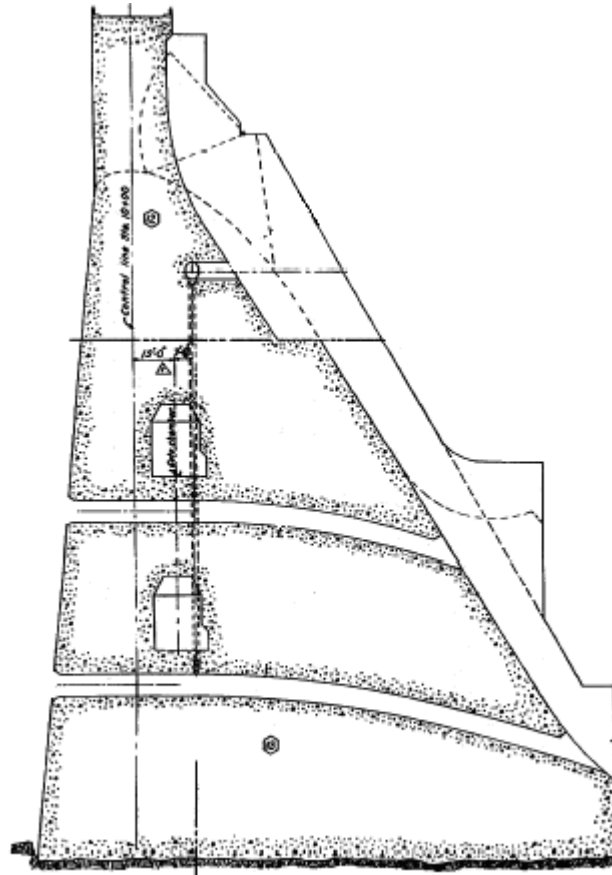
- ۱- رژیم بدون هواگیری که لایه مرزی آشفته به سطح آب نرسیده است.
- ۲- رژیم در حال توسعه هواگیری که در آن پروفیل غلظت هوا در مقاطع مختلف تغییر می‌کند.
- ۳- رژیم کاملاً توسعه یافته هواگیری که در آن پروفیل غلظت هوا در مقاطع مختلف ثابت است.

۳-۶- تخلیه‌کننده تحتانی سدها

تخلیه‌کننده تحتانی از قسمت‌های مهم یک سد می‌باشد که اهدافی از جمله تخلیه مخزن سد در مواقع اضطراری، تخلیه قسمتی از سیلاب علاوه بر ظرفیت سرریز به هنگام وقوع سیلاب‌های بزرگ، تخلیه قسمتی از رسوب مخزن و کنترل آبرگیری اولیه مخزن در سدهای خاکی را دنبال می‌کند. در نتیجه، طراحی صحیح و دقیق تخلیه‌کننده‌ها از اهداف مهم طراحان سدهای بزرگ می‌باشد که در آن باید از ظرفیت آبرگیری کافی و عملکرد مناسب مجرا و تاسیسات هیدرولیکی از جمله دریچه‌ها و تاسیسات هیدرودینامیکی آن اطمینان حاصل گردد.

تخلیه‌کننده‌ها بسته به نوع دریچه‌های کنترل و موقعیت جریان خروجی نسبت به پایاب، تحت فشار یا با سطح آزاد در بخش‌هایی از طول آنها، مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. این تونل‌ها در بدنه سدهای بتنی یا زیر بدنه یا تکیه‌گاه سدهای خاکی و سنگریزه‌ای احداث می‌گردند (شکل ۳-۲). جریان خروجی از تخلیه‌کننده ممکن است با جریان سرریز تلاقی پیدا نموده و یا جداگانه به حوضچه

آرامش تخلیه شود. نحوه اجرای ورودی و شکل آن برای کاهش افت هد، مقطع عریض شده خروجی برای کمک به پراکنش انرژی در پایین دست و مجرای هوا برای محافظت در برابر تخریب کاویتاسیون، در طراحی تونل ها مهم می باشند.



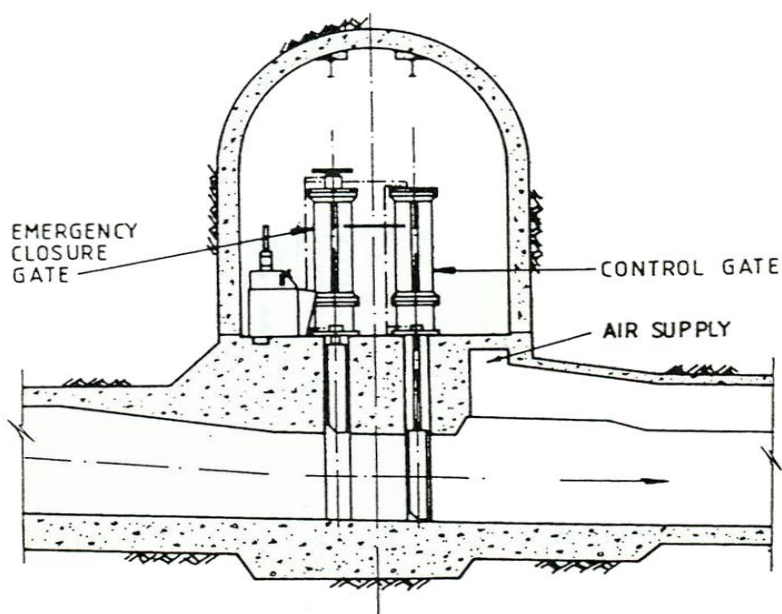
شکل (۳-۲): پروفیل طولی سد Folsom واقع در امریکا و تونل های تخلیه کننده واقع در بدنه سد

۳-۶-۱- دریچه های کنترل

دریچه سازه ای جهت تنظیم جریان آب می باشد که امان کنترل کننده آن در زمانی که عمل کنترل صورت نمی گیرد، خارج از جریان و در زمان کنترل، در جهتی متقاطع با جهت جریان حرکت می کند. دریچه ها را می توان با توجه به محل قرارگیری آنها، در تاج سد و یا در مجاری عمقی، به دریچه های سطحی و عمقی (با هد بالا) تقسیم نمود. از نظر نوع کاربری، آنها به انواع سرویس، فرازبند

(تعمیر و نگهداری) و اضطراری قابل دسته‌بندی می‌باشند. دریچه‌ها را از نقطه نظر نوع مصالح مورد استفاده در ساخت نیز با توجه به تنوع مصالح مصرفی شامل فولاد، آلیاژهای آلومینیم، بتن مسلح، چوب، لاستیک، نایلون و سایر مواد مصنوعی می‌توان دسته‌بندی نمود. بر حسب نوع حرکت، دریچه‌ها را می‌توان به انواع عرضی، چرخشی، غلتکی، شناور و دریچه‌هایی که در امتداد عمود بر جریان حرکت می‌کنند، دسته‌بندی کرد. در نهایت دریچه‌ها را بر حسب مکانیزم حرکت به انواع الکتریکی، مکانیکی، هیدرولیکی، دستی یا خودکار با فشار آب می‌توان تقسیم نمود.

با توجه به اهداف ساخت تخلیه‌کننده‌ها، در طول مجرا دریچه‌هایی به منظور تنظیم جریان خروجی از مخزن مورد نیاز می‌باشند که دریچه‌های سرویس نام دارند و اغلب از نوع کشویی یا قطاعی می‌باشند. جهت بستن مجرا در هنگام بروز مشکلات حین عملکرد دریچه سرویس از جمله خرابی آن، دریچه‌های اضطراری قبل از دریچه‌های سرویس قرار داده می‌شوند که معمولاً از نوع کشویی بوده و می‌توانند وظیفه دریچه‌های تعمیر و نگهداری را نیز انجام دهند. در شکل (۳-۳) موقعیت معمول دریچه‌های اضطراری و سرویس از نوع کشویی، در یک تونل تخلیه‌کننده نشان داده شده است.



شکل (۳-۳): موقعیت دریچه‌های اضطراری و سرویس از نوع کشویی در یک تونل تخلیه‌کننده

۳-۷- لزوم هوادهی پایین دست دریچه‌ها

هنگامیکه تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها با باز شدن دریچه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، به علت شرایط سرعت بالای جریان، فشار در ناحیه پشت دریچه افت نموده و ممکن است از فشار اتمسفر کمتر گردد. در اثر این افت فشار و به عبارتی بروز فشار منفی در پایین دست دریچه، پیامدهای مخربی همچون وقوع کاویتاسیون باید مد نظر قرار گیرد. همچنین به علت بروز فشارهای منفی در پایین دست دریچه، جریان به سمت سقف تونل کشیده شده که در نتیجه برخورد آن به جداره مجرا، نیروی قابل توجهی به سقف وارد شده و باعث ارتعاش مجرا می‌گردد. با ادامه بهره‌برداری تحت شرایط فوق، تخریب تونل و دریچه دور از انتظار نخواهد بود. از طرف دیگر وقوع جریان آشفته پایین دست در دریچه که با نوسانات شدید فشار همراه می‌باشد، باعث لرزش دریچه گشته و در صورت بروز پدیده تشدید، دریچه در مدت کوتاهی پس از بهره‌برداری تخریب خواهد شد.

در فصل دوم جهت کنترل کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی روش‌هایی ارائه شد که از میان این روش‌ها، اصلاح مسیر جریان، اصلاح هندسه شیارهای دریچه، استفاده از مصالح مقاوم در ساخت پوشش مجرای پایین دست دریچه و هوادهی جریان را می‌توان در تخلیه‌کننده‌ها استفاده نمود. این روش‌ها بعضاً جهت جلوگیری از بروز فشارهای منفی و یا بالابردن مقاومت سازه و نهایتاً کنترل کاویتاسیون کاربرد دارند. تحت شرایطی که امکان بروز فشارهای منفی وجود دارد، هوادهی جریان در مقایسه با سایر روش‌های مرتبط، موثرتر، اقتصادی‌تر و نسبتاً از نظر اجرایی و طراحی آسانتر می‌باشد. هوادهی جریان همانگونه که گفته شد بر میدان فشار تاثیر می‌گذارد و از بروز فشارهای منفی در جریان و نوسانات شدید آن می‌کاهد. با توجه به آنکه تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها مجاری بسته‌ای هستند که امکان هواگیری طبیعی جریان در آنها میسر نمی‌باشد، در نتیجه جهت تضمین هوادهی جریان در پایین دست دریچه‌ها باید مجرای هوای مناسب به نام هواده تعبیه و با ارتباط آن به اتمسفر، هوای مورد نیاز سیستم تامین گردد.

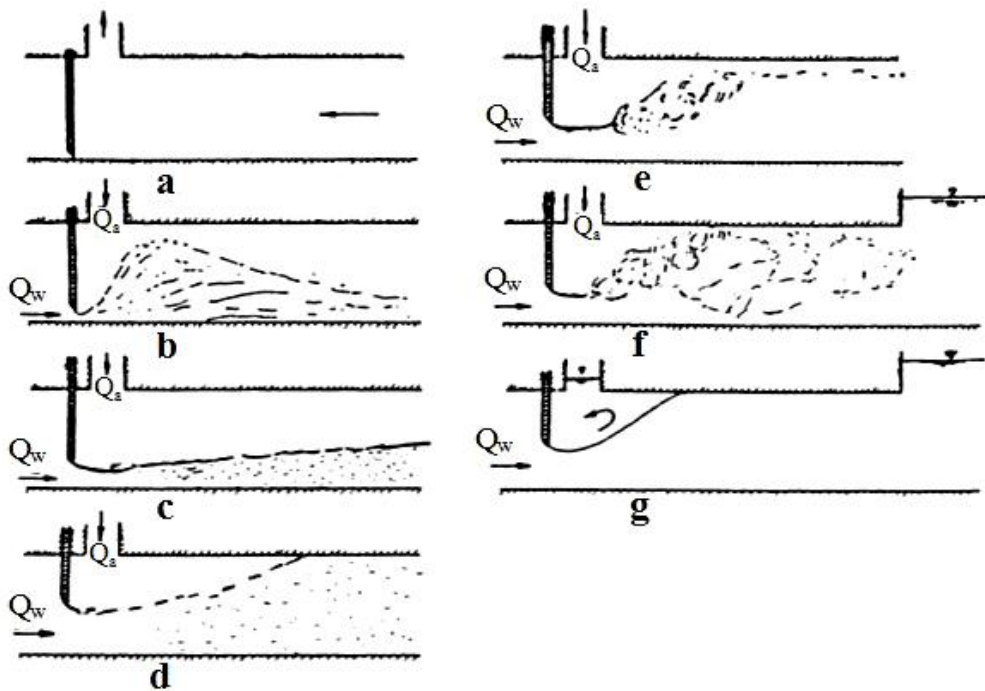
۳-۸- طبقه بندی جریان پائین دست دریچه

در سال ۱۹۷۶، Sharma جریان پایین دست دریچه را مطابق شکل (۳-۴) به صورت زیر

تقسیم بندی نمود:

- ❖ *جریانی از هوا بدون آب:* این حالت وقتی روی می دهد که دریچه بسته باشد (حالت a).
- ❖ *جریان پودری:* در بازشدگی های کوچک و معمولاً کمتر از ۲۰٪، جت آب به صورت پودری از قطرات آب در می آید و هوای زیادی را وارد جریان می نماید (حالت b).
- ❖ *جریان با سطح آزاد:* با افزایش بازشدگی دریچه، جریان آب با سطح آزاد پدید می آید. این جریان بسته به ضریب هوادهی ممکن است بصورت جریان لایه ای، جریان موجی یا جریان توده موجی باشد (حالت c).
- ❖ *جریان حباب دار:* در بازشدگی های بالاتر دریچه، مقطع جریان توسط مخلوط تقریباً یکنواخت آب و هوا پر می شود (حالت d).
- ❖ *جریان همراه با پرش هیدرولیکی با سطح آزاد:* ساختار جریان با سطح آزاد ممکن است در اثر پرش هیدرولیکی با سطح آزاد در محل انتقال جریان فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی تغییر نماید. در این حالت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به سقف مجرا نمی رسد (حالت e).
- ❖ *جریان همراه با پرش هیدرولیکی که مقطع مجرا را پر می کند:* ساختار جریان با سطح آزاد ممکن است در اثر پرش هیدرولیکی با انتقال جریان فوق بحرانی به جریان تحت فشار تغییر نماید. در این حالت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به سقف مجرا رسیده ولی هواده در این حالت هنوز عمل می نماید (حالت f).

❖ جریان آب بدون هوا: این حالت هنگامی که پرش هیدرولیکی مستغرق در جریان اتفاق افتد، قابل مشاهده است. در نتیجه ظرفیت هواگیری جریان کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد و ممکن است مجرای هوا از آب نیز پر گردد (حالت g).



شکل (۳-۴): طبقه‌بندی جریان پایین‌دست دریچه

۳-۹- فرایند هواگیری جریان

اصولاً در طراحی تخلیه‌کننده‌ها تامین مقدار هوای کافی برای کاهش تخریب سازه در اثر کاویتاسیون و ارتعاش دریچه و تونل حائز اهمیت بسیار می‌باشد. تقاضای هوا در پایین‌دست دریچه به شرایط جریان وابسته است. البته هواگیری اصلی معمولاً در سرعت‌های زیاد جریان آب در پایین‌دست دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی قابل مشاهده می‌باشد.

از خصوصیات جریان‌های با سرعت بالا، آشفتگی بسیار زیاد آنها و زبری سطح آب در اثر این خصوصیت تلاطمی جریان می‌باشد. در نتیجه این خصوصیات، جریان آب، هوای مورد نیاز را از طریق مجرای هوا که به‌منظور هوادهی جریان طراحی و اجرا شده است (Q_{av}) و همچنین از طریق انتهای پایین‌دست تونل (Q_{ad}) تامین می‌نماید. در این میان بخشی از هوای وارد شده به تونل، به‌علت

آشفستگی سطح جریان به شکل حباب یا بسته های بزرگ هوا وارد جریان شده (Q_{ae}) و همراه آب به سمت پایین دست حرکت می کند. اما بخش قابل توجهی از هوا، در بالای سطح آب بر اثر تنش برشی ایجاد شده در سطح جریان و یا انتقال ممنوم به واسطه قطرات آب، به سمت پایین دست حرکت و از تونل خارج می شود (Q_{af}). مجموع دو بخش هوای مورد اشاره، که با عنوان هوای مورد نیاز یا تقاضای هوای جریان (air demand) از آن یاد می شود، با رابطه زیر بیان می شود:

$$Q_{at} = Q_{ae} + Q_{af} = Q_{av} + Q_{ad} \quad (۱-۳)$$

که در آن Q_{at} کل دبی هوا در مجرا یا کل تقاضای هوای جریان آب می باشد که با توجه به فشارهای منفی پایین دست دریچه و ظرفیت درخواستی مورد اشاره به داخل مجرا کشیده و حمل می گردد. در صورتی که طراحی مناسبی جهت مجرای هوا صورت گرفته باشد، تمام تقاضای هوای جریان از این طریق تامین می گردد.

همانطور که اشاره شد، حباب های هوای وارد شده به جریان تحت تاثیر سرعت بالای جریان و آشفستگی، همراه جریان آب به سمت پایین دست حرکت می کنند. بخشی از این حباب ها پس از طی مسافتی در اثر نیروی شناوری به طرف سطح آب حرکت می کنند و از جریان خارج می شوند. البته معمولاً شیب تخلیه کننده ها اندک بوده و در نتیجه محل خروج حباب ها به مولفه عمودی سرعت و آشفستگی جریان آب، سرعت صعود حباب ها در جریان آشفته (V_{rt}) و طول مجرا بستگی دارد. با توجه به آنکه در این تخلیه کننده ها اغلب آشفستگی جریان بالا می باشد در نتیجه نیروی حاصل از آشفستگی بر نیروی شناوری غلبه می نماید و انتظار می رود که اکثر حباب های هوا توسط جریان به سمت پایین دست حمل و از تونل خارج گردند. مقدار هوایی که در بالای سطح آب جریان دارد تابعی از مشخصات جریان و افت فشار در مجرای هوا می باشد و بصورت زیر قابل بیان است:

$$Q_{af} = f(L, U, g, p, y_e, \rho_w) \quad (۲-۳)$$

که در آن L طول مجرا، U سرعت میانگین جریان، p فشار، g شتاب ثقل، y_e عمق موثر جریان آب معادل با A_{90}/T عرض سطح آزاد آب و A_{90} سطح مقطع جریان آب- هوا می‌باشند. A_{90} مربوط است به ارتفاعی که غلظت هوا در آن برابر ۹۰٪ می‌باشد. با آنالیز ابعادی و در نظر گرفتن U ، y_e و ρ_w بعنوان پارامترهای تکراری رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\beta_f = \frac{Q_{af}}{Q_w} = f\left(\frac{L}{y_e}, \frac{1}{Fr^2}, \frac{p/\gamma_w}{U^2/2g}\right) \quad (3-3)$$

که در آن Q_w دبی جریان آب و β_f نسبت دبی جریان هوا به جریان آب می‌باشند و عدد فرود بر حسب عمق موثر با رابطه $Fr = U/\sqrt{gy_e}$ تعریف می‌گردد. آزمایشات Sikora در سال ۱۹۶۵ مؤید آن است که β_f به عدد فرود و $\Delta p_a/\rho_w U^2$ اختلاف فشار اتمسفر و فشار هوا در انتهای بالادست مجرای آب بستگی دارد.

از طرف دیگر حرکت هوا در بالای سطح جریان آب در مجاری بسته شبیه جریان بین دو صفحه ثابت و متحرک با گرادیان فشار طولی می‌باشد و لذا تحت شرایطی ممکن است که این جریان در جهت عکس جریان آب حرکت نماید (Schlichting 1968). بطور مثال در تونل‌های تخلیه‌کننده ممکن است در اثر تقاضای زیاد هوا و فراهم بودن شرایط لازم، هوا از انتهای پایین‌دست مجرا و از قسمت بین سطح آب و سقف وارد آن شود. حال چنانچه از هوای ورودی از انتهای پایین‌دست مجرا صرف‌نظر شود، دبی هوایی که از طریق هواده وارد مجرا شده و در بالای سطح آب جریان می‌یابد، مطابق شکل (۳-۵) با در نظر گرفتن رشد لایه مرزی هوا (صفر در محل دریچه و حداکثر در انتهای مجرا) قابل برآورد می‌باشد. برای تخمین اولیه می‌توان رشد لایه مرزی هوا را به صورت رابطه زیر فرض نمود:

$$\frac{\delta}{x} = 0.01 \quad (4-3)$$

که در آن δ ضخامت لایه مرزی و X فاصله از دریچه می‌باشند. توزیع سرعت در لایه مرزی هوا را نیز می‌توان با تابع نمایی زیر تقریب زد:

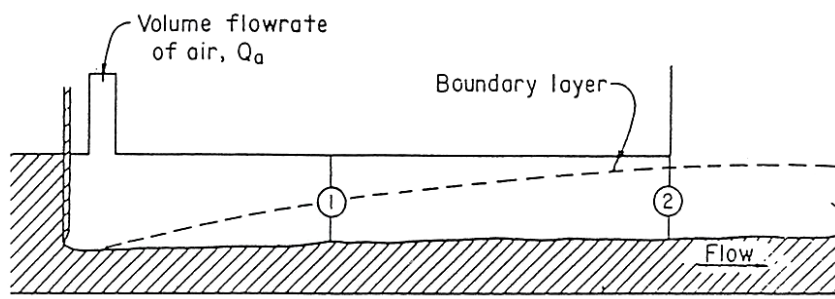
$$\frac{u}{U_{90}} = \left(\frac{y_a}{\delta} \right)^{1/n_v} \quad (5-3)$$

که در آن y_a ارتفاع از سطح آب، u سرعت موضعی در y_a ، U_{90} سرعت موضعی در ارتفاعی که غلظت هوا در آن برابر ۹۰٪ است و n_v ضریب تابع نمایی توزیع سرعت می‌باشند. n_v بین ۱۰ برای جریان از روی سطح صاف و ۵/۴ برای جریان از روی سطح زبر با عدد رینولدز حدود 10^6 ، متغیر بوده و معمولاً مقدار ۷ در نظر گرفته می‌شود.

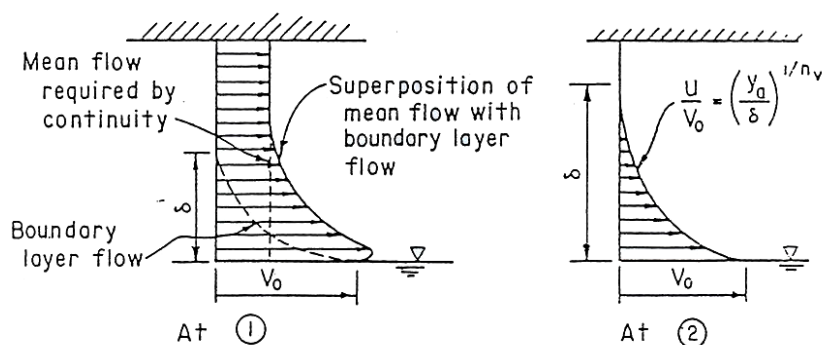
در این راستا سرعت هوا در سطح آب معادل سرعت موضعی آب در نظر گرفته شده که منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین در بالادست مجرا سرعت موضعی هوا، در فاصله کمی بالاتر از سطح آب، بیشتر از سرعت موضعی روی سطح آب می‌باشد (شکل ۵-۳). آزمایشات دقیق انجام گرفته توسط Ghetti در سال ۱۹۵۹ بر روی تخلیه‌کننده‌های دریچه‌دار سد Vaiont در ایتالیا موید آن بود که سرعت ماکزیمم هوا در مجاورت سطح آب در محل هواده، می‌تواند تا چهار برابر سرعت آب افزایش یابد. حال چنانچه جریان لایه مرزی هوا به سقف مجرا برخورد نماید، اصطکاک سقف با جریان آشفته باعث کند شدن جریان هوا گشته و اگر زبری سطح آب و سقف یکسان در نظر گرفته شوند، Q_{af} ماکزیمم از رابطه زیر قابل تخمین می‌باشد:

$$(Q_{af})_{\max} = 1/2 A_a U_{90} \quad (6-3)$$

که در آن A_a سطح مقطع گذرگاه هوا (مستطیلی) است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، زبری سطح آب از زبری سقف کوچکتر است و در نتیجه باعث تولید سرعت‌های هوای بالاتری در نزدیکی سطح آب می‌شود و دبی واقعی هوا از مقدار بدست آمده از رابطه (۶-۳) بیشتر خواهد بود.



A. Profile sketch



شکل (۵-۳): پروفیل طولی جریان تونل پایین دست دریچه به همراه توزیع در سرعت در دو مقطع از جریان

Sikora (1965) استدلال نمود که سرعت میانگین جریان هوا نمی تواند از سرعت میانگین

جریان آب- هوا بیشتر گردد. در نتیجه وی رابطه ای برای دبی ماکزیمم محتمل هوا در مجاری بسته

به صورت زیر ارائه نمود:

$$\left(\frac{Q_{af}}{Q_w}\right)_{\max} = \frac{A_t}{(A_w)_{\max}} - 1 \quad (۷-۳)$$

که در آن A_t سطح مقطع کل مجرای بسته و $(A_w)_{\max}$ سطح مقطع ماکزیمم جریان آب می باشد.

رابطه بالا بدون توجه به ضخامت لایه مرزی جریان هوا، دبی هوای جاری بین سقف و سطح آب را

نتیجه می دهد.

۳-۱۰- عوامل موثر بر هواگیری جریان پایین دست دریچه

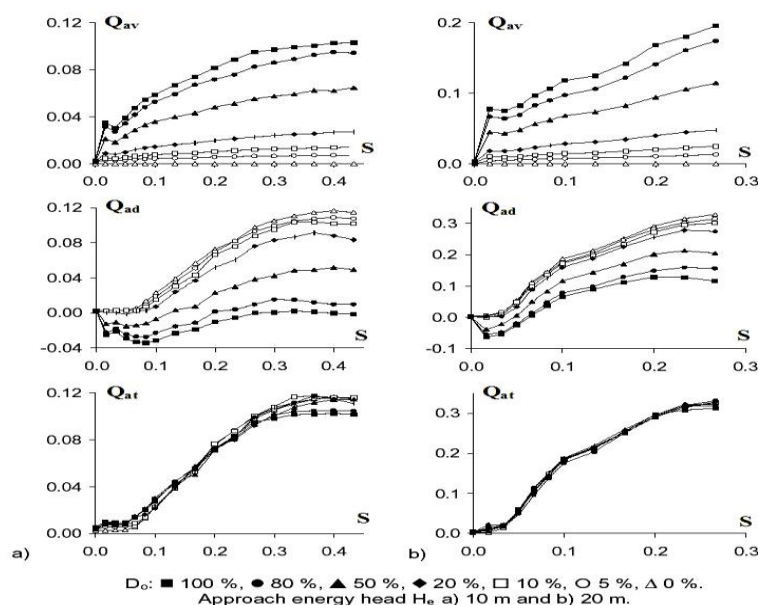
در تونل‌های تخلیه‌کننده یکی از مهمترین حالت‌های جریان پایین دست دریچه، مربوط به بازشدگی‌های کوچک می‌باشد که در آن جریان با سطح آزاد با برخورد به شیار دریچه و حرکت سریع آن به بالا به حالت پودر ظاهر می‌شود. پودر حاصل باعث جابجایی مقدار هوای بیشتری نسبت به جریان لایه‌ای و موج‌دار در دبی آب یکسان می‌گردد. پارامترهای متنوعی شامل میزان بازشدگی دریچه، کل هد آب بالادست، فشار هوا و غیره بر هواگیری جریان پودری موثر می‌باشند و لذا تعیین تقاضای هوای حداکثر در این حالت از نظر تئوری بسیار دشوار خواهد بود.

با افزایش بازشدگی دریچه، جریان پودری کاهش یافته و در بازشدگی‌های بالاتر از ۲۰٪ یا ۳۰٪ جریان دو لایه با سطح آزاد ایجاد می‌گردد. پارامترهای موثر بر هواگیری در جریان با سطح آزاد شامل طول مجرا، عدد فرود جریان و فشار هوا بوده و با توجه به شباهت‌های موجود بین جریان فوق‌بحرانی با سطح آزاد در تونل پایین دست دریچه‌ها و جریان سریع در کانال‌های باز، می‌توان پذیرفت که تقاضای هوای جریان در این دو حالت از قوانین تقریباً مشابه‌ای تبعیت می‌نماید. در سال ۱۹۹۷، Speerli & Volkart اظهار نمودند که هد انرژی بالادست (H_e)، بازشدگی نسبی دریچه (S)، مشخصه‌های افت در هواده و هندسه تونل پایین دست بر تقاضای هوای جریان آب تاثیرگذار هستند. بنابراین با توجه به توضیحات ارائه شده منحنی تقاضای هوا برای جریانهای آزاد بر حسب بازشدگی دریچه معمولاً دارای دو ماکزیمم می‌باشد که اولی مربوط به جریان پودری و دارای درجه دوم اهمیت و دومی مربوط به جریان با سطح آزاد و دارای درجه اول اهمیت می‌باشد (شکل ۳-۹). Davis & Sorensen (1984) حداکثر میزان هوای عبوری از هواده مربوط به ماکزیمم دوم را در بازشدگی ۸۰٪ گزارش نمودند. کاویانپور (۱۳۷۹) با بررسی مدل‌های فیزیکی تخلیه‌کننده‌ها مشاهده نمود که ماکزیمم دوم در بازشدگی ۵۰٪ یا ۹۰٪-۱۰۰٪ در مدل‌های مختلف اتفاق می‌افتد. وی نتیجه‌گیری نمود که دو مکانیزم مختلف بر هواگیری جریان در ماکزیمم دوم در تخلیه‌کننده‌ها تاثیرگذار و منشا این اختلاف می‌باشد.

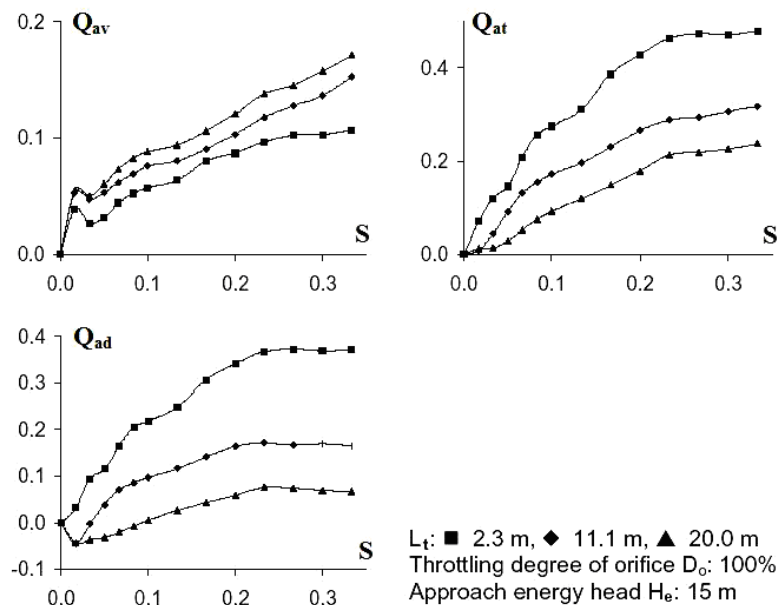
نکته قابل توجه آنکه در حالت بازشدگی بزرگتر از ۳۰٪ چنانچه پرش هیدرولیکی در پایین دست دریاچه به وقوع پیوندد، تحت تاثیر مکانیزم ماکروتوربولانس چرخش در پرش هیدرولیکی، هوا وارد جریان می گردد که میزان آن تابع عدد فرود جریان و از نظر کمی، کمتر از حالت بدون پرش گزارش گردیده است. در این حالت با افزایش بازشدگی دریاچه، به مقدار هواگیری جریان افزوده می گردد. اگر پرش در فاصله ای دور از دریاچه اتفاق افتد، کل هوای ورودی به جریان از مجموع هواگیری جریان فوق بحرانی بالادست و هواگیری پرش حاصل می گردد.

۳-۱۱- ارزیابی میزان هوادهی در پایین دست دریاچه ها

محققان برای تعیین میزان هوادهی توسط هواده ها در پایین دست دریاچه روش های مختلفی را مورد استفاده قرار داده اند. از میان این نگرش ها، روشهای تحلیلی به دلیل پیچیدگی های زیاد هوادهی قابل اتکا نمی باشند و لذا استفاده از روشهای تجربی با اندازه گیری در مدل های آزمایشگاهی یا در پروتوتیپ مورد توجه محققان قرار گرفته که در ادامه به بررسی روش ها و روابط ارائه شده توسط آنان می پردازیم.



شکل (۳-۶): رابطه بین Q_{av} و Q_{ad} و Q_{at} بر حسب m^3/s نسبت به بازشدگی نسبی دریاچه در حالت بررسی تاثیر درصد بازشدگی اریفیس هواده بر دبی هوا برای تونلی به طول ۲۰ متر



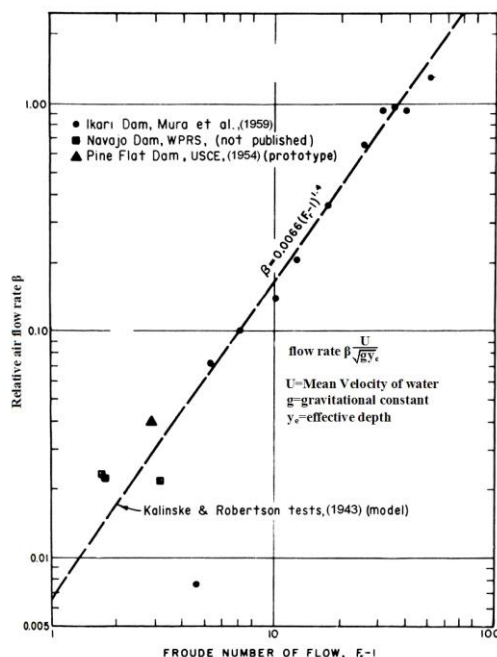
شکل (۷-۳): نمودارهای Q_{av} و Q_{ad} و Q_{at} بر حسب m^3/s نسبت به بازشدگی نسبی دریچه
 در حالت بررسی تاثیر طول تونل پایین دست (L_t) بر دبی هوا برای هد انرژی ۱۵ متر

در سال ۱۹۴۳ Robertson و Kalinske اولین محققانی بودند که در زمینه هواگیری جریان در مجاری بسته تحقیقاتی انجام دادند [۵]. آنها جریان آب با پرش هیدرولیکی که منجر به بسته شدن مجرا می‌گردد را بررسی نموده و از نتایج آزمایش‌های انجام داده در مجراهایی به قطر ۱۵۰ میلیمتر رابطه زیر را پیشنهاد نمودند:

$$\beta = 0.006(Fr - 1)^{1.4} \quad (۸-۳)$$

که در آن β ضریب هوادهی جریان که نسبت دبی هوا به دبی آب است و Fr عدد فرود جریان بالادست پرش هیدرولیکی می‌باشند. این رابطه با آزمایش‌های انجام گرفته بر مجاری مستطیلی با ابعاد ۲۰۰ میلیمتر در ۲۶۶ میلیمتر و در معرض فشار اتمسفر در جلوی پرش هیدرولیکی تایید گردید. نتایج بدست آمده از مدل‌های بزرگتر و پروتوتیپ نشان می‌دهند که ظرفیت هواگیری پرش

در مجاری بسته با افزایش ابعاد مجرا، افزایش می‌یابد و بر این اساس برای پوش بالایی نتایج پروتوتیپ ضریب 0.0066 در رابطه (۸-۳) به حدود 0.015 تغییر می‌یابد. مقایسه داده‌های پروتوتیپ با رابطه (۸-۳) در نمودار شکل (۸-۳) نشان دهنده نتایج نسبتاً قابل قبولی است.



شکل (۸-۳): نمودار ضریب هوادهی نسبت به $Fr-1$ ، مقایسه رابطه (۸-۳) با داده‌های پروتوتیپ

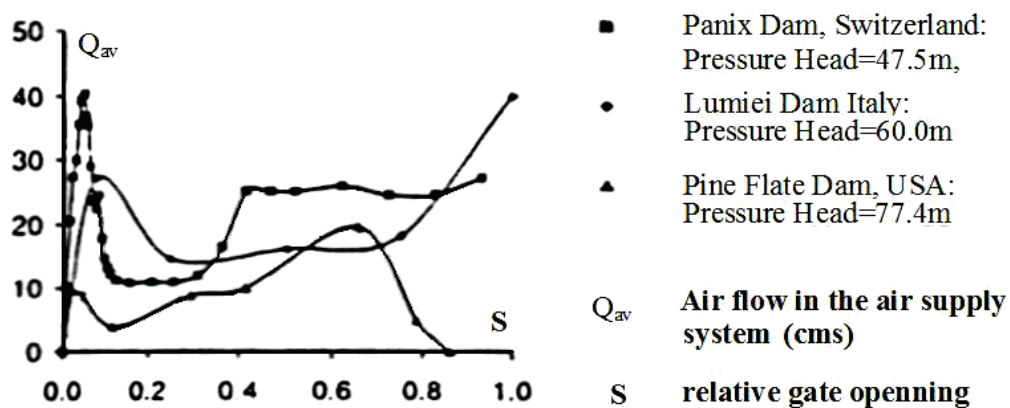
محققان USACE نیز با استفاده از نتایج اندازه‌گیری میزان هوای ورودی از هواده در چند تخلیه‌کننده، تاثیر هندسه تونل را مورد بررسی قرار دادند. در نمودار شکل (۹-۳) نتایج اندازه‌گیری آنها نشان داده شده است. اختلاف زیاد بین میزان هواگیری در سه تخلیه‌کننده بر اثر هندسه متفاوت آنها می‌باشد. در سد Pine Flat سطح مقطع تونل برابر سطح مقطع دریچه سرویس و در سدهای Panix و Lumiei سطح مقطع تونل بزرگتر از سطح مقطع دریچه سرویس می‌باشد. همچنین با توجه به این نمودار، منحنی Q_{av} بر حسب S دارای دو ماکزیمم می‌باشد. ماکزیمم اول برای جریان پودری در بازشدگیهای کم و ماکزیمم دوم برای جریان با سطح آزاد یا جریان با پرش هیدرولیکی در

بازشدگی‌های بالاتر می‌باشند. لازم به ذکر است میزان هوای ورودی از انتهای پایین‌دست تونل در شرایط مختلف بر Q_{av} تاثیرگذار است.

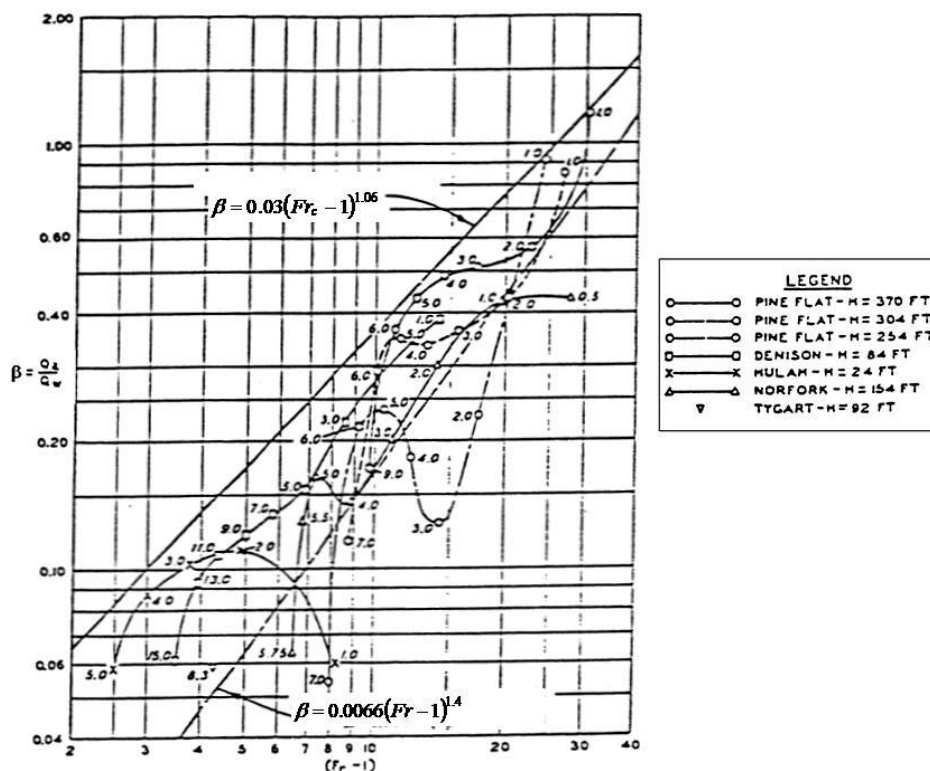
محققان USACE با اندازه‌گیری میزان تقاضای هوای تخلیه‌کننده چند سد مختلف و تحلیل داده‌ها، پوش بالای آنها را با رابطه (۹-۳) مشخص نمودند که در نمودار شکل (۳-۱۰) این رابطه با داده‌های پروتوتیپ مقایسه شده است. منحنی رابطه (۳-۸) نیز در نمودار رسم شده است.

$$\beta = 0.03(Fr_c - 1)^{1.06} \quad (9-3)$$

که در آن Fr_c عدد فرود در محل فشردگی جریان می‌باشد.



شکل (۳-۹): نمودار Q_{av} بر حسب m^3/s نسبت به بازشدگی نسبی دریچه در بررسی تاثیر هندسه تونل بر دبی هوا



شکل (۳-۱۰): نمودار ضریب هوادهی نسبت به $Fr-1$ ، مقایسه رابطه (۳-۹) با داده‌های پروتوتیپ

در سال ۱۹۵۳، Guyton و Campbel برای تعیین میزان تقاضای هوای جریان از روش تحلیلی بر اساس اصول جریان آشفته استفاده نمودند و به نتایج تحلیلی نسبتاً مفیدی رسیدند [۱]. آنها رابطه زیر را برای تعیین β ارائه نمودند:

$$\beta = 0.04(Fr_c - 1)^{0.85} \quad (۳-۱۰)$$

در سال ۱۹۶۵، Wisner معتقد بود که میزان تقاضای هوای جریان به عدد فرود و نسبت سطح مقطع مجرای هوا (A_{av}) به سطح مقطع تونل (A_t) وابسته است. وی در بررسی‌های خود به این نتیجه رسید که β برای $A_{av}/A_t > 1/4$ تنها به عدد فرود و برای $A_{av}/A_t < 1/5$ تنها به بستگی دارد. همچنین Wisner روابط زیر را برای حالات مختلف جریان پیشنهاد نمود:

$$\beta = 0.014(Fr - 1)^{1.4} \quad Fr > 8 \quad \text{جریان همراه با پرش هیدرولیکی و } (11-3)$$

$$\beta = 0.04(Fr - 1)^{0.85} \quad Fr < 8 \quad \text{جریان همراه با پرش هیدرولیکی و } (12-3)$$

$$\beta = 0.024(Fr - 1)^{1.4} \quad \text{جریان با سطح آزاد} \quad (13-3)$$

$$\beta = 0.033(Fr - 1)^{1.4} \quad \text{جریان پودری} \quad (14-3)$$

در سال ۱۹۷۶، Sharma برای تعیین میزان هوای مورد نیاز در جریان پودری، جریان با سطح آزاد و همچنین همراه با پرش هیدرولیکی، آزمایشاتی را در مجرای مستطیلی به ابعاد ۱۰۰ میلیمتر در ۱۵۰ میلیمتر انجام داد و از داده‌های پروتوتیپ نیز استفاده نمود [۱۰]. وی برای تعیین ضریب هوادهی در جریان همراه با پرش هیدرولیکی، نتایج آزمایشات خود را با رابطه (۸-۳) مقایسه نمود و متوجه شد که علت انحراف برخی از داده‌های خود از منحنی رابطه (۸-۳) دور بودن محل پرش از محل فشردگی جریان پایین دست دریچه در این داده‌ها می‌باشد. در نتیجه Sharma در رابطه (۸-۳) به جای عدد فرود در محل پرش از عدد فرود در محل فشردگی جریان (Fr_c) استفاده نمود و نتایج خوبی بدست آورد.

$$\beta = 0.09Fr_c \quad \text{جریان با سطح آزاد} \quad (15-3)$$

$$\beta = 0.2Fr_c \quad \text{جریان پودری} \quad (16-3)$$

در سال ۱۹۶۱، Wunderlich رابطه (۱۷-۳) را توصیه نمود که در آن A_c سطح مقطع جریان در محل فشردگی جریان و A_t سطح مقطع مجرا و $\bar{r}$ نسبت سرعت متوسط هوا به آب (کوچکتر از یک است) می‌باشند:

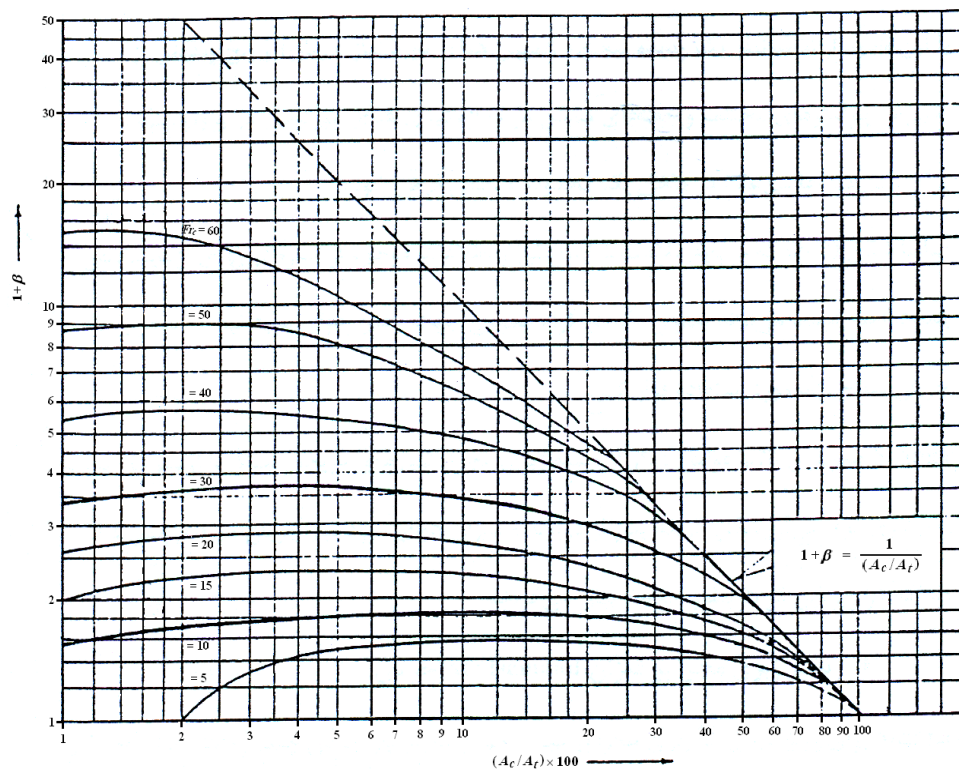
$$\beta = \bar{r} \left(\frac{1}{A_c / A_t} - 1 \right) \quad (17-3)$$

Sharma مطابق شکل (۳-۱۱) داده‌های جریان با سطح آزاد مدل و پروتوتیپ را به صورت نمودار $\beta+1$ نسبت به $1/(A_c/A_t)$ برای Fr_c مختلف رسم نمود و نشان داد که منحنی‌های مربوط به اعداد فرود مختلف را می‌توان به صورت مجانب به خط مشخص شده با رابطه (۳-۱۷) با $\bar{R}$ برابر یک متصل نمود [۱۰].

در سال ۱۹۹۹، Speerli با انجام آزمایشاتی بر روی مدل آزمایشگاهی تونل تخلیه‌کننده (شکل ۳-۱۲) برای جریان با سطح آزاد نشان داد که Q_{av} به بازشدگی نسبی دریچه (S)، هد بالادست (H_e)، درصد بازشدگی اریفیس هواده (D_o) که تعیین کننده افت در هواده می‌باشد و طول تونل پایین دست (L_t) وابسته است [۱۲]. درصد بازشدگی اریفیس هواده که تعیین کننده افت در هواده می‌باشد بین ۱۰۰٪ (باز) و صفر درصد (بسته) متغیر است. وی رابطه زیر را با تحلیل داده‌های آزمایشات خود نتیجه گرفت:

$$Q_{av} = 0.020 H_e \left(\frac{L_t}{h_t} \right)^{1/6} S^{0.5} (g b_t^3)^{0.5} D_o^{0.9} \quad (۳-۱۸)$$

که در آن b_t عرض تونل و h_t ارتفاع تونل می‌باشند. البته D_o در عمل به عنوان پارامتر طراحی قابل استفاده نبوده و لذا وی رابطه (۳-۱۹) را برای داده‌های خود بین ضریب افت کل در هواده (ξ_o) و D_o برآورد نمود:



شکل (۱۱-۳): نمودار $1+\beta$ نسبت به (A_c/A_t) و Fr_c

$$\xi_o = 1.2 D_o^{-2.1} \quad (۱۹-۳)$$

و با جاگذاری آن در رابطه (۱۸-۳) رابطه زیر را بدست آورد:

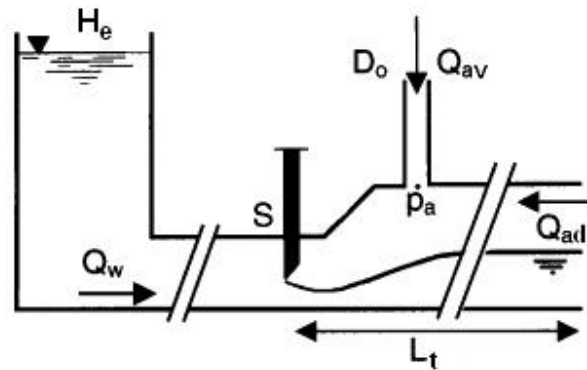
$$Q_{av} = 0.022 H_e \left(\frac{L_t}{h_t} \right)^{1/6} S^{0.5} (g b_t^3)^{0.5} \xi_o^{-0.43} \quad (۲۰-۳)$$

سپس با بی بعد نمودن Q_{av} بر حسب عرض مجرا و هد انرژی بالادست رابطه (۲۰-۳) را به

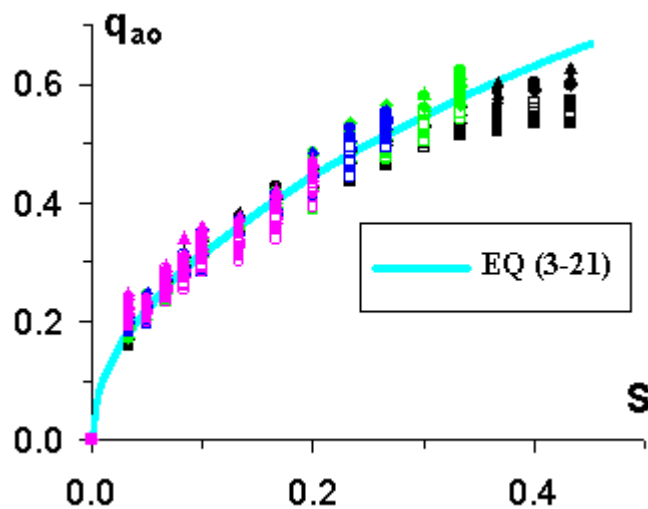
صورت زیر پیشنهاد نمود:

$$q_{av} = \frac{Q_{av}}{(g b_t^2 H_e^3)^{0.5}} = 0.022 \left(\frac{b_t}{H_e} \right)^{0.5} \left(\frac{L_t}{h_t} \right)^{1/6} S^{0.5} \xi_o^{-0.43} \quad (۲۱-۳)$$

که در آن q_{av} دبی هوای بی بعد بر حسب عرض مجرا و هد انرژی بالادست می باشد. در نمودار شکل (۱۳-۳) رابطه (۲۱-۳) با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است. لازم به ذکر است که میزان بازشدگی در این تحقیق بین صفر و ۴۵٪ تغییر می کند.



شکل (۱۲-۳): تصویر شماتیکی از مدل تحقیقاتی Speerli



شکل (۱۳-۳): نمودار دبی بی بعد هوا نسبت به بازشدگی نسبی دریاچه

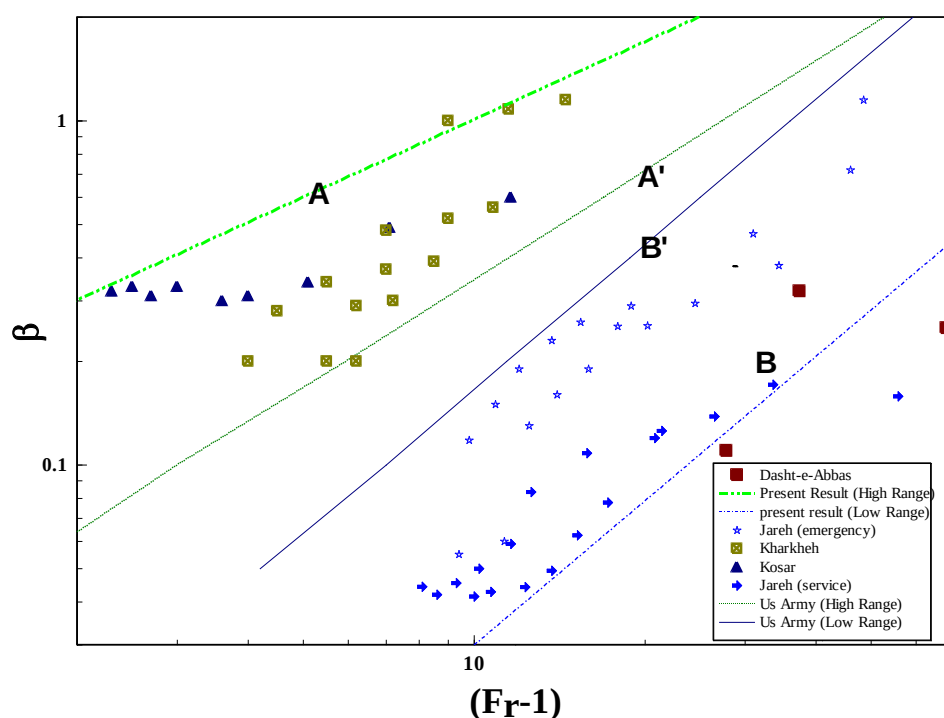
کاویانپور (۱۳۸۰) با بررسی نتایج آزمایشگاهی میزان هوای ورودی از هواده در مدل های چند تونل تخلیه کننده حدود بالایی و پایینی هوادهی جریان توسط هواده را به صورت زیر ارائه نمود [۱۵].

$$\beta = 0.18(Fr_c - 1)^{0.75}$$

(۲۲-۳) حد بالا

$$\beta = 0.0012(Fr_c - 1)^{1.39} \quad (23-3) \text{ حد پائین}$$

در نمودار شکل (۱۴-۳) روابط بالا با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. منحنی‌های A و B، به ترتیب روابط (۲۲-۳) و (۲۳-۳) را نشان می‌دهند. در این نمودار منحنی‌های متناظر با منحنی‌های A و B که توسط USACE (1964) ارائه شده‌اند با عنوان A' و B' رسم شده‌اند. با توجه به این نمودار، منحنی‌های A' و B' برای داده‌های برخی از مدل‌ها مقادیر کمتری را نشان می‌دهند. کاویانپور با بررسی جت خروجی از دریچه در مدل‌های مختلف نتیجه‌گیری نمود که به علت شرایط هندسی مختلف مجرای پایین دست دریچه، در برخی مدل‌ها جت فقط از یک طرف (سطح بالایی آب) و در برخی از چهار طرف هواگیری می‌نماید. این نتیجه اختلاف منحنی‌های A' و B' با داده‌های برخی از مدل‌ها را توجیه می‌نماید.



شکل (۱۴-۳): نمودار ضریب هوادهی نسبت به $Fr_c - 1$

۳-۱۲- هوادهی بین دو دریچه

نزدیکی دو دریچه سرویس و اضطراری در مجرای تخلیه‌کننده و عملکرد توام آنها در شرایط خاصی که دریچه سرویس به دلیل خرابی در مجرا متوقف شده و به عملکرد دریچه اضطراری نیاز پیدا می‌شود، باعث ایجاد حالت‌های بحرانی بین این دو دریچه می‌گردد. این موضوع همواره یکی از مسائل طراحان بوده که با انجام آزمایش‌های مدل، پاسخ آن را جویا می‌گردند. در این ارتباط آزمون‌های اولیه بر اساس روابط پیشنهادی مربوط به میزان هوای درخواستی در هنگام تشکیل پرش هیدرولیکی در مجرا رقم خورده و سپس با استفاده از نتایج مدلی تصحیح می‌گردند. بنابراین می‌توان عدم دسترسی و وجود اطلاعات لازم در این زمینه را اعلام و ضرورت تحقیق در موضوع فوق را گوشزد نمود.

در وضعیت قرارگیری توام دو دریچه در مجرا، جریان آشفته چرخشی بین دو دریچه ایجاد می‌گردد که ماهیتی ناپایدار داشته و با افت شدید فشار همراه است. افت فشار و نوسانات شدید آن در اثر این جریان چرخشی ممکن است باعث وقوع کاویتاسیون، بارگذاری دینامیکی بر دریچه‌ها و ارتعاش آنها و در نتیجه تخریب دریچه‌ها گردد. Petrikat در سال ۱۹۷۹ برای کنترل این مشکل، پراکنش جت (dissipators) را جهت تجزیه جت خروجی از دریچه اضطراری پیشنهاد نمود، اما اطلاعات کاملی در ارتباط با کارایی این روش در دسترس نمی‌باشد. بنابراین با توجه به مطالبی که قبلاً اشاره شد، هوادهی جریان بین دو دریچه می‌تواند به‌عنوان راهی مطمئن و آسان برای کنترل خطرات فوق توصیه گردد که عموماً با نصب هواده بین دو دریچه با تجهیزاتی همچون شیر یکطرفه قابل انجام می‌باشد. استفاده از شیر یکطرفه در هنگام باز بودن کامل دریچه اضطراری و یا در شرایطی که میزان بازشدگی دریچه اضطراری از دریچه سرویس کمتر می‌باشد، توجیه‌پذیر و ضروری می‌باشد. میزان هوادهی هواده بین دو دریچه برای طراحی آن مهم می‌باشد. در ارتباط با این شرایط هوادهی اطلاعات سیستماتیک و قابل اعتنا در منابع و مراجع مرتبط موجود نبوده و لذا برای شناخت عوامل موثر بر هوادهی بین دو دریچه و ارزیابی آن بررسی‌های بیشتری باید صورت گیرد.

۳-۱۳- ملاحظات طراحی

جهت طراحی و اجرای هواده‌ها به موارد مختلفی باید توجه نمود و لذا به دلیل پیچیدگی موضوع و مشخص نبودن دقیق عوامل موثر اکثر طراحان برای بررسی دقیق تر عملکرد هواده به انجام مطالعات مقیاسی و مدلی اتکا می‌نمایند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته موارد زیر توصیه می‌گردد:

- ❖ هواده حتی المقدور بلافاصله پایین دست دریچه قرار داده شود.
- ❖ با توجه به مطالب و روابطی که در بخشهای قبل ارائه شد، دبی جریان هوای ماکزیمم عبوری از هواده برای حالات مختلف جریان آب عبوری از تخلیه‌کننده برآورد و با انجام بررسی‌های مدلی تصحیح گردد. همانطوری که در بخش‌های قبلی بیان گردید، در برخی گزارشات مانند (Davis & Sorensen 1984)، ماکزیمم هواده‌ی در بازشدگی ۸۰٪ گزارش گردیده است. این در حالی است که کاویانپور (۱۳۷۹) با بررسی مدل‌های فیزیکی تخلیه‌کننده‌ها مشاهده نمود که به علت دو مکانیزم مختلف تاثیرگذار بر هواگیری جریان در تخلیه‌کننده‌ها، Q_{av} ماکزیمم در بازشدگی ۵۰٪ و یا ۹۰٪-۱۰۰٪ در مدل‌های مختلف اتفاق می‌افتد.
- ❖ تاثیر صدای ایجاد شده به علت سرعت‌های بالای هوا در هواده در طراحی باید مد نظر قرار گرفته شود. شدت صدای ایجاد شده و مدت زمان آن از عوامل اصلی محدود کردن سرعت هوا در هواده‌ها می‌باشند. با بررسی‌های انجام گرفته سرعت مجاز هوا تا حدود ۹۰ متر بر ثانیه برای هواده‌هایی که مدت کوتاهی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند به عنوان معیار طراحی تعیین شده است. برای حالتی که هوا به مدت طولانی در معرض جریان باشد، سرعت هوا باید کاهش داده شود که کنترل سرعت در هواده‌ها با تغییر سطح مقطع آن (D_a) در هنگام طراحی امکان پذیر می‌باشد.

فصل چهارم:

اطلاعات و بررسی‌های آزمایشگاهی

۴-۱- مقدمه

به دلیل پیچیدگی‌های زیاد هوادهی در تونل‌های تخلیه کننده تحتانی سدها، بررسی آنها نیازمند روابط تحلیلی-تجربی می باشد. به همین منظور محققان با اندازه‌گیری دبی هوای عبوری از هواده‌ها در مدل‌های آزمایشگاهی و در پروتوتیپ تحت شرایط مختلف و سپس با تحلیل نتایج آزمایشات، روابطی را برای میزان هوادهی پیشنهاد نموده‌اند که نمونه‌هایی از آنها در بخش (۳-۱۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است که اکثر روابط پیشنهادی معرف منحنی‌های پوشی هستند که داده‌های تجربی مورد استفاده در آن تحلیل را در بر می‌گیرند و نیز برخی از این روابط تنها بر اساس نتایج بدست آمده از مدل‌های خاص با شرایط هیدرولیکی و هندسی خاص، نتیجه‌گیری شده‌اند. به همین دلیل نتایج تحقیقات مختلف با یکدیگر اختلاف‌های زیادی دارند و بعضاً قابل تعمیم به مدل‌ها و سازه‌های پروتوتیپ دیگر نمی‌باشند و نیز برای برخی داده‌های تجربی جدید، استفاده از روابط موجود، همانطور که در ادامه این فصل مشاهده خواهد شد، با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه است.

در نتیجه در تحقیق حاضر تلاش شده با گردآوری اطلاعات آزمایشگاهی کافی، روابط تحلیلی-تجربی مناسبی برای برآورد میزان هوادهی هواده‌های واقع در پایین‌دست دریچه‌ها و نیز بین دو دریچه، ارائه گردد. به همین منظور نتایج اندازه‌گیری بر روی مدل‌های تخلیه‌کننده سدهای ژاوه، گتوند علیا، البرز، جره و دشت عباس ساخته شده در آزمایشگاه بخش سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو جمع‌آوری شدند. نتایج اندازه‌گیری در مدل تخلیه‌کننده سد Folsom ساخته شده در آمریکا نیز از منابع خارجی به این مجموعه اضافه گشت. به علت ناکافی بودن داده‌ها برای ارائه رابطه‌ای که در بر گیرنده شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی باشد و نیز نبودن داده‌هایی در زمینه هوادهی بین دو دریچه در زمان عملکرد دریچه اضطراری، اندازه‌گیری‌هایی بر روی مدل تخلیه‌کننده سد ژاوه و گتوند علیا ساخته شده در آزمایشگاه بخش سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب صورت گرفت. در ادامه این فصل به معرفی مدل‌های آزمایشگاهی مورد استفاده پرداخته و ضمن ارائه نتایج آزمایشات انجام گرفته بر آنها، این نتایج با روابط تحقیقات پیشین مقایسه گشته‌اند.

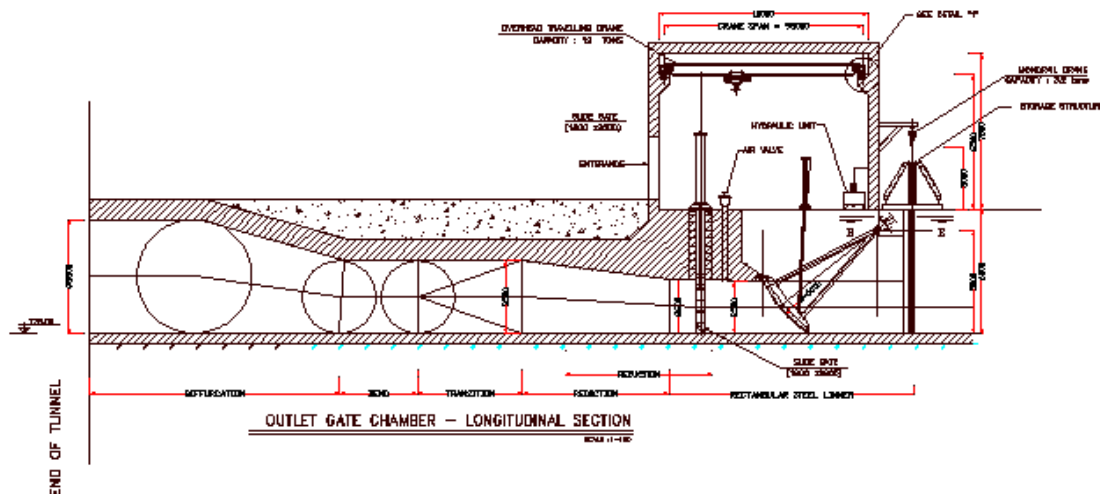
بررسی‌های مدل و پروتوتیپ نشان داده است که تطابق نتایج مدل با واقعیت به علت وجود خطاهای مقیاسی، بدون اشکال نمی‌باشد و لذا توصیه شده که برای شبیه‌سازی مناسب واقعیت، در ساخت مدل‌ها از مقیاس مناسبی استفاده گردد. در بررسی‌های مدلی، بر اساس معیارها و ضوابط طراحی تخلیه‌کننده‌ها و با توجه به آنکه محدوده مورد بررسی عمدتاً در قسمت تحت فشار مجرا معطوف است، لذا باید از قانون تشابه عدد رینولدز (Re) برای ساخت مدل استفاده گردد. براساس این قانون نسبت سرعت در مدل و واقعیت ($V_r = V_m/V_p$) با مقیاس مدل ($\lambda_r = L_m/L_p$) نسبت معکوس دارد. اما در تخلیه‌کننده‌ها معمولاً سرعت جریان زیاد می‌باشد و استفاده از مدلی با مقیاس نسبتاً بزرگ که معرف جزئیات جریان در این مجرا باشد مستلزم آنست که سرعت جریان در مدل بسیار بالا باشد. در نتیجه بر اساس تجربیات موجود از قانون تشابه عدد فرود (Fr) به جای قانون رینولدز استفاده می‌گردد، ولی برای آنکه در این مدل هواگیری جریان با دقت بالاتری شبیه‌سازی گردد باید جریان کاملاً آشفته و عدد رینولدز مدل بیشتر از 10^5 باشد تا اثر لزجت قابل صرف‌نظر باشد.

۴-۲- مدل هیدرولیکی تونل انتقال دشت عباس

به منظور کنترل سیلاب و آبیاری اراضی خوزستان، تونل انتقال آب دشت عباس ساخته شده است. برای بررسی و مطالعه شرایط هیدرولیکی جریان و طراحی نهایی و اطمینان از عملکرد تونل انتقال دشت عباس و دریچه‌های کنترل جریان، مدل هیدرولیکی این تخلیه‌کننده با مقیاس ۱:۱۲ در آزمایشگاه بخش سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. مشخصات این تونل با دریچه سرویس از نوع قطاعی و دریچه اضطراری از نوع کشویی عبارتند از قطر ورودی انشعاب ۵/۵ متر با زاویه انشعاب ۶۰ درجه، ابعاد مجرا در محل دریچه اضطراری ۲/۶ متر در ۱/۸ متر، ابعاد مجرا در محل دریچه سرویس ۲/۵ متر در ۱/۷ متر. در جدول (۴-۱) نتایج عملکرد توام دو دریچه درج شده است. البته این اطلاعات خیلی محدود می‌باشند. در این جدول دسته نخست داده‌ها مربوط به هد آب ۳ متر در مدل و دسته دوم مربوط به هد آب ۴/۲۵ متر در مدل می‌باشند.

جدول (۴-۱): نتایج آزمایشگاهی هوادهی بین دو دریچه تونل انتقال دشت عباس

Emergency opening[%]	Service opening[%]	$Q_{water}[m^3/sec]$	$Q_{air}[m^3/sec]$	β [%]
۴/۲۰	۲۰	۴/۱۸۰۰	۴/۶۶۴۶	۱/۱۱۵۹
۸/۴۰	۳۰	۸/۳۵۰۰	۷/۰۹۳۴	۰/۸۴۹۵
۱۲/۵۵	۳۰	۱۴/۰۶۰۰	۶/۷۹۹۸	۰/۴۸۳۶
۷/۹۰	۲۰	۹/۳۵۶۲	۶/۳۸۷۳	۰/۶۸۲۷



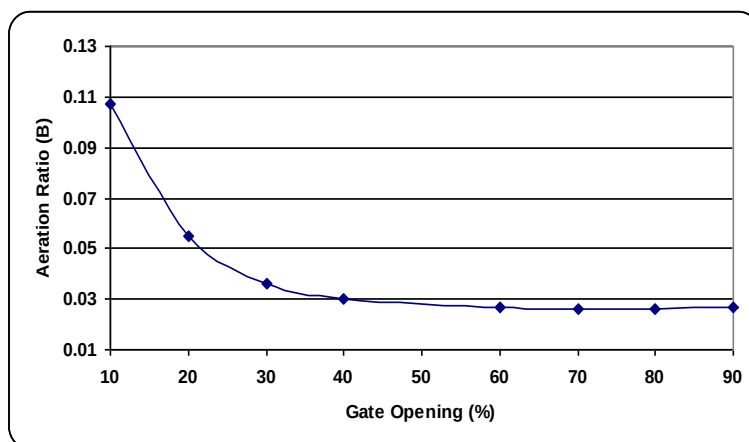
شکل (۴-۱): پروفیل طولی اتاقک دریچه‌های تونل انتقال دشت عباس

۴-۳- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه‌کننده سد ژاوه

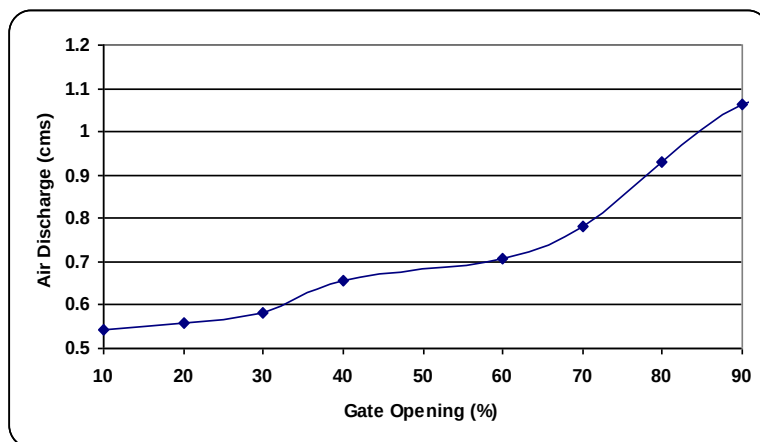
سد مخزنی ژاوه از نوع RCC بوده و بر روی رودخانه ژاوه در ۳۵ کیلومتری جنوب شهرستان سنندج اجرا می‌گردد. سیستم تخلیه سیلاب شامل سرریز آزاد، تنداب پلکانی و حوضچه آرامش می‌باشد که در راستای محور بدنه سد جانمایی گردیده است. مدل مجرای تخلیه‌کننده عمقی سد مخزنی ژاوه شامل لوله ورودی مجرا به قطر ۹/۵ متر، تبدیل ها، لوله به قطر ۵/۵ متر، شیارهای دریچه اضطراری و سرویس، اتاقک‌های دریچه اضطراری و سرویس، مجرای میانی، هوادهای بین دو دریچه، دریچه های سرویس و اضطراری، بازشدگی، هواده و همچنین کل مجرای پایین‌دست دریچه سرویس همراه با شیب معکوس انتهایی با جزئیات کامل مطابق نقشه‌های ارائه شده به‌وسیله 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 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.

برای مقایسه بین حالت‌های عملکرد دریاچه اضطراری، سرعت هوای ورودی تا باز شدگی ۹۰٪ دریاچه اضطراری اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که در بازشدگی ۱۰۰٪، از آنجا که مقطع کنترل پایین‌دست دریاچه اضطراری می‌باشد جت خروجی از لبه پائینی دریاچه به سقف برخورد نموده و به عبارتی به سقف چسبیده و لذا هوادهی طبیعی جت بطور کامل از تونل پایین‌دست انجام می‌گیرد. شکل (۲-۴) میزان ضریب هوادهی برای بازشدگی‌های مختلف دریاچه اضطراری را نشان می‌دهد. ضریب هوادهی (β) بیانگر نسبت دبی هوا در هواده به دبی جریان آب داخل مجرا می‌باشد. همانطور که در شکل دیده می‌شود بیشترین میزان ضریب هوادهی در بازشدگی ۱۰٪ دریاچه اضطراری با مقدار ۰/۱۰۷ رخ می‌دهد که دلیل آن شکل‌گیری جریان‌های پاششی است. اما با توجه به شکل (۳-۴) و محاسبات صورت گرفته ملاحظه گردید که بیشترین میزان دبی هوای اندازه‌گیری شده در هواده در بازشدگی ۹۰٪ دریاچه اضطراری به میزان $1/0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ بوده است.



شکل (۲-۴): تغییرات ضریب هوادهی نسبت به بازشدگی های مختلف دریاچه اضطراری مدل زاوه



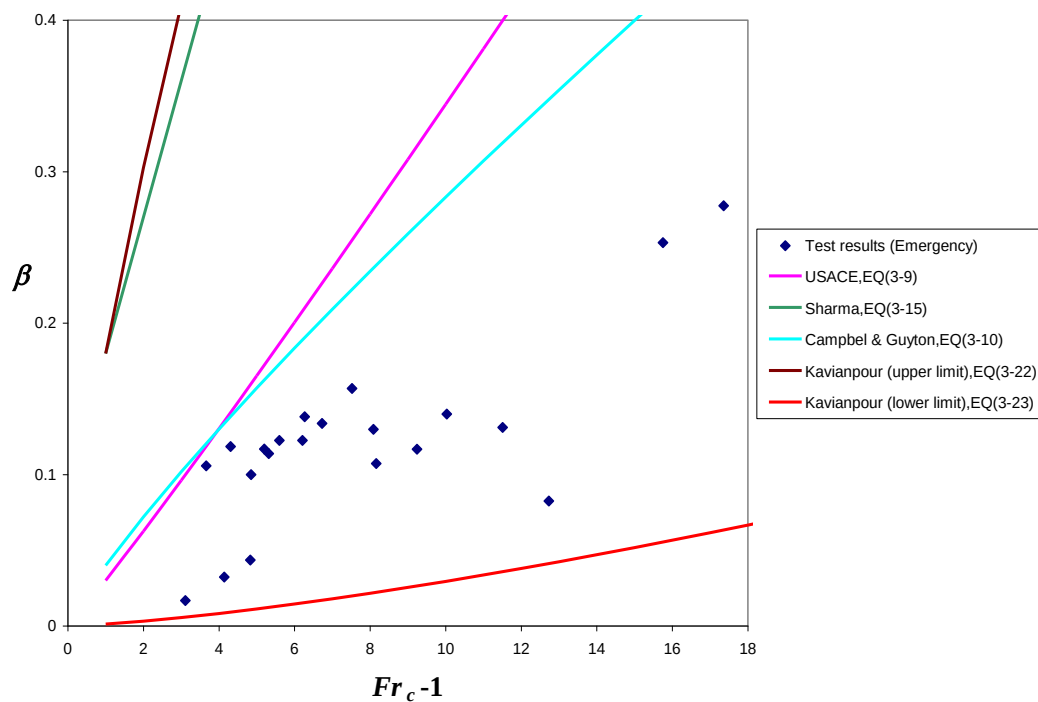
شکل (۴-۳): تغییرات دبی هوادهی نسبت به بازشدگی های مختلف دریچه اضطراری مدل ژاوه

۴-۴- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه کننده سد گتوند علیا

سد مخزنی گتوند علیا از نوع سنگریزه ای با هسته رسی بوده و در ۲۵ کیلومتری شهرستان شوشتر قرار دارد. این سد از سه رشته تونل انحراف بهره گرفته است. از میان این تونل ها، تونل سمت چپ به عنوان تخلیه کننده عمقی مدنظر قرار گرفته است. بر این اساس در قسمت میانی تونل و با استفاده از پوشش فولادی و استفاده از دو دریچه سرویس و اضطراری، هر دو از نوع کشویی، تخلیه کننده فوق طراحی گردیده است. بر اساس نظر طراح، تونل انحراف سمت چپ مسدود و از تونل انحراف میانی هوادهی جریان به پائین دست دریچه ها استفاده می گردد. تخلیه کننده عمقی مجرای به طول تقریبی ۱۱۹ متر از دو قسمت به طول تقریبی ۷۲/۸ متر و ۴۶/۲ متر به ترتیب در بالادست و پائین دست دریچه سرویس تشکیل می گردد. این مجرا با پوشش فلزی از محل ورودی شیپوری آن تا فاصله ای پائین دست دریچه سرویس ساخته شده است تا در مقابل خسارات ناشی از کاویتاسیون و اثرات سایشی جریان سریع آب مقاومت بیشتری داشته باشد. مدل فیزیکی سد گتوند علیا با مقیاس ۱:۱۷ در آزمایشگاه بخش سازه های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. در جدول (۴-۲) داده های تجربی شامل سه دسته و به ترتیب مربوط به هد آب ۲ متر، ۳ متر و ۳/۸۶ متر در مدل و بلافاصله بالادست دریچه اضطراری می باشند.

جدول (۴-۲): نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه اضطراری سد گتوند علیا

Opening [%]	Q_{water} [lit/sec]	Q_{air} [lit/sec]	β
۱۰	۴۲/۷۵۸۵	۴/۲۶۹۴	۰/۰۹۶۸
۲۰	۸۴/۶۴۲۳	۸/۳۴۳۹	۰/۱۱۵۶
۳۰	۱۰۷/۴۶۶۸	۱۴/۳۵۷۸	۰/۱۳۴۷
۴۰	۱۵۰/۷۶۲۴	۱۸/۵۸۹۶	۰/۱۲۳۴
۵۰	۲۱۲/۵۴۱۵	۲۲/۶۹۴۶	۰/۱۱۸۹
۶۰	۲۴۳/۷۶۱۲	۲۴/۱۴۶۷	۰/۰۵۷۳
۱۰	۵۳/۷۴۵۸	۱۲/۳۲۲۶	۰/۲۶۱۴
۲۰	۹۲/۲۴۹۶	۱۳/۲۲۴۹	۰/۱۵۷۲
۳۰	۱۴۵/۲۳۳۶	۱۸/۳۵۸۸	۰/۱۳۴۳
۴۰	۱۸۴/۷۱۱۷	۲۴/۸۴۴۶	۰/۱۴۷۶
۵۰	۲۶۸/۵۴۸۲	۲۶/۱۶۹۴	۰/۱۶۴۶
۶۰	۲۹۸/۴۷۳۳	۲۸/۴۱۹۱	۰/۰۴۷۸
۱۰	۶۴/۲۴۳۶	۱۵/۳۲۶۸	۰/۳۱۴۷
۲۰	۱۰۸/۴۲۹۵	۱۳/۴۶۷۲	۰/۱۴۶۵
۳۰	۱۵۴/۷۰۵۸	۱۸/۲۷۶۲	۰/۱۲۴۴
۴۰	۲۱۲/۴۶۳۸	۳۲/۱۵۸۳	۰/۱۶۹۲
۵۰	۲۸۱/۲۶۴۹	۳۲/۱۴۸۴	۰/۱۲۵۵
۶۰	۳۴۲/۷۷۲۴	۱۵/۶۴۷۶	۰/۰۵۲۸



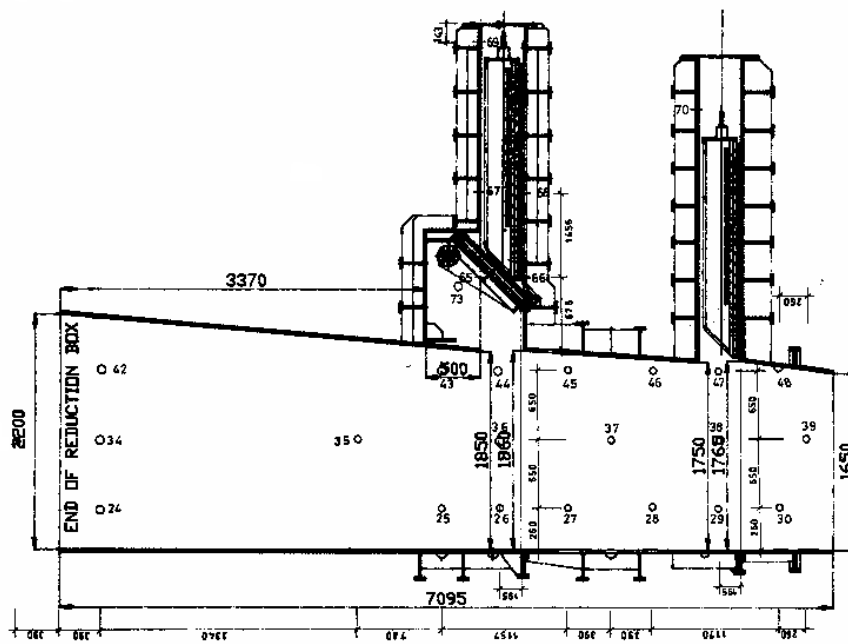
شکل (۴-۴): نتایج آزمایش‌های هوادهی مدل گتوند علیا در مقایسه با تحقیقات پیشین

نمودار شکل (۴-۴) تغییرات ضریب هوادهی جریان نسبت به عدد فرود بدست آمده از مدل گتوند علیا را نشان می‌دهد. در این نمودار داده‌های آزمایشگاهی با منحنی‌های محققان مختلف مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، نتایج هوادهی این مدل در محدوده بین دو منحنی روابط حد پایین کاویانپور و Campbel & Guyton قرار دارند. البته نحوه تغییرات ضریب هوادهی با منحنی‌های هیچ یک از روابط تطابقی ندارند.

۴-۵- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه‌کننده سد جره

سد جره جهت تامین نیازهای آبی و زیر کشت بردن اراضی دشت رامهرمز در ۳۵ کیلومتری شمال شرق این شهرستان بر روی رودخانه زردرود قرار دارد. مجرای تحتانی سد شامل دو دریاچه سرویس (۱/۵ متر $\times$ ۱/۸۵ متر) و دریاچه اضطراری (۱/۵ متر $\times$ ۱/۷۵ متر) از نوع کشویی می‌باشد. جهت بررسی مناطق کم فشاری که امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در آن می‌رود، مدل فیزیکی آن با مقیاس ۱:۱۳ در آزمایشگاه بخش سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب ساخته و مورد آزمایش

قرار گرفت. قطر هواده بعد از دریچه اضطراری در مدل برابر ۵۰ میلیمتر بود. در جدول (۳-۴) دسته نخست داده‌ها مربوط به هد آب ۵ متر و دسته دوم مربوط به هد آب ۷/۸ متر در مدل می‌باشند.

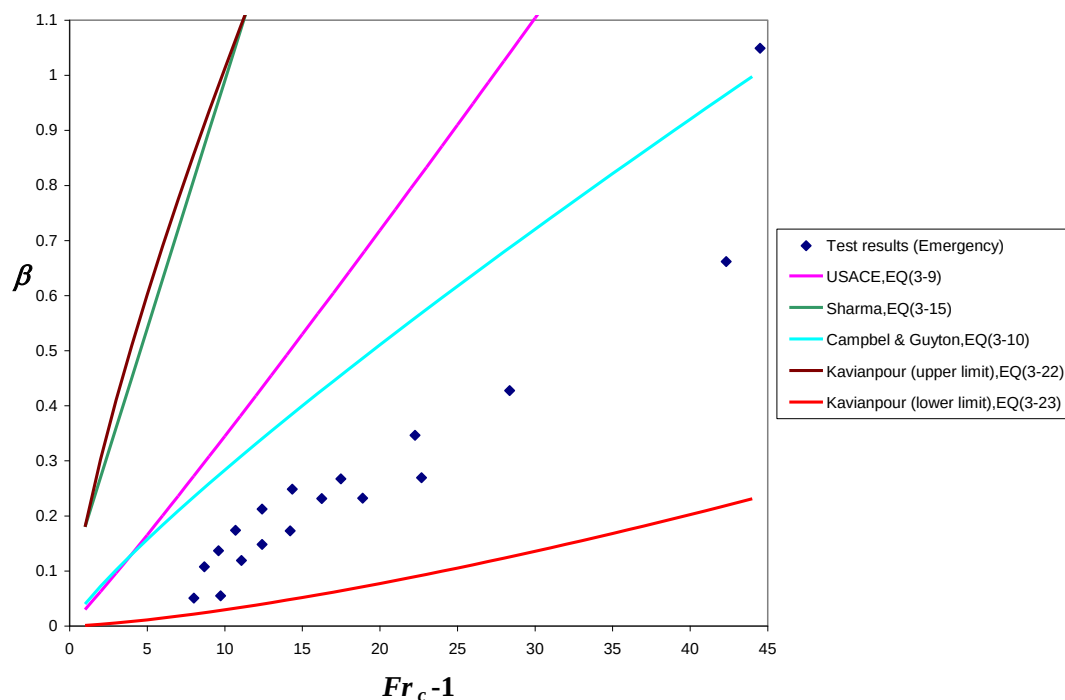


شکل (۴-۵): نقشه سازه‌ای مدل تونل سد جره

جدول (۳-۴) : نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه اضطراری سد جره

Opening [%]	$Q_{\text{water}}[\text{m}^3/\text{sec}]$	$Q_{\text{air}}[\text{m}^3/\text{sec}]$	β
۱۰	۱۰/۱۰	۶/۶۸۴۸	۰/۶۶۱۹
۲۰	۱۵/۴۰	۵/۳۳۲۵	۰/۳۴۶۳
۳۰	۲۲/۶۳	۶/۰۴۶۵	۰/۲۶۷۲
۴۰	۲۹/۲۵	۷/۲۶۷۱	۰/۲۴۸۴
۵۰	۳۶/۷۶	۷/۸۰۶۱	۰/۲۱۲۴
۶۰	۴۳/۳۸	۷/۵۴۱۶	۰/۱۷۳۸
۷۰	۵۱/۰۴	۶/۹۸۲۲	۰/۱۳۶۸
۸۰	۵۹/۲۰	۶/۳۷۳۷	۰/۱۰۷۷
۹۰	۶۸/۷۹	۳/۴۹۰۸	۰/۰۵۰۷
۱۰	۱۰/۶۱	۱۱/۱۳۱۳	۱/۰۴۹۱
۲۰	۱۹/۴۴	۸/۳۱۰۳	۰/۴۲۷۵
۳۰	۲۸/۹۹	۷/۸۰۶۱	۰/۲۶۹۳
۴۰	۳۷/۸۷	۸/۷۸۵۵	۰/۲۳۲۰
۵۰	۴۷/۳۰	۱۰/۹۴۷۲	۰/۲۳۱۴
۶۰	۵۶/۵۰	۹/۷۷۰۷	۰/۱۷۲۹
۷۰	۶۴/۵۸	۹/۵۶۰۶	۰/۱۴۸۰
۸۰	۷۳/۸۰	۸/۷۸۵۵	۰/۱۱۹۰
۹۰	۸۱/۹۷	۴/۵۰۶۸	۰/۰۵۵۰

نمودار شکل (۴-۶) تغییرات ضریب هوادهی جریان برای دریچه اضطراری مدل جره را نسبت به Fr_c^{-1} نشان می‌دهد. در این نمودار داده‌های آزمایشگاهی با منحنی‌های محققان مختلف مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، نتایج هوادهی دریچه اضطراری در محدوده بین دو منحنی روابط حد پایین کاوبانپور و Campbel & Guyton قرار دارند. نحوه تغییرات ضریب هوادهی با منحنی‌های هیچ یک از روابط تطابقی ندارند. ولی با منحنی رابطه Campbel & Guyton متناظر می‌باشد.

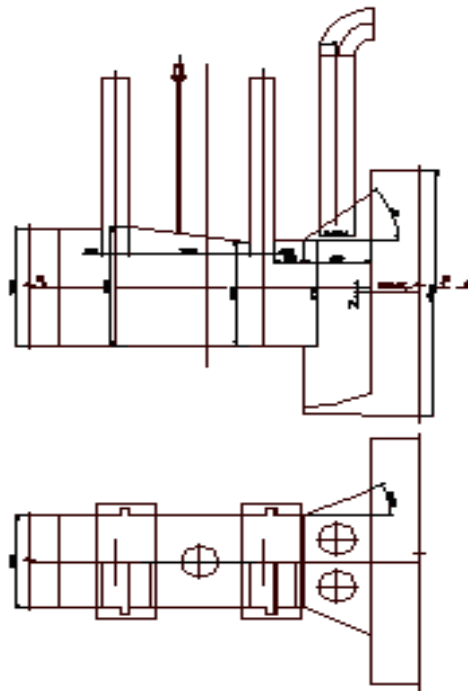


شکل (۴-۶): نتایج آزمایش‌های هوادهی مدل جره در مقایسه با تحقیقات پیشین

۴-۶- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه‌کننده سد البرز

سد البرز در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بابل بر روی رود بابل به منظور تامین نیازهای آبی پایین‌دست قرار دارد. تخلیه‌کننده عمقی این سد با دو دریچه اضطراری (از نوع کشویی به ابعاد ۱/۵ متر × ۲ متر) و سرویس (از نوع کشویی به ابعاد ۱/۵ متر × ۱/۸ متر) در تراز ۲۵۷ متر بالاتر از سطح دریا احداث می‌شود. این تخلیه‌کننده از کانالی با مقطع مستطیلی به طول ۲۵/۲ متر تشکیل شده که در انتهای تونلی به قطر ۴ متر قرار دارد و در پایین‌دست نیز به تونلی به قطر ۴ متر منتهی می‌گردد. در قسمت میانی تونل، سیستم کنترل شامل دریچه‌های کشویی قرار دارد و در پایین دست دریچه سرویس جریان به داخل تونل با قطر ۴ متر وارد می‌گردد. به منظور جلوگیری از وقوع پدیده کاویتاسیون هوادهایی در پایین دست دریچه‌ها به قطر ۰/۴۹ متر پیش‌بینی گردیده تا هوا به مقدار کافی به داخل جریان وارد گردد. مدل فیزیکی تونل تخلیه‌کننده با مقیاس ۱:۱۰ به منظور بررسی و حصول اطمینان از عملکرد هیدرولیکی مناسب دریچه‌های تخلیه‌کننده سد در آزمایشگاه

بخش سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب ساخته شد. در مدل البرز بعد از دریچه اضطراری یک هواده به قطر ۵۰ میلیمتر و بعد از دریچه سرویس دو هواده به قطرهای ۵۰ میلیمتر نصب شده بودند. در جداول (۴-۴) و (۵-۴) دسته نخست داده‌ها مربوط به هد آب بین ۵/۹۵ متر و ۷/۲ متر و دسته دوم مربوط به هد آب ۲ متر و دسته آخر مربوط به هد آب ۴ متر در مدل می‌باشند.



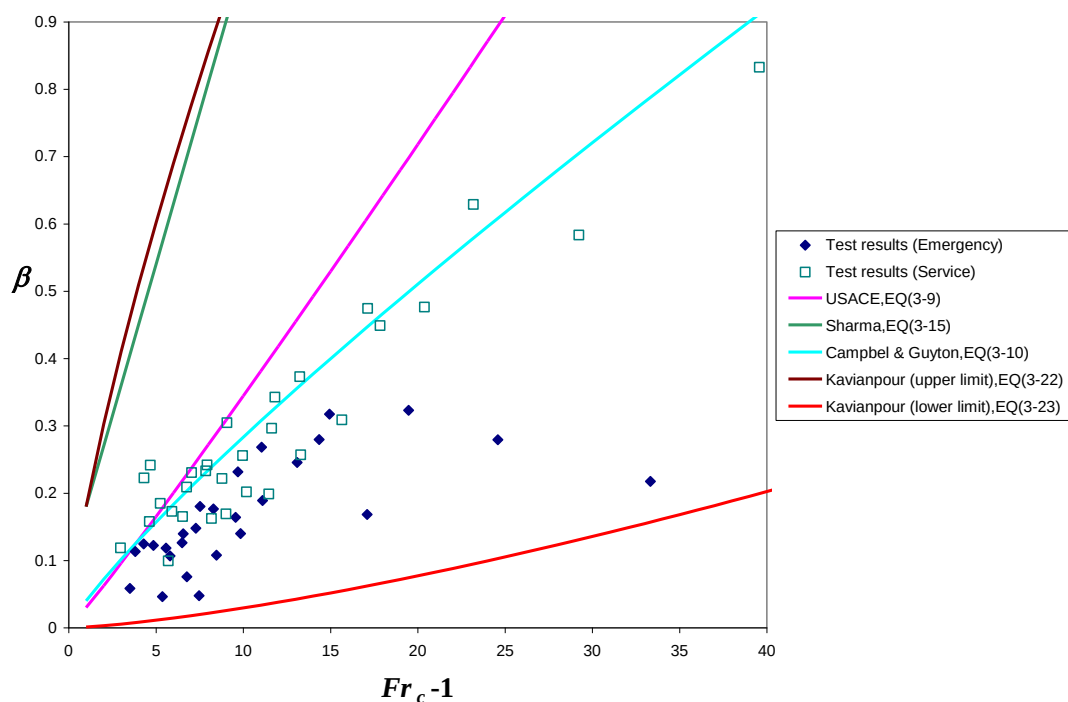
شکل (۴-۷): نقشه سازه‌ای مدل تونل سد البرز

جدول (۴-۴) : نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه اضطراری سد البرز

Opening [%]	$Q_{\text{water}}[\text{m}^3/\text{sec}]$	$Q_{\text{air}}[\text{m}^3/\text{sec}]$	β
۱۰	۸/۳۳۲۷	۱/۸۱۱۶	۰/۲۱۷۴
۲۰	۱۴/۱۱۰۶	۴/۵۵۹۴	۰/۳۲۳۱
۳۰	۲۰/۳۰۸۷	۶/۴۴۸۰	۰/۳۱۷۵
۴۰	۲۷/۹۱۹۸	۶/۸۵۹۲	۰/۲۴۵۷
۵۰	۳۴/۵۴۹۴	۶/۵۳۲۴	۰/۱۸۹۱
۶۰	۴۰/۷۸۴۸	۶/۶۹۷۸	۰/۱۶۴۲
۷۰	۴۷/۴۶۲۱	۵/۱۲۴۴	۰/۱۰۸۰
۸۰	۵۳/۸۷۱۸	۲/۵۶۲۲	۰/۰۴۷۶
۹۰	۶۱/۷۲۵۰	۴/۶۷۷۹	۰/۰۷۵۸
۱۰	۴/۳۹۱۷	۰/۷۳۹۵	۰/۱۶۸۴
۲۰	۷/۴۷۸۶	۱/۰۴۵۹	۰/۱۳۹۹
۳۰	۱۰/۸۵۵۵	۱/۹۵۷۰	۰/۱۸۰۳
۴۰	۱۴/۹۷۷۳	۲/۰۹۲۰	۰/۱۳۹۷
۵۰	۱۸/۷۳۷۱	۲/۲۱۸۹	۰/۱۱۸۴
۶۰	۲۲/۶۲۳۴	۲/۷۶۷۴	۰/۱۲۲۳
۷۰	۲۶/۵۳۲۱	۳/۳۰۷۸	۰/۱۲۴۷
۸۰	۳۰/۵۹۷۱	۳/۴۶۹۲	۰/۱۱۳۴
۹۰	۳۵/۷۸۶۴	۲/۰۹۲۰	۰/۰۵۸۵
۱۰	۶/۲۱۰۸	۱/۷۳۴۶	۰/۲۷۹۳
۲۰	۱۰/۵۷۶۴	۲/۹۵۸۶	۰/۲۷۹۷
۳۰	۱۵/۳۵۲۰	۴/۱۱۸۱	۰/۲۶۸۲
۴۰	۲۱/۱۸۱۲	۴/۹۰۶۳	۰/۲۳۱۶
۵۰	۲۶/۴۹۸۲	۴/۶۷۷۹	۰/۱۷۶۵
۶۰	۳۱/۹۹۴۳	۴/۷۳۶۰	۰/۱۴۸۰
۷۰	۳۷/۵۲۲۱	۴/۷۲۴۵	۰/۱۲۶۲
۸۰	۴۳/۲۷۰۸	۴/۶۱۹۰	۰/۱۰۶۷
۹۰	۵۰/۶۰۹۶	۲/۳۳۸۹	۰/۰۴۶۲

جدول (۴-۵): نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه سرویس سد البرز

Opening [%]	$Q_{\text{water}} [\text{m}^3/\text{sec}]$	$Q_{\text{air}} [\text{m}^3/\text{sec}]$	β
۱۰	۸/۳۳۲۷	۶/۹۳۸۴	۰/۸۳۲۷
۲۰	۱۴/۱۱۰۶	۸/۸۷۵۷	۰/۶۲۹۰
۳۰	۲۰/۳۰۸۷	۹/۱۱۸۸	۰/۴۴۹۰
۴۰	۲۷/۹۱۹۸	۸/۶۲۵۶	۰/۳۰۸۹
۵۰	۳۴/۵۴۹۴	۸/۸۷۵۷	۰/۲۵۶۹
۶۰	۴۰/۷۸۴۸	۸/۱۰۲۳	۰/۱۹۸۷
۷۰	۴۷/۴۶۲۱	۹/۵۸۶۹	۰/۲۰۲۰
۸۰	۵۳/۸۷۱۸	۹/۱۱۸۸	۰/۱۶۹۳
۹۰	۶۱/۷۲۵۰	۱۰/۰۳۲۹	۰/۱۶۲۵
۱۰۰	۶۹/۸۳۴۹	۶/۹۳۸۴	۰/۰۹۹۴
۱۰	۴/۳۹۱۷	۲/۰۹۱۷	۰/۴۷۶۳
۲۰	۷/۴۷۷۶	۲/۵۶۲۴	۰/۳۴۲۶
۳۰	۱۰/۸۵۵۵	۳/۳۰۷۷	۰/۳۰۴۷
۴۰	۱۴/۹۷۷۳	۳/۶۲۳۳	۰/۲۴۱۹
۵۰	۱۸/۷۳۷۱	۳/۹۱۴۰	۰/۲۰۸۹
۶۰	۲۲/۶۲۳۴	۳/۹۱۴۰	۰/۱۷۳۰
۷۰	۲۶/۵۳۲۱	۴/۹۰۶۳	۰/۱۸۴۹
۸۰	۳۰/۵۹۷۱	۷/۳۹۶۴	۰/۲۴۱۷
۹۰	۳۵/۷۵۶۴	۷/۹۶۶۲	۰/۲۲۲۶
۱۰۰	۴۱/۳۳۶۶	۴/۹۰۶۳	۰/۱۱۸۶
۱۰	۶/۲۱۰۸	۳/۶۲۳۳	۰/۵۸۳۴
۲۰	۱۰/۵۷۶۴	۵/۰۱۶۷	۰/۴۷۴۳
۳۰	۱۵/۳۵۲۰	۵/۷۲۹۳	۰/۳۷۳۲
۴۰	۲۱/۱۸۱۲	۶/۲۷۵۹	۰/۲۹۶۳
۵۰	۲۶/۴۹۸۲	۶/۷۷۸۹	۰/۲۵۵۸
۶۰	۳۱/۹۹۴۳	۷/۰۹۴۵	۰/۲۲۱۷
۷۰	۳۷/۵۲۲۱	۸/۷۵۱۵	۰/۲۳۳۲
۸۰	۴۳/۲۷۰۸	۹/۹۷۸۴	۰/۲۳۰۶
۹۰	۵۰/۶۰۹۶	۸/۳۶۸۲	۰/۱۶۵۳
۱۰۰	۵۸/۵۰۱۳	۹/۲۳۸۰	۰/۱۵۷۹



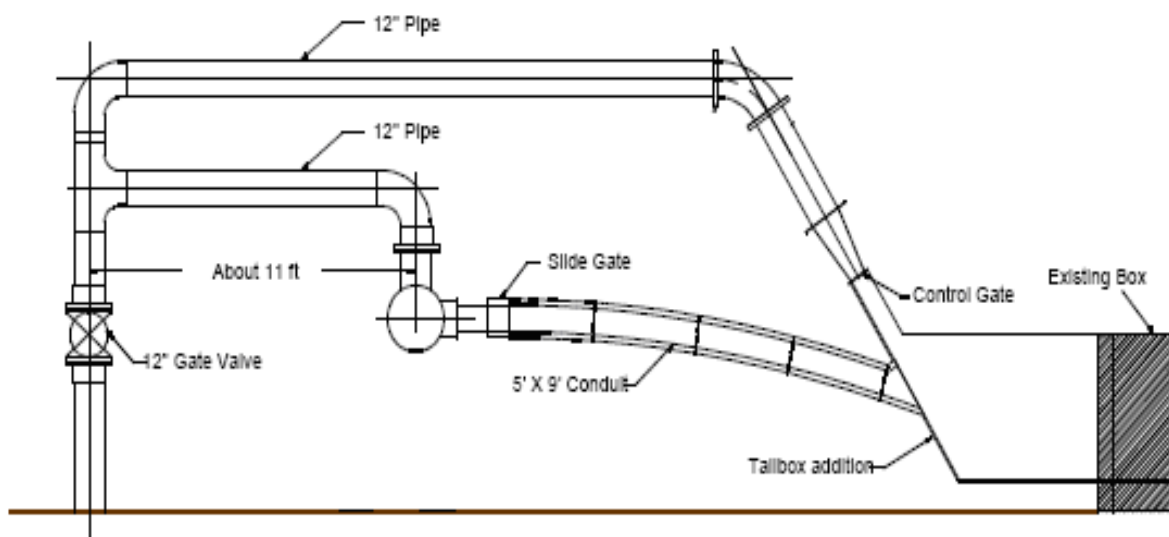
شکل (۴-۸): نتایج آزمایشهای هوادهی مدل البرز در مقایسه با تحقیقات پیشین

نمودار شکل (۴-۸) تغییرات ضریب هوادهی جریان برای دریاچه‌های سرویس و اضطراری مدل البرز را نسبت به $Fr_c - 1$ نشان می‌دهد. در این نمودار داده‌های آزمایشگاهی با منحنی‌های محققان مختلف مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، نتایج هوادهی مدل البرز برای دریاچه اضطراری با منحنی‌ها مطابقت ندارد ولی برای دریاچه سرویس مطابقتی بین داده‌ها و منحنی رابطه Campbel & Guyton دیده می‌شود. البته کلیه نتایج بالای منحنی رابطه حد پایین کاویانپور قرار دارند.

۴-۷- مدل هیدرولیکی تونل تخلیه‌کننده سد Folsom

سد مخزنی Folsom بر روی رودخانه American در ۳۰ کیلومتری شمال غربی ساکرامنتو در ایالت کالیفرنیا آمریکا واقع شده است. این سد سازه بتنی وزنی به ارتفاع حدود ۱۰۳/۶ متر می‌باشد و دارای

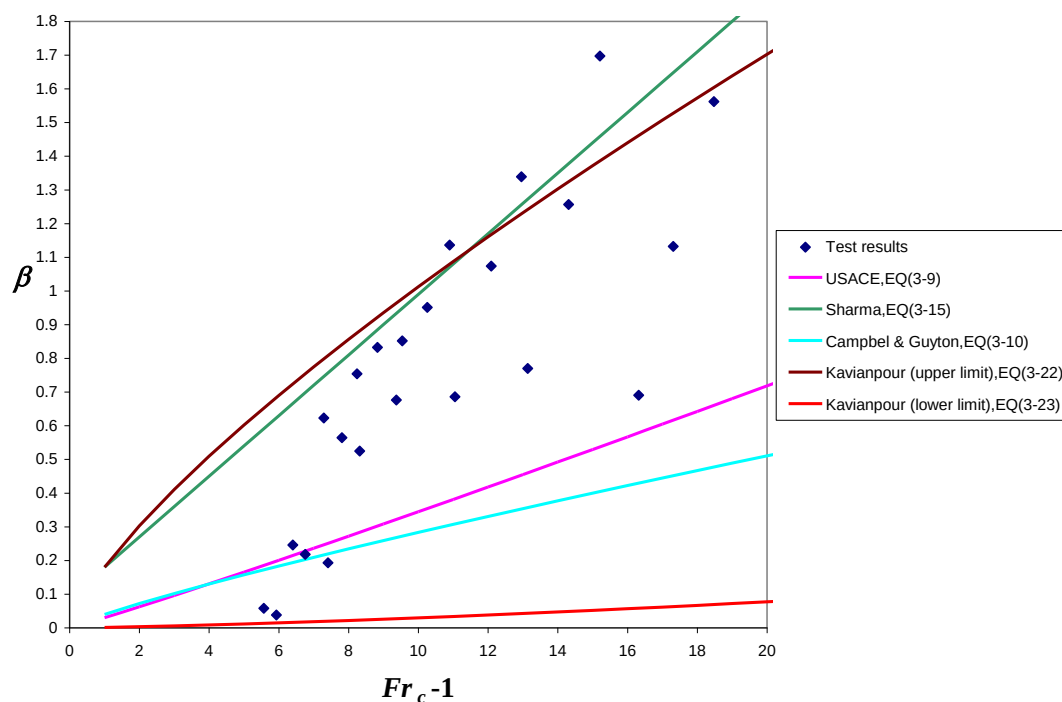
چهار مجرای تخلیه‌کننده تحتانی به ابعاد $1/52$ متر در $2/74$ متر است که هر یک با دریچه‌ای کشویی به همان ابعاد کنترل می‌گردد. شکل (۳-۲) پروفیل طولی سد Folsom و تونل‌های تخلیه‌کننده واقع در بدنه سد را نشان می‌دهد. در طی سالهای ۱۹۵۵ تا ۱۹۹۷ تخریب کاویتاسیون ناشی از سیلاب‌ها در این تخلیه‌کننده‌ها سبب انجام تعمیرات مکرر و گاه تغییرات جزئی گردید و در نهایت برای جلوگیری از وقوع مجدد خرابی‌ها، USBR در سال ۱۹۹۸ مدل فیزیکی سد مذکور را با مقیاس ۱:۱۲ ساخته و مورد آزمایش قرار داد و اصلاحاتی را در مجرای جریان بلافاصله پایین‌دست دریچه پیشنهاد نمود تا هوای ورودی از هواده در عمق جریان پخش گردد. میزان دبی هوای ورودی به مجرا در حالت‌های مختلف بازشدگی دریچه برای سه هد مختلف در جدول (۴-۶) ارائه شده است. در این جدول دسته نخست داده‌ها مربوط به هد آب $10/16$ متر و دسته دوم مربوط به هد آب $10/80$ متر و دسته آخر مربوط به هد آب $11/43$ متر در مدل می‌باشند.



شکل (۴-۹) : نمایی از مدل سد Folsom و تجهیزات جنبی دیگر

جدول (۴-۶): نتایج آزمایشگاهی هوادهی دریچه کنترل سد Folsom

Opening [%]	$Q_{\text{water}}[\text{m}^3/\text{sec}]$	$Q_{\text{air}}[\text{m}^3/\text{sec}]$	β
۲۰	۲۱/۰۳۵۲	۱۴/۵۲۶۰	۰/۶۹۰۶
۳۰	۳۱/۷۵۵۰	۲۴/۴۵۵۲	۰/۷۷۰۱
۴۰	۴۲/۰۷۰۳	۲۸/۸۶۸۲	۰/۶۸۶۲
۵۰	۵۲/۱۸۳۴	۳۵/۳۰۳۸	۰/۶۷۶۵
۶۰	۶۲/۹۰۳۲	۴۷/۴۳۹۴	۰/۷۵۴۲
۷۰	۷۳/۲۱۸۶	۴۵/۶۰۰۷	۰/۶۲۲۸
۸۰	۸۲/۹۲۷۱	۲۰/۳۷۵۸	۰/۲۴۵۷
۹۰	۹۲/۰۲۸۹	۵/۳۳۲۳	۰/۰۵۷۹
۲۰	۲۲/۲۴۸۷	۲۵/۱۹۰۷	۱/۱۳۲۲
۳۰	۳۴/۳۸۴۴	۴۳/۲۱۰۴	۱/۲۵۶۷
۴۰	۴۵/۷۱۱۰	۴۹/۰۹۴۳	۱/۰۷۴۰
۵۰	۵۶/۶۳۳۱	۵۳/۸۷۵۱	۰/۹۵۱۳
۶۰	۶۶/۹۴۸۵	۵۵/۷۱۳۸	۰/۸۳۲۲
۷۰	۷۷/۸۷۰۶	۴۳/۹۴۵۹	۰/۵۶۴۳
۸۰	۸۶/۹۷۲۴	۱۸/۹۳۹۰	۰/۲۱۷۸
۹۰	۹۷/۰۸۵۴	۳/۶۷۷۵	۰/۰۳۷۹
۲۰	۲۳/۶۶۴۶	۳۶/۹۵۸۷	۱/۵۶۱۸
۳۰	۳۶/۴۰۷۱	۶۱/۷۸۱۶	۱/۶۹۷۰
۴۰	۴۸/۷۴۵۰	۶۵/۲۷۵۲	۱/۳۳۹۱
۵۰	۵۹/۸۶۹۴	۶۸/۰۳۳۳	۱/۱۳۶۴
۶۰	۷۱/۸۰۲۸	۶۱/۱۳۸۱	۰/۸۵۱۵
۷۰	۸۲/۳۲۰۳	۴۳/۲۱۰۴	۰/۵۲۴۹
۸۰	۹۴/۲۵۳۷	۱۸/۲۰۳۵	۰/۱۹۳۱



شکل (۴-۱۰): نتایج آزمایش‌های هوادهی مدل Folsom در مقایسه با تحقیقات پیشین

شکل (۴-۱۰) تغییرات ضریب هوادهی جریان برای دریچه کنترل مدل Folsom را نسبت به $Fr_c - 1$ نشان می‌دهد. در این نمودار داده‌های آزمایشگاهی با منحنیهای محققان مختلف مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، نتایج هوادهی مدل Folsom به استثنا سه مورد پایین منحنی روابط حد بالای کاویانپور و Sharma و همگی بالای منحنی رابطه حد پایین کاویانپور قرار دارند. نحوه تغییرات ضریب هوادهی با منحنیهای هیچ یک از روابط تطابقی ندارند.

۴-۸- روش اندازه‌گیری داده‌های تجربی

پارامترهای مورد اندازه‌گیری در یک سری آزمایش شامل دبی آب (Q_w)، دبی جریان هوا در هواده (Q_{av})، درصد بازشدگی دریچه اضطراری (E)، درصد بازشدگی دریچه سرویس (S) و هد کل بالادست دریچه (H_t) یا هد فشار بالادست دریچه (H_p) می‌باشند.

برای دستیابی به پارامترهای مزبور در یک سری آزمایش، در ابتدا دریچه‌ها در وضعیت مورد نظر قرار داده می‌شوند. سپس با کنترل دبی آب ورودی به مخزن (در خصوص مدل گتوند علیا) یا خروجی از مخزن (در خصوص مدل ژاوه) بوسیله شیرفلکه‌ها، هد آب مورد نیاز در مخزن یا هد فشار مورد نظر در محلی معین از طول تونل تامین می‌گردد. این هدها بوسیله پیزومترهایی که در محل‌های مذکور نصب شده‌اند، قرائت می‌شوند. بعد از اطمینان از تثبیت هد و دبی آب عبوری از مدل، افت فشار در هواده بوسیله پیزومتر نصب شده بر روی آن و یک مانومتر کج اندازه‌گیری می‌گردد. لازم به ذکر است که در ورودی مجرای هواده یک دهانه شیپوری برای کاهش افت ورودی و منظم گشتن خطوط جریان در هواده قرار داده می‌شود. با استفاده از افت فشار بدست آمده در هواده و استفاده از رابطه برنولی، سرعت و سپس دبی جریان هوا در هواده محاسبه می‌گردد.

آب خروجی از مدل‌ها وارد حوضچه آرامش می‌گردد. در انتهای حوضچه آرامش دو کانال عریض و طولانی قرار دارد که در ورودی آنها با استفاده از مستهلک کننده‌هایی سعی می‌شود تا جریان نسبتاً آرامی وارد آنها شود. به منظور اندازه‌گیری دبی جریان در انتهای هر کانال سرریز مستطیلی لبه تیزی که بر اساس استانداردهای معمول ساخته شده، نصب گشته است. در فاصله‌ای معین از سرریزها ارتفاع آب بوسیله لیمینیمترها قرائت می‌گردند. با استفاده از ارتفاعهای بدست آمده و منحنی دبی-اشل سرریز، دبی آب عبوری از هر کانال محاسبه می‌گردد. از مجموع دبی کانال‌ها، دبی آب عبوری از مدل حاصل می‌شود. منحنی دبی-اشل بر اساس رابطه دبی عبوری از سرریزهای اندازه‌گیری لبه تیز بدست می‌آید.

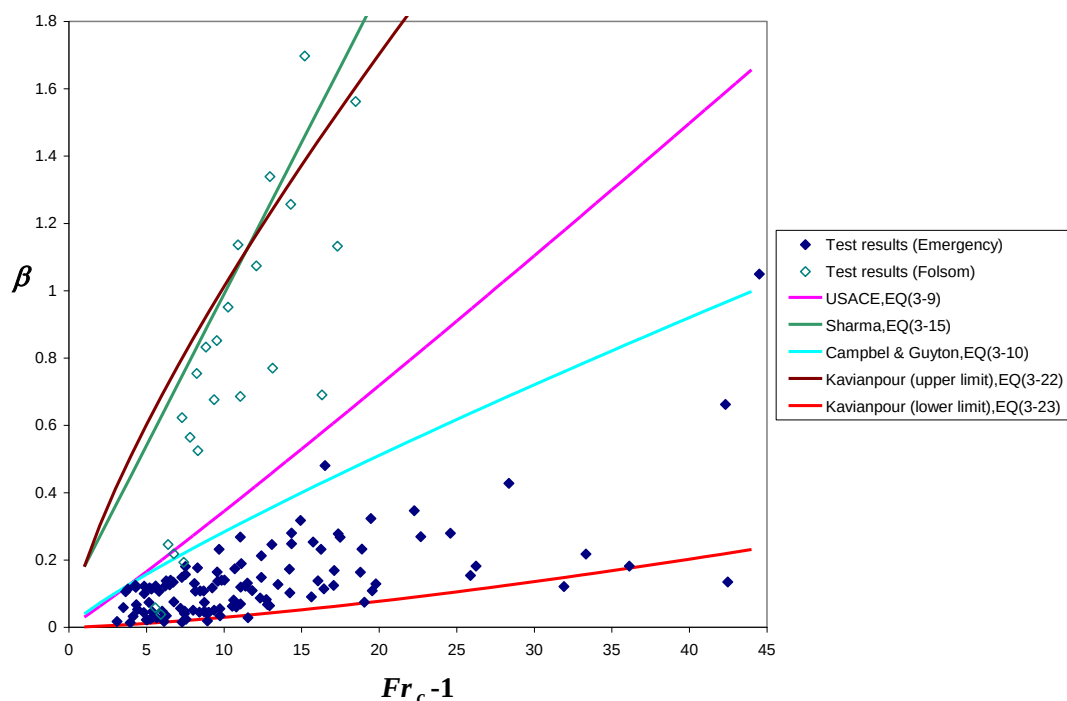
شایان ذکر است که بعلت آشفستگی بالای جریان در مدل‌ها، پارامترهایی که قرائت می‌شوند، دائماً در حال نوسان هستند و به همین علت دو مقدار ماکزیمم و مینیمم برای آنها یادداشت می‌گردد. در این پایان‌نامه مقدار میانگین این دو حد ملاک عمل می‌باشد.

۴-۹- جمع‌بندی نتایج اندازه‌گیری

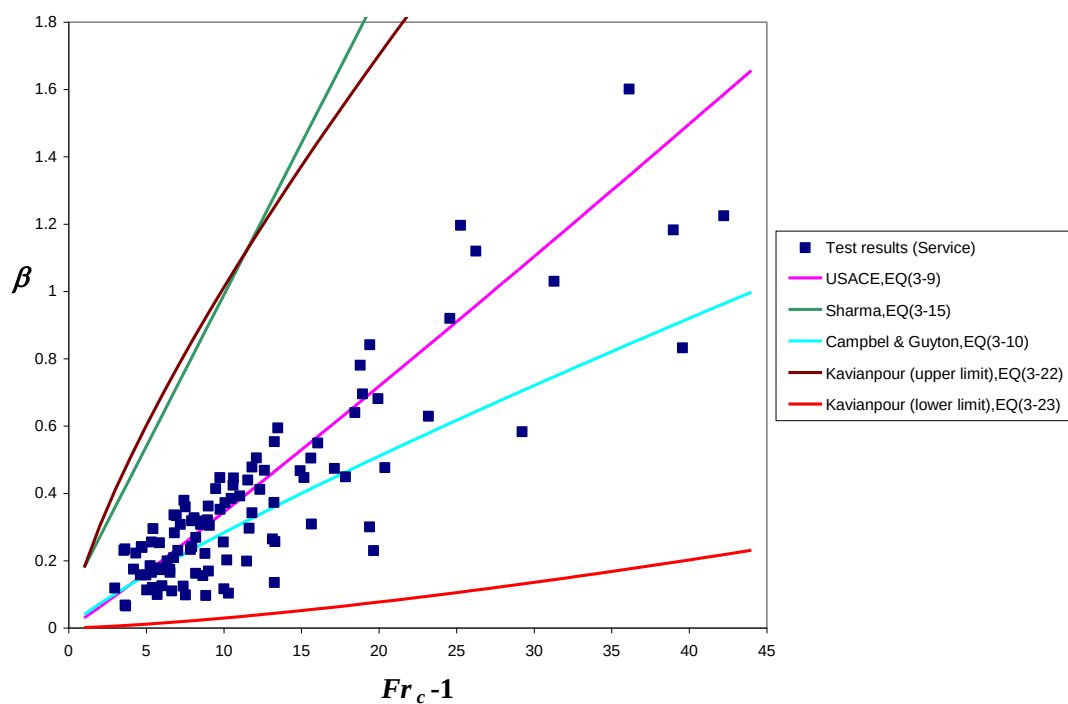
همانطور که در بخش‌های قبلی این فصل مشاهده شد برای تونلهایی با شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف، روابط تحقیقات پیشین دارای اختلافاتی با داده‌های تجربی مدل هستند. ممکن است که منحنی یک رابطه برای داده‌های چند مدل به‌منزله پوش بالایی باشد ولی در مدل‌های دیگر این امر صادق نباشد. برخی از روابط نیز نتایج بسیار بالایی نسبت به داده‌های تجربی ارائه می‌دهند که با استفاده از آنها در طراحی، هوادهایی با قطرهای خیلی بزرگ بدست خواهند آمد که خیلی محافظه‌کارانه و نیز هزینه‌بر خواهند بود. البته رابطه حد پایین کاویانپور در اکثر موارد برای مدل‌های مختلف ویژگی خود را حفظ نموده است. از طرف دیگر نحوه تغییرات ضریب هوادهی نیز با منحنی‌های این روابط جز در چند مورد معدود، مطابقت ندارند.

با بررسی داده‌های مندرج در جداول بخش‌های قبل و نمودارهای مربوطه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای دریچه‌های اضطراری و سرویس دو مکانیزم هوادهی متفاوت وجود دارد. ضریب هوادهی و دبی هوا در داده‌های مربوط به دریچه‌های سرویس در یک مدل نسبت به دریچه اضطراری بیشتر است و ماکزیمم دبی هوا در این دو حالت در بازشدگی‌های متفاوت دریچه اتفاق می‌افتد یعنی محدوده ۵۰٪ تا ۷۰٪ برای دریچه اضطراری و محدوده ۸۰٪ تا ۱۰۰٪ برای دریچه سرویس. این اختلاف به دلیل تفاوت نحوه هواگیری جت آب خروجی از دریچه‌ها می‌باشد. در پایین‌دست دریچه اضطراری به‌علت هندسه تونل، جت از یک وجه و پایین‌دست دریچه سرویس به علت بازشدگی مجرا، جت از چهار وجه هواگیری می‌نماید که این مطلب مؤید نتایج کاویانپور (۱۳۷۹) می‌باشد. در خصوص داده‌های مدل Folsom که تنها یک دریچه دارد، با توجه به عدم تغییر ابعاد تونل در پایین‌دست

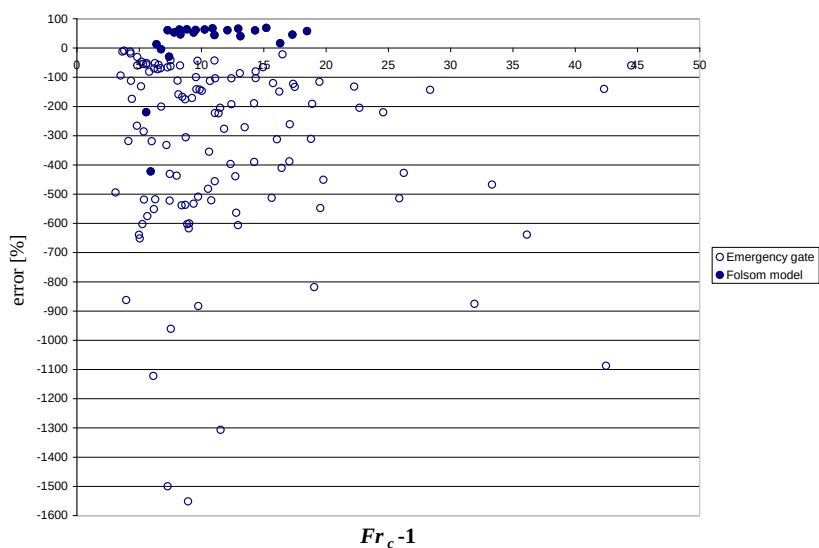
دریچه، جت آب خروجی از دریچه از یک وجه هواگیری می‌نماید. به همین دلیل در ادامه بررسی‌ها، داده‌های مربوط به مدل Folsom با داده‌های مربوط به دریچه اضطراری سایر مدل‌ها ترکیب شده‌اند. برای آنکه دیدی از خطاهای روابط تحقیقات پیشین بدست آید در نمودارهای شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) به ترتیب کل داده‌های دریچه‌های اضطراری و دریچه‌های سرویس با منحنی‌های روابط پیشین مقایسه شده و در نمودارهای شکل‌های (۴-۱۳) الی (۴-۲۲) درصد خطای این روابط برای داده‌های تجربی موجود رسم شده‌اند. با توجه به نمودار شکل (۴-۱۱) مشاهده می‌شود که داده‌های دریچه اضطراری بین منحنی‌های روابط حد پایین کاویانپور و Campbel & Guyton قرار دارند و پراکندگی داده‌های مدل Folsom بعلت هندسه خاص آن با پراکندگی داده‌های دریچه اضطراری سایر مدل‌ها همخوانی ندارد و حد بالای آن تقریباً منحنی‌های روابط Sharma و کاویانپور می‌باشد. نمودار شکل (۴-۱۲) نشانگر آن است که داده‌های دریچه سرویس حول منحنی‌های روابط Campbel & Guyton و USACE پخش شده‌اند.



شکل (۴-۱۱) : مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه اضطراری مدل‌ها و دریچه کنترل مدل Folsom با تحقیقات پیشین

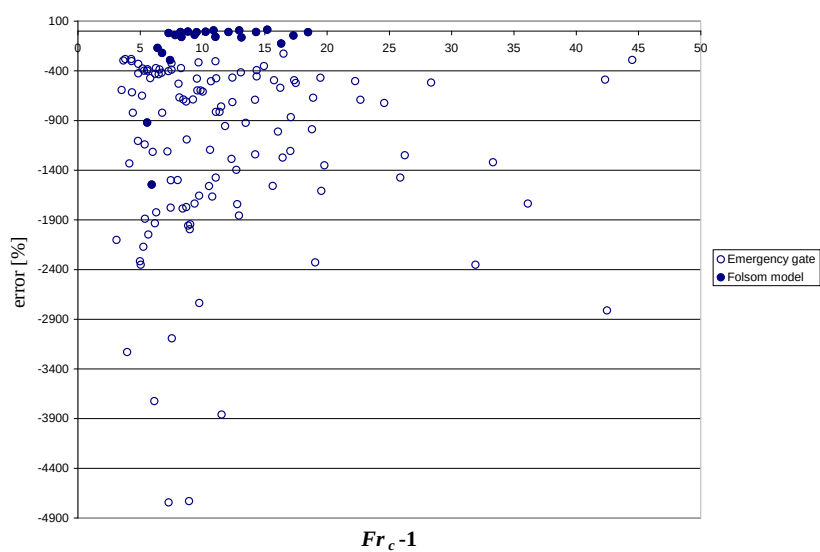


شکل (۴-۱۲): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریاچه سرویس مدل‌ها با تحقیقات پیشین



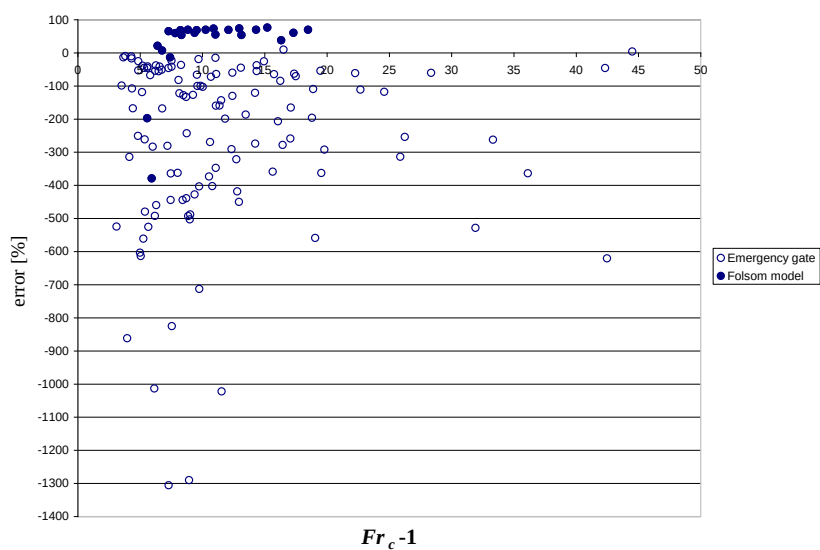
شکل (۴-۱۳): نمودار درصد خطای رابطه USACE

برای نتایج آزمایشات دریاچه اضطراری مدل‌ها و دریاچه کنترل مدل Folsom



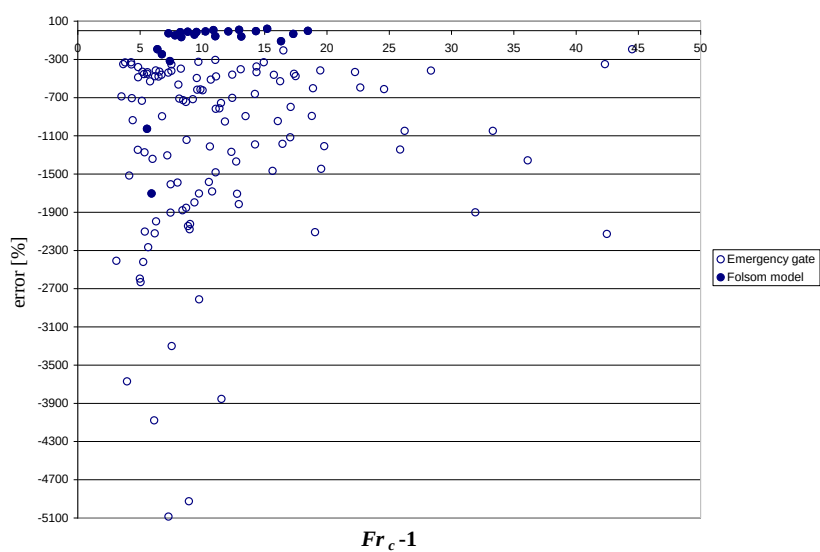
شکل (۴-۱۴) : نمودار درصد خطای رابطه Sharma

برای نتایج آزمایشات دریچه اضطراری مدل ها و دریچه کنترل مدل Folsom



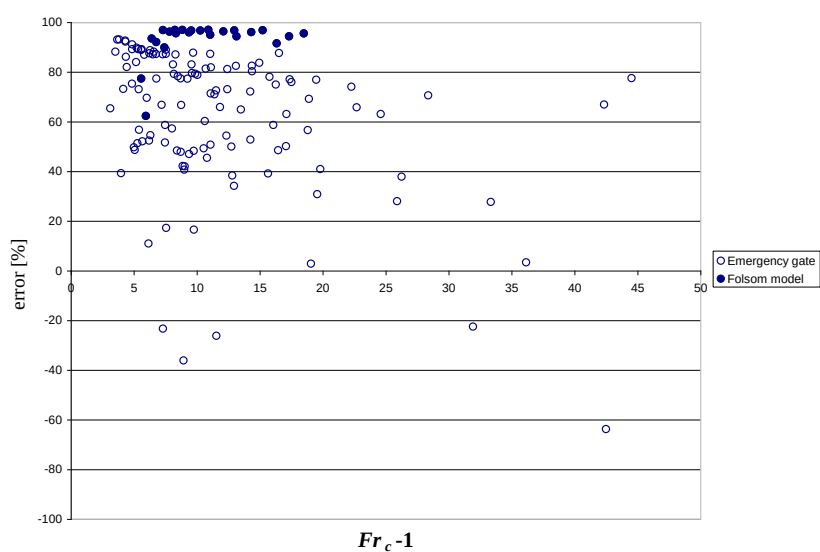
شکل (۴-۱۵) : نمودار درصد خطای رابطه Cambpel & Guyton

برای نتایج آزمایشات دریچه اضطراری مدل ها و دریچه کنترل مدل Folsom



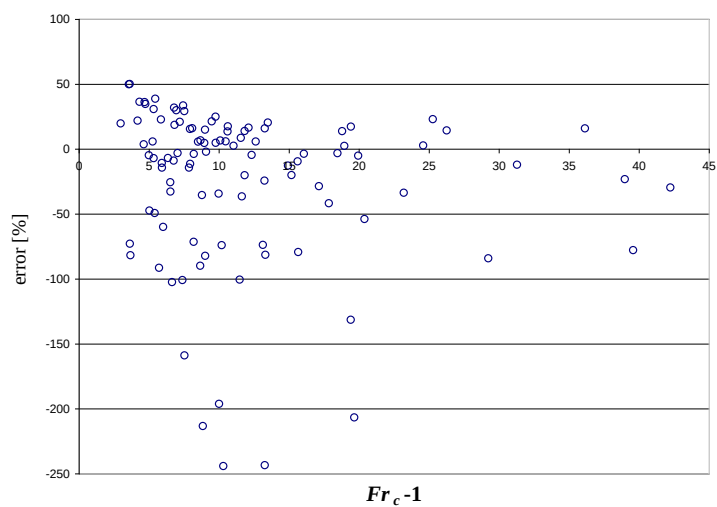
شکل (۴-۱۶) : نمودار درصد خطای رابطه کایانیپور (حد بالا)

برای نتایج آزمایشات دریچه اضطراری مدل‌ها و دریچه کنترل مدل Folsom

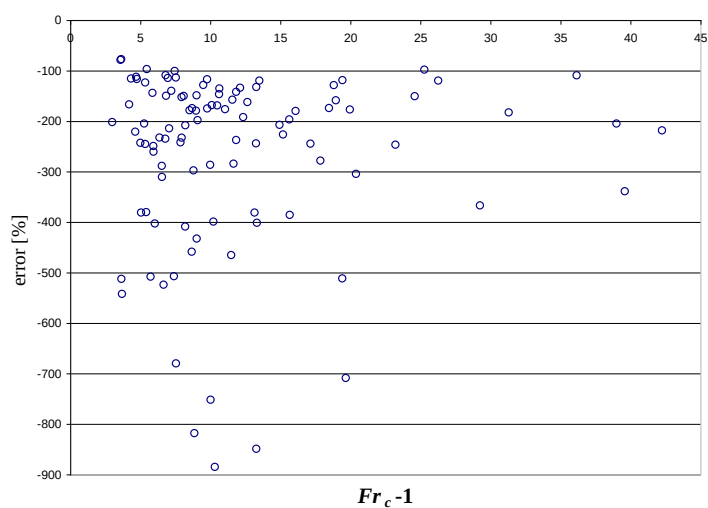


شکل (۴-۱۷) : نمودار درصد خطای رابطه کایانیپور (حد پایین)

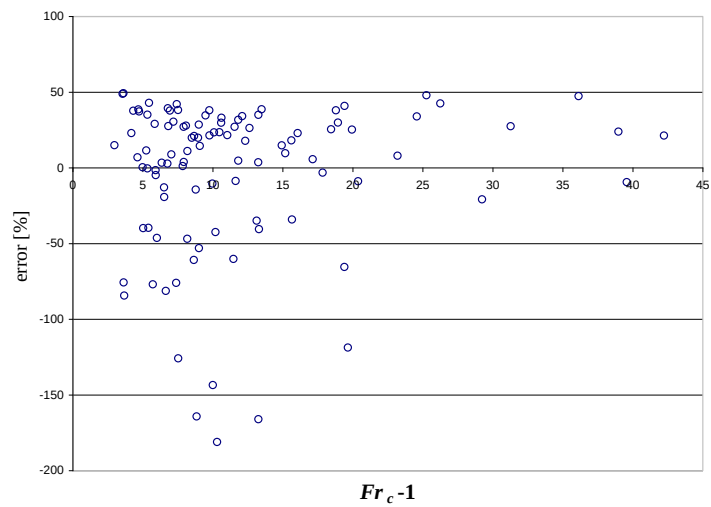
برای نتایج آزمایشات دریچه اضطراری مدل‌ها و دریچه کنترل مدل Folsom



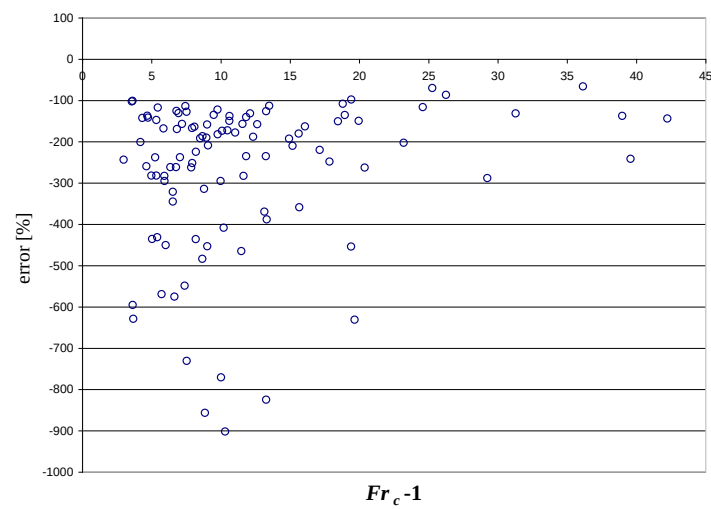
شکل (۴-۱۸): نمودار درصد خطای رابطه USACE برای نتایج آزمایشات دریاچه سرویس مدل‌ها



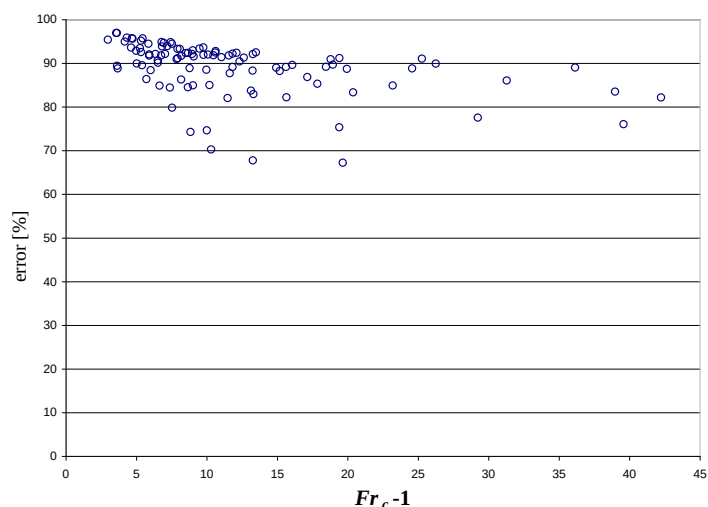
شکل (۴-۱۹): نمودار درصد خطای رابطه Sharma برای نتایج آزمایشات دریاچه سرویس مدل‌ها



شکل (۴-۲۰) : نمودار درصد خطای رابطه Cambpel & Guyton برای نتایج آزمایشات دریچه سرویس مدل‌ها



شکل (۴-۲۱) : نمودار درصد خطای رابطه کاویانپور (حد بالا) برای نتایج آزمایشات دریچه سرویس مدل‌ها



شکل (۴-۲۲) : نمودار درصد خطای رابطه کاویانپور (حد پایین) برای نتایج آزمایشات دریچه سرویس مدل‌ها

در نمودارهای شکلهای (۴-۱۳) الی (۴-۱۷) بصورت جداگانه درصد خطای هر رابطه برای داده‌های دریچه کنترل مدل Folsom و داده‌های مربوط به دریچه اضطراری سایر مدل‌ها نشان داده شده است. در نمودارهای شکل‌های (۴-۱۸) الی (۴-۲۲) درصد خطای هر رابطه برای داده‌های مربوط به دریچه سرویس مدل‌ها نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌گردد، روابط دارای خطاهای زیادی هستند. از این میان برای دریچه اضطراری رابطه کاویانپور (حد پایین) و برای دریچه سرویس روابط USACE و Cambpel & Guyton کمترین خطا را دارند. لازم به ذکر است که منحنی پوش باید نتیجه‌ای منطقی ارائه دهد تا بصورت مناسب در طراحی استفاده گردد و برای آنکه روابط حد بالایی دارای اعتبار باشند، آنها باید برای داده‌های تجربی مختلف در حد امکان خطای مثبت نداشته و نیز خطاهای منفی پایینی داشته باشند. با توجه به نمودارهای خطا فوق مشاهده می‌گردد که بعضاً خطای منفی برای منحنی‌های پوش ماکزیمم خیلی زیاد هستند و در مواردی روابط دارای خطاهای مثبت هستند.

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته نتیجه‌گیری می‌شود که در صورت استفاده از روابط فوق در طراحی، ممکن است برای شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوتی نتیجه حاصل طرحی خیلی

محافظه کارانه و هزینه بر باشد. به همین دلیل در فصل بعدی سعی شده با تحلیل نتایج تجربی روابطی برای مکانیزم های مختلف هوادهی ارائه گردد که با ماهیت پدیده مطابقت بیشتری داشته باشد و خطاها در محدوده قابل قبولی قرار گیرند. بعلاوه آنکه بتوان از آنها در تخلیه کننده های مختلف با شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت استفاده نمود.

فصل پنجم:

نتایج تحلیل داده‌های آزمایشگاهی

۵-۱- اهداف تحلیل داده‌ها

در این تحقیق به منظور بررسی نقش هواده‌ها در تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها، میزان هواده‌ی جریان از طریق آنها در پایین‌دست دریچه‌های تخلیه‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است و ملاک این بررسی، ضریب هواده‌ی (β) می‌باشد. جهت نیل به این هدف مجموعه آزمایشاتی در موسسه تحقیقات آب ایران برنامه‌ریزی گردید و از طرف دیگر سعی گشت تا اطلاعات موجود از سایر منابع نیز جهت تکمیل اطلاعات لازم برای این تحلیل جمع‌آوری و دسته‌بندی گردد. با توجه به تحقیقات قبلی انجام گرفته و تاثیر عملکرد دریچه‌ها بر میزان هواده‌ی، ارزیابی میزان هواده‌ی هواده‌ها در مدل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها به دو بخش اصلی پایین‌دست یک دریچه و بین دو دریچه تقسیم گردید. در ارتباط با هواده‌ی پایین‌دست یک دریچه با توجه به تحقیقات پیشین و بررسی‌های انجام شده بر داده‌های تجربی موجود (فصل چهارم)، به علت وجود دو مکانیزم حاکم بر سیستم هواده‌ی، این بخش نیز به دو قسمت هواده‌ی پایین‌دست یک دریچه بدون افزایش سطح مقطع تونل در پایین‌دست و هواده‌ی پایین‌دست یک دریچه با افزایش سطح مقطع تونل در پایین‌دست تقسیم گشت. در حالت اول هوا صرفاً از ناحیه بالای جت وارد جریان آب می‌گردد ولی در حالت دوم جت از چهار طرف هواده‌ی می‌شود.

در ارتباط با ارزیابی روابط پیشنهادی محققان مختلف، با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در فصل چهارم، دقت این روابط بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی حاضر مورد سوال قرار گرفت. همچنین اختلافات بدست آمده از بررسی فوق نشان دهنده خطاهای قابل توجه در بکارگیری این روابط در ارزیابی عملکرد هواده‌ها می‌باشد. لذا در پایان‌نامه حاضر تلاش گردید تا ضمن بررسی پارامترهای موثر بر مکانیزم هواده‌ی، روابط جدیدی بر مبنای تقسیم‌بندی مطرح شده ارائه گردد. لازم به ذکر است که جریان هواده‌ی شده در پایین‌دست دریچه‌ها، از جمله جریان‌های پیچیده دو فازی و سه بعدی می‌باشد که از حساسیت خاص برخوردار بوده و مطمئناً پیچیدگی‌های این پدیده، معرفی روابط کامل را خیلی دشوار می‌سازد. ولی با بررسی دقیق پدیده تلاش شده است تا روابط قابل قبول بر اساس

اطلاعات حاضر ارائه گردد که می‌تواند مورد توجه محققان و طراحان سازه‌های هیدرولیکی قرار گیرد. مطمئناً با افزایش حجم اطلاعات آزمایشگاهی و بخصوص با انجام بررسی‌های مقیاسی، روابط کاملتری قابل ارائه خواهد بود. بر اساس بررسی اطلاعات آزمایشگاهی، به نظر نگارنده اختلافات نشان داده شده میان نتایج تحقیقات پیشین، به عدم توجه به مکانیزم‌های معرفی شده در هوادهی و نیز عدم انتخاب سایر پارامترهای موثر بر هوادهی اشاره دارد.

برای تحلیل نتایج آزمایشگاهی موجود، فرضیات در نظر گرفته شده و پارامترهای انتخابی، براساس مباحث مربوط به فصل سوم می‌باشند. برای هر یک از سه قسمت ارزیابی میزان هوادهی فوق‌الذکر، در ابتدا تلاش شد با استفاده از پارامترهای موثر بهترین رابطه‌ای که با نحوه تغییرات ضریب هوادهی نسبت به شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف مطابقت داشته، استخراج گردد. به بیان دیگر رابطه‌ای با رگرسیون بالا بدست آمد. سپس با بررسی پراکندگی داده‌های تجربی پیرامون نتایج حاصل از رابطه فوق، روابط حد بالا و حد پایین بر مبنای رابطه اصلی نتیجه‌گیری شدند.

۵-۲- محاسبه پارامترهای مورد نیاز از نتایج اندازه‌گیری

اطلاعات مورد نیاز بر اساس اندازه‌گیری‌های مستقیم آزمایشگاهی و بررسی‌های تحلیلی تهیه و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همانطور که در بخش (۴-۸) توضیح داده شد اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده شامل دبی آب (Q_w)، دبی جریان هوا در هواده (Q_{av})، درصد بازشدگی دریچه اضطراری (E)، درصد بازشدگی دریچه سرویس (S) و هد کل بالادست دریچه (H_l) یا هد فشار بالادست دریچه (H_p) می‌باشند که مستقیماً از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بدست آمده‌اند. از طرف دیگر پارامترهای هندسی تخلیه‌کننده که در تحلیل حاضر مد نظر قرار گرفته‌اند شامل ارتفاع تونل در محل دریچه (h_g)، عرض تونل در محل دریچه (b_g)، سطح مقطع تونل پایین‌دست دریچه (A_d)، سطح مقطع هواده (A_a) و مقیاس مدل (Sc) می‌باشند که از نقشه‌های مدل‌ها استخراج شده‌اند.

با استفاده از پارامترهای پایه فوق، پارامترهای محاسباتی مورد نیاز تعیین شده‌اند که عبارتند از ضریب هوادهی ($\beta = Q_{av} / Q_w$)، سرعت جریان آب در محل دریچه ($V_g = Q_w / A_w$)، سرعت جریان آب در محل فشردگی جریان بعد از دریچه ($V_c = Q_w / A_c$)، عدد فرود جریان آب در محل دریچه (Fr_g)، عدد فرود جریان آب در محل فشردگی (Fr_c)، عدد رینولدز جریان آب ($Re = V_c h_c / \nu$)، عدد وبر جریان آب در محل فشردگی (We_c)، بازشدگی نسبی دریچه اضطراری و سرویس، سطح مقطع جریان در محل دریچه ($A_w = h_w b_g$)، ارتفاع جریان آب در محل دریچه ($h_w = G h_g$)، سطح مقطع تونل در محل دریچه ($A_g = h_g b_g$)، سطح مقطع جریان آب در محل فشردگی ($A_c = h_c b_g$)، ارتفاع جریان آب در محل فشردگی ($h_c = C_c h_w$)، ارتفاع گذرگاه هوا در بالای سطح آب در محل دریچه ($h_{g-w} = h_g - h_w$) و نسبت سطح مقطع تونل پایین دست به سطح مقطع تونل در محل دریچه ($a = A_d / A_g$). لازم به ذکر است که در محاسبات، h_c و A_c تحت شرایطی که تونل کاملاً پر از آب می‌گردد، اصلاح شده‌اند.

فشردگی جریان بعد از دریچه تابع ابعاد مجرا و بازشدگی دریچه و هد آب ورودی و زاویه لبه زیرین دریچه می‌باشد. از آنجا که در این تحقیق دریچه‌هایی با لبه ۴۵ درجه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، لذا ضریب فشردگی جریان (C_c) برای زاویه فوق بر حسب درصد بازشدگی دریچه مطابق با جدول (۵-۱) در تحلیل کلیه دریچه‌ها استفاده شده است [۵].

جدول (۵-۱): ضریب فشردگی جریان بر حسب درصد بازشدگی دریچه (Kalinske & Robertson)

E or S [%]	C_c
۱۰	۰/۷۳
۲۰	۰/۷۳۲
۳۰	۰/۷۳۵
۴۰	۰/۷۴
۵۰	۰/۷۵۵
۶۰	۰/۷۷
۷۰	۰/۷۸۵
۸۰	۰/۸۰۵
۹۰	۰/۸۳
۱۰۰	۱

۵-۳- ارزیابی میزان هوادهی توسط هواده در پایین دست یک دریچه

برای تحلیل داده‌های هوادهی جریان توسط هواده در پایین دست یک دریچه در مدل‌های مورد استفاده، عوامل و پارامترهای تاثیرگذار بررسی شده‌اند تا میزان تاثیر و اهمیت هر یک در مکانیزم فوق تعیین گردد. لازم به ذکر است که بر اساس مطالب ارائه شده در فصل‌های قبل، میزان تقاضای هوای جریان و انتقال حباب‌های هوا به پایین دست به شدت آشفتگی جریان و بالطبع سرعت جریان که خود تابع مستقیم هد آب بالادست دریچه می‌باشد، مرتبط و وابسته می‌باشند. از طرف دیگر میزان هوای تزریق شده به جریان تابع مستقیم افت فشار در محل هواده و سطح مقطع آن می‌باشد. با توجه به آنکه یکی از مکانیزم‌های مهم هوادهی حمل حباب‌های هوا توسط جریان می‌باشد، لذا مقدار هوای درخواستی تابعی از مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی جریان و شرایط پایین دست تونل می‌باشد. این شرایط همچون تشکیل پرش و هندسه تونل و یا حتی طول آن می‌تواند بر ظرفیت حمل هوا تاثیرگذار باشد. طول تونل پایین دست بر میزان هوایی که بالای سطح آب جریان دارد نیز تاثیر می‌گذارد. مطالعات گوناگون همچنین مؤید تاثیر عملکرد دریچه بر میزان هوای عبوری از هواده می‌باشد. نسبت سطح مقطع مجرا در محل دریچه به پایین دست که بر هواگیری جت از یک یا چند

وجه تاثیرگذار است نیز حائز اهمیت می باشد. البته تاثیر مقیاس در مطالعات مدلی و کشش سطحی نیز نباید از کانون توجه خارج گردد. با عنایت به جمع بندی فوق، توصیف ریاضی هوادهی جریان از هواده (Q_{av}) با در نظر گرفتن عوامل مختلف به شکل زیر قابل ارائه می باشد:

$$Q_{av} = f(V_c, g, h_c, b_g, h_g, h_{g-w}, G, H_t, L_t, A_d, A_a, \Delta p_a, \rho_a, \rho_w, \sigma_w, \nu_w) \quad (1-5)$$

که در آن Δp_a اختلاف فشار اتمسفر و فشار هوا در انتهای بالادست مجرا، L_t طول تونل پایین دست درپچه، ρ_w چگالی آب، ρ_a چگالی هوا، σ_w کشش سطحی آب و ν_w لزجت سینماتیکی آب می باشند.

با توجه به آنالیز ابعادی و با در نظر گرفتن V_c و h_c و ρ_w به عنوان پارامترهای تکراری رابطه (1-5) به فرم زیر بی بعد می گردد:

$$\beta = f\left(Fr_c, Re, We_c, \frac{\Delta p_a}{\rho_w V_c^2}, \frac{L_t}{h_c}, \frac{H_t}{h_c}, G, \frac{A_d}{h_c^2}, \frac{A_a}{h_c^2}, \frac{b_g}{h_c}, \frac{h_g}{h_c}, \frac{h_{g-w}}{h_c}, \frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \quad (2-5)$$

در بررسی میزان تاثیر هر یک از پارامترهای بی بعد رابطه (2-5)، برای قدم نخست پارامترهایی که دارای اهمیت کمتری هستند یا بصورتی در پارامترهای دیگر تکرار شده اند، مشخص گشته و با حذف آنها رابطه (2-5) به شکل ساده تری قابل بیان می باشد. بر این اساس نسبت ρ_a/ρ_w در دامنه تغییرات دمای آزمایشگاه و پروتوتیپ از اهمیت کمی برخوردار بوده و لذا می توان آنرا حذف نمود. افزایش طول تونل پایین دست باعث افزایش دبی هواده (Q_{av}) و کاهش هوای ورودی از مجرای پایین دست (Q_{ad}) می گردد. لذا بر این اساس ممکن است در تونل های طویل شرایطی فراهم شود که تمام تقاضای هوا از هواده تامین گردد. در مدل های مورد آزمایش طول تونل نسبت به ابعاد سطح مقطع به اندازه کافی زیاد بوده و لذا می توان فرض نمود که پارامتر L_t/h_c تحت شرایط موجود تاثیر کمی بر هوادهی دارد و قابل حذف می باشد.

دبی جریان آب خروجی از زیر دریچه تابع هد انرژی بالادست دریچه بوده که بصورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$Q_w = C_d A_w \sqrt{2gH_t} \quad (3-5)$$

که در آن C_d ضریب تخلیه دریچه می‌باشد. این ضریب به هندسه دریچه و شکل لبه آن، هندسه مجرای بالادست و هد موثر آب پشت دریچه بستگی دارد و با رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$C_d = C_c \cdot C_v \quad (4-5)$$

که در آن C_v نسبت سرعت واقعی به سرعت تئوری جت خروجی می‌باشد. ضریب C_d در مدل‌های موجود بین 0.7 تا 0.8 متغیر است. با استفاده از روابط (3-5) و (4-5) و نیز قرار دادن $V_g \cdot A_w$ به جای Q_w ، برای H_t/h_c خواهیم داشت:

$$\frac{H_t}{h_c} = \frac{1}{2C_d^2} \frac{V_g^2}{gh_c} = \frac{1}{2C_c^2 C_v^2} \frac{C_c^2 V_c^2}{gh_c} = \frac{1}{2C_v^2} \frac{V_c^2}{gh_c} \Rightarrow \frac{H_t}{h_c} = C_1 \cdot Fr_c^2 \quad (5-5)$$

که در آن ضریب C_1 تابعی از C_v می‌باشد و ثابت در نظر گرفته شده است.

Pinto در بررسی‌های خود در خصوص هوادهی جریان عبوری از سرریزها نشان داد که $\Delta p / \rho_w U^2$ به نسبت سطح مقطع جریان به سطح مقطع موثر هواده به توان دو، بستگی دارد. با فرض تعمیم رابطه فوق در تونل‌های تخلیه‌کننده، خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta p_a}{\rho_w V_c^2} \propto \left(\frac{A_c}{A_a} \right)^2 \quad (6-5)$$

این فرض با بررسی‌های Speerli (1999) نیز مطابقت داشته و لذا در رابطه (2-5) بجای $\Delta p_a / \rho_w V_c^2$ که شکلی از عدد اولر می‌باشد، عبارت $(A_c/A_a)^2$ قرار می‌گیرد.

بر اساس توضیحات فوق، با حذف پارامترهایی با اهمیت کمتر و با استفاده از روابط (۵-۵) و (۶-۵) و جایگزین نمودن بعضی از پارامترها با حاصلضرب پارامترهای بی بعد دیگر و فرض اینکه پارامترهای موجود در رابطه (۲-۵) بصورت نمایی با β در ارتباط هستند، نتیجه زیر حاصل می گردد:

$$\beta = C_o (Fr_c)^{n_1} (Re)^{n_2} (We_c)^{n_3} \left(\left(\frac{A_a}{A_g} \cdot \frac{h_g}{h_c} \right)^{-2} \right)^{n_4} (C_1 \cdot Fr_c^2)^{n_5} (G)^{n_6} \times$$

$$\left(\frac{A_a}{A_g} \cdot \frac{b_g}{h_c} \cdot \frac{h_g}{h_c} \right)^{n_7} \left(a \cdot \frac{b_g}{h_c} \cdot \frac{h_g}{h_c} \right)^{n_8} \left(\frac{b_g}{h_c} \right)^{n_9} \left(\frac{h_g}{b_g} \cdot \frac{b_g}{h_c} \right)^{n_{10}} \left(\frac{h_{g-w}}{h_g} \cdot \frac{h_g}{h_c} \right)^{n_{11}} \quad (۷-۵)$$

که در آن C_o و n_i اعداد تجربی می باشند. رابطه (۷-۵) را می توان به فرم زیر ساده نمود:

$$\beta = C_m (Fr_c)^{m_1} (Re)^{m_2} (We_c)^{m_3} (G)^{m_4} (a)^{m_5} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{m_6} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{m_7} \left(\frac{b_g}{h_c} \right)^{m_8} \left(\frac{h_g}{h_c} \right)^{m_9} \left(\frac{h_{g-w}}{h_g} \right)^{m_{10}} \quad (۸-۵)$$

که در آن C_m و m_i اعداد تجربی می باشند. در این رابطه نسبت h_{g-w}/h_g را بصورت ساده $1-G$ می توان نوشت.

در این پایان نامه برای تحلیل داده های تجربی از روش تحلیل رگرسیون (regression) استفاده شده است. اگر فرض شود که پارامتر y به متغیرهای $x_1, x_2, \dots, x_k$ وابسته باشد، مدل رگرسیون چند جمله ای خطی زیر را برای y بصورت زیر می توان نوشت:

$$y = m_0 + m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_k x_k + \varepsilon \quad (۹-۵)$$

که در آن m_k ضریب جزئی رگرسیون و ε خطای تصادفی می باشند. برای n داده رابطه (۹-۵) را می توان بصورت رابطه (۱۰-۵) نوشت:

$$y_i = m_0 + \sum_{j=1}^n m_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (۱۰-۵)$$

برای برآورد ضرایب جزئی رگرسیون از روش کمترین مربعات خطاها استفاده می‌شود و لذا

رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ \vdots \\ m_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

از رابطه (5-11) $p=k+1$ معادله بدست می‌آید و با حل آنها ضرایب جزئی رگرسیون (m_k)

تعیین می‌گردند. برای تعیین میزان اعتبار مدل رگرسیون با p متغیر، ضریب تعیین میزان رگرسیون (R_p^2) بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_p^2 = \frac{SS_R(p)}{SS_R(p) + SS_E(p)} \quad (5-12)$$

که در آن $SS_R(p)$ مجموع مربعات رگرسیون و $SS_E(p)$ مجموع مربعات خطاها یا باقی‌مانده‌ها برای مدلی با p متغیر می‌باشند. ضریب R_p^2 میزان کاهش تغییرپذیری y را با استفاده از متغیرهای $x_1, x_2, \dots, x_k$ تعیین می‌نماید و در محدوده ۰ تا ۱ قرار دارد. ضریب R_p^2 هر چه به یک نزدیکتر باشد مدل رگرسیون دارای دقت بالاتری است. البته اضافه نمودن متغیر به رابطه (5-9) باعث افزایش این ضریب می‌گردد در حالیکه ممکن است متغیر اضافه شده از نظر آماری تعیین‌کننده نباشد.

به همین دلیل باید مجموعه پارامترهای موثر در برآورد y از کل پارامترهای مورد نظر تعیین

گردد. برای این کار معیارهای مختلفی وجود دارد. یکی از معیارهای متداول بر پایه ضریب R_p^2 می‌باشد. با در نظر گرفتن مجموعه‌های مختلفی از پارامترهای مستقل، مدل رگرسیون و ضریب R_p^2 مربوط به هر کدام محاسبه می‌گردد. با بررسی ضرایب R_p^2 در حالات مختلف، مناسب‌ترین مجموعه

(دارای ضریب R_p^2 نسبتاً بالا و تعداد پارامتر کمتر) انتخاب می‌گردد. معیاری دیگر بر پایه ضریب R_p^2 اصلاح شده ($\text{adj } R_p^2$) می‌باشد. این ضریب تعداد متغیرهای موجود در مدل رگرسیون را در نظر می‌گیرد و با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{adj } R_p^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R_p^2) \quad (5-13)$$

در صورتی که با افزایش p ، ضریب R_p^2 افزایش قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد، ضریب $\text{adj } R_p^2$ کاهش می‌یابد. معمولاً مدل رگرسیونی انتخاب می‌گردد که دارای ضریب $\text{adj } R_p^2$ ماکزیمم است.

در این پایان‌نامه برای تحلیل و بررسی نمودن داده‌های تجربی به روش فوق از ابزار محاسباتی Data Analysis برنامه نرم‌افزاری Excel استفاده شده است و برای آنکه بتوان از این روش استفاده نمود از طرفین رابطه (5-8) لگاریتم گرفته شده تا به فرم رابطه (5-9) در آید. دو نمونه از نتایج تحلیل به روش فوق برای داده‌های هوادهی پایین‌دست یک دریچه در حالت $a > 1$ ، در شکل‌های (5-1) و (5-2) ارائه شده است.

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	۰.۹۵۰۳۳۴۰۱
R Square	۰.۹۰۳۱۳۴۷۴
Adjusted R Square	۰.۸۹۹۱۴۰۲۹
Standard Error	۰.۲۱۱۹۷۵۴۳
Observations	۱۰۲

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	۴	۴۰.۶۳۷۵	۱۰.۱۵۹۳۸	۲۲۶.۰۹۸	۳.۰۲E-۴۸
Residual	۹۷	۴.۳۵۸۵۵۷۶۳	۰.۰۴۴۹۴		
Total	۱۰۱	۴۴.۹۹۶۰۸			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower ۹۵%</i>	<i>Upper ۹۵%</i>
Intercept	-۷.۰۸۲۰۲۸۸۶	۰.۲۴۰۰۵۵۸۶۹	-۲۹.۵۰۱۶	۳.۰۷E-۵۰	-۷.۵۵۸۴۷۳۳	-۶.۶۰۵۵۸۴۴
Frc	۰.۶۹۷۲۳۰۷۳	۰.۰۹۲۵۲۳۸۸۷	۷.۵۳۵۶۸۴	۲.۵۷E-۱۱	۰.۵۱۳۵۹۶۴۳۲	۰.۸۸۰۸۶۵
G	-۰.۱۱۵۱۲۹۷۴	۰.۰۶۸۰۱۵۵۹۴	-۱.۶۹۲۷	۰.۰۹۳۷۲	-۰.۲۵۰۱۲۱۸۶	۰.۰۱۹۸۶۲۴
a	۱.۸۳۷۴۶۶۴۸	۰.۱۲۴۳۳۳۷۵۸	۱۴.۷۷۸۵	۱.۴۱E-۲۶	۱.۵۹۰۶۹۸۳۹۶	۲.۰۸۴۲۳۴۶
hg/bg	۸.۳۶۳۵۱۱۹۱	۰.۶۵۳۸۸۶۷۶۶	۱۲.۷۹۰۴۶	۱.۵۵E-۲۲	۷.۰۶۵۷۲۷۷۱۸	۹.۶۶۱۲۹۶۱

شکل (۵-۱): نمونه‌ای از نتایج بدست آمده از تحلیل رگرسیون با ۴ پارامتر

برای داده‌های هوادهی پایین‌دست یک دریچه در حالت $a > 1$

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.94882743
R Square	0.9002735
Adjusted R Square	0.89722064
Standard Error	0.21398317
Observations	102

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	3	40.50878313	13.50293	294.896	6.6106E-49
Residual	98	4.48730225	0.045789		
Total	101	44.99608538			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	-7.11687909	0.241436669	-29.4772	1.6E-50	-7.5960023	-6.6377559
Frc	0.8376644	0.041346011	20.25986	8.2E-37	0.755614589	0.9197142
a	1.73857815	0.110793432	15.69207	1.7E-28	1.518712193	1.9584441
hg/bg	7.95430487	0.613311503	12.96944	5.5E-23	6.737208181	9.1714016

شکل (۵-۲) : نمونه‌ای از نتایج بدست آمده از تحلیل رگرسیون با ۳ پارامتر

برای داده‌های هوادهی پایین دست یک دریچه در حالت $a > 1$

با توجه به جداول موجود در شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲) مشاهده می‌شود که ضریب R_p^2 مدل رگرسیون اول با مدل رگرسیون دوم اختلاف کمی دارد، در صورتی که حالت اول شامل پارامتر G نیز هست. این اختلاف اندک نشانگر آن است که در تحلیل داده‌ها، مجموعه پارامترهای حالت دوم مناسبتر می‌باشند. عبارت آماری F در این جداول میزان اعتبار مدل رگرسیون مربوطه را مشخص می‌کند. در حالت دوم مقدار این عبارت بیشتر است. عبارات t Stat و P -value میزان اعتبار پارامترهای مختلف را با توجه به سایر پارامترهای موجود در هر حالت نشان می‌دهند و برای آنکه از تعداد تحلیل‌های با مجموعه پارامترهای مختلف کاسته شود، از این عبارات می‌توان استفاده نمود. برای مثال کوچک بودن مقدار t Stat و بزرگ بودن مقدار P -value برای پارامتر G در تحلیل حالت

اول نشانگر آن است که این پارامتر نسبت به سایر پارامترها دارای اعتبار کمتری است و همانطور که در نتایج تحلیل حالت دوم مشاهده می‌گردد با حذف آن ضریب R_p^2 کاهش چندانی پیدا نکرده است.

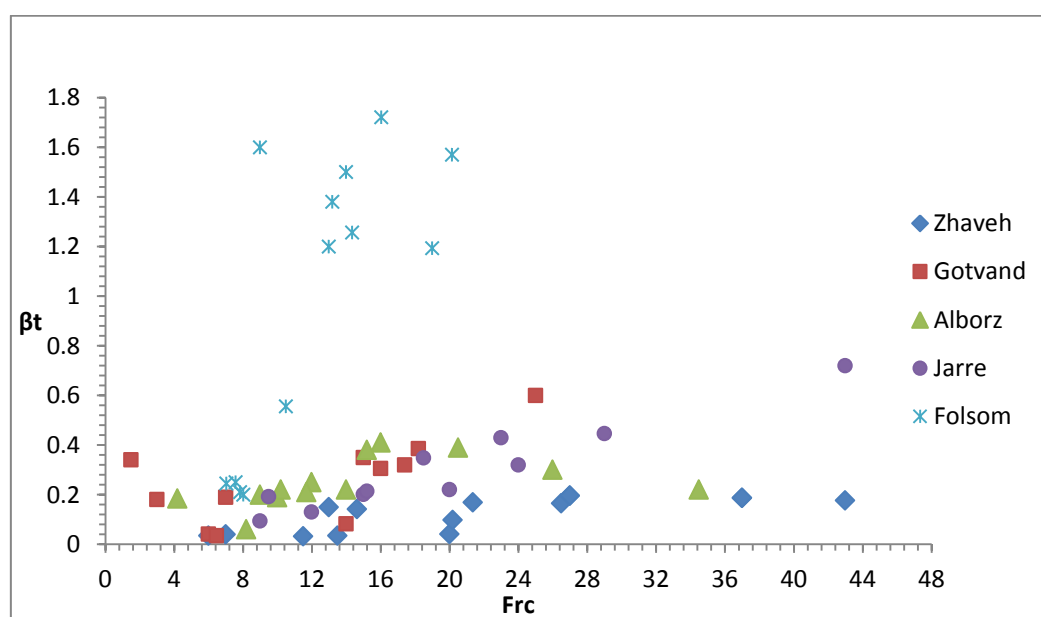
در ادامه، تحلیل داده‌های تجربی بر اساس تعیین مقادیر C_m و m_i در رابطه (۸-۵) با استفاده از تحلیل‌های آماری قرار داده شده است. برای نیل به این هدف، در مرحله نخست تمام پارامترهای رابطه (۸-۵) داده‌های مورد بررسی در نظر گرفته و با تحلیل آماری آنها، ضریب تعیین‌کننده میزان اعتبار رابطه رگرسیون (R_p^2) در این شرایط محاسبه شده است. عدد حاصل ماکزیمم مقدار برای ضریب R_p^2 می‌باشد که رابطه (۸-۵) برای β نتیجه خواهد داد. در مراحل بعدی با بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف رابطه (۸-۵) بر دقت تخمین β ، پارامترهای با تاثیر پایین حذف شده و مناسب‌ترین رابطه (با متغیرهای کمتر و دقت بالاتر) حاصل گشته است. رابطه حاصل برآوردی از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی می‌باشد. بر اساس این رابطه و با توجه به پراکندگی داده‌ها، روابط حد بالا و حد پایین این داده‌ها نیز در ادامه بدست آمده است.

در بررسی داده‌های هوادهی پایین‌دست یک دریچه، دو مکانیزم مورد مطالعه قرار گرفت که دسته نخست شامل حالت هواگیری جت صرفاً از روی سطح بالایی آب و دسته دوم معرف شرایط هواگیری جت از چهار وجه آن می‌باشد. لذا با توجه به تفاوت مکانیزم هواگیری در این دو دسته، داده‌های مربوط به هر یک جداگانه تحلیل و برای هر دسته روابطی مجزا برای β پیشنهاد شده‌اند. لازم به ذکر است که برای دسته نخست پارامتر a کوچکتر یا مساوی یک می‌باشد و در دسته دوم a بزرگتر از یک است.

۵-۳-۱- تحلیل داده‌های مربوط به $a \leq 1$ (دسته نخست)

از میان مدل‌های مورد استفاده با توجه به هندسه تونل پایین‌دست دریچه، جت خروجی از دریچه اضطراری مدل‌های ژاوه، گتوند علیا، البرز و جره و دریچه کنترل مدل Folsom صرفاً از سطح بالایی خود هواگیری می‌نماید و لذا داده‌های آنها در دسته $a \leq 1$ قرار می‌گیرد.

پارامترهای رابطه (۵-۸) بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در فصل چهارم و روابط مذکور در بخش (۵-۲) محاسبه شده‌اند. در دسته نخست برای ۵ مدل فوق، از نتایج ۱۰۳ آزمایش جهت تحلیل و آنالیز هوادهی استفاده شده است. ضریب هوادهی تجربی مدل‌های مختلف این دسته بر حسب عدد فرود در محل فشردگی، در نمودار شکل (۵-۳) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که نحوه تغییرات β_t (ضریب هوادهی آزمایشگاهی) بر حسب Fr_c در مدل‌های مختلف با هم اختلاف دارند و این اختلاف برای مدل Folsom خیلی بیشتر است.



شکل (۵-۳): نمودار β_t نسبت به Fr_c برای مدل‌های مختلف دسته $a \leq 1$

با انجام تحلیل آماری با استفاده از تمام پارامترهای رابطه (۵-۸)، ضریب R_p^2 برابر ۰/۸۵۳۴ بدست آمد. سپس با بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف، نتایج مندرج در جدول (۵-۲) بدست آمد. در این جدول نتایج مجموعه‌های مختلف از پارامترها بر اساس ضریب R_p^2 اصلاح شده ($\text{adj } R_p^2$) بصورت نزولی مرتب شده است. ضریب R_p^2 اصلاح شده، تعداد پارامترهای مورد استفاده را در نظر می‌گیرد. اعداد داخل پرانتز در ستون دوم جدول (۵-۲) معرف تعداد پارامترهای موجود در مجموعه مربوطه هستند.

جدول (۵-۲): نتایج بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف در تحلیل داده‌های مربوط به $\alpha \leq 1$

No.	Parameters	R_p^2	$\text{adj } R_p^2$
۱	$Fr_c, Re, G, \lambda - G, a, A_d/A_g, h_g/b_g, b_g/h_c (\lambda)$	۰/۸۵۳۴	۰/۸۴۵۵
۲	$Fr_c, Re, G, \lambda - G, a, A_d/A_g, h_g/b_g (\gamma)$	۰/۸۵۰۴	۰/۸۴۳۴
۳	$Fr_c, Re, G, \lambda - G, a, A_d/A_g (\gamma)$	۰/۸۴۸۵	۰/۸۴۲۴
۴	$Fr_c, Re, We_c, G, \lambda - G, a, A_d/A_g, h_g/b_g, h_g/h_c, b_g/h_c (\lambda, \gamma)$	۰/۸۵۳۴	۰/۸۳۰۳
۵	$Fr_c, G, \lambda - G, a, A_d/A_g, h_g/b_g (\gamma)$	۰/۸۱۷۴	۰/۸۰۹۹
۶	$Fr_c, \lambda - G, a, A_d/A_g, h_g/b_g (\gamma)$	۰/۸۱۴۱	۰/۸۰۷۷
۷	$Re, G, \lambda - G, a, A_d/A_g (\gamma)$	۰/۷۹۹۲	۰/۷۹۲۳
۸	$Fr_c, Re, G, a, A_d/A_g (\gamma)$	۰/۷۵۶۲	۰/۷۴۷۸
۹	$Fr_c, \lambda - G, A_d/A_g, h_g/b_g (\xi)$	۰/۷۴۹۴	۰/۷۴۲۳
۱۰	$Fr_c, a, A_d/A_g, h_g/b_g (\xi)$	۰/۷۴۵۱	۰/۷۳۸۱
۱۱	$Re, G, a, A_d/A_g (\xi)$	۰/۷۱۶۱	۰/۷۰۸۳
۱۲	$Fr_c, A_d/A_g, h_g/b_g (\gamma)$	۰/۷۱۰۶	۰/۷۰۴۶

با توجه به جدول (۵-۲) مجموعه پارامترهای شماره ۳ و ۶ به ترتیب با ۶ و ۵ پارامتر و ضریب R_p^r برابر با ۰/۸۴۸۵ و ۰/۸۱۴۱ از سایر حالات مناسب تر می‌باشند. تفاوت عمده بین این دو مجموعه وجود Re در حالت اول می‌باشد. برای بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف مجموعه شماره ۶ بر دقت تخمین β ، ابتدا Fr_c را در نظر گرفته و رابطه مربوطه و ضریب R_p^r حاصل و سپس بقیه پارامترها اضافه شده است.

$$\beta_c = 0.0047 Fr_c^{1.0273} \quad R_p^r = 0.2253 \quad (14-5)$$

ضریب R_p^r بسیار پایین برای رابطه (۵-۱۴) و پراکندگی زیاد نقاط حول خط $\beta_t = \beta_c$ در نمودار شکل (۵-۴) نشانگر آن است که تنها با استفاده از عدد فرود در محل فشردگی جریان نمی‌توان برآورد مناسبی از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف بدست آورد. نتایج تاثیر اضافه شدن پارامترهای دیگر در روابط (۵-۱۵) الی (۵-۱۸) قابل مشاهده است.

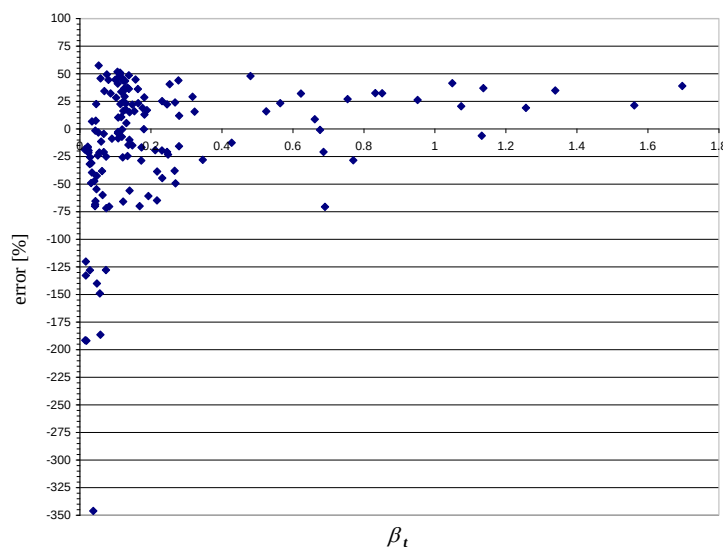
$$\beta_c = 0.1136 Fr_c^{0.7921} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.5367} \quad R_p^r = 0.4764 \quad (15-5)$$

$$\beta_c = 0.0146 Fr_c^{1.1185} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.6732} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.1624} \quad R_p^r = 0.7106 \quad (16-5)$$

$$\beta_c = 0.0106 Fr_c^{1.0404} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.5898} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.7064} a^{1.8828} \quad R_p^r = 0.7451 \quad (17-5)$$

$$\beta_c = 0.4265 Fr_c^{0.3352} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.6792} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.431} a^{2.7052} (1-G)^{0.7641} \quad R_p^r = 0.8141 \quad (18-5)$$

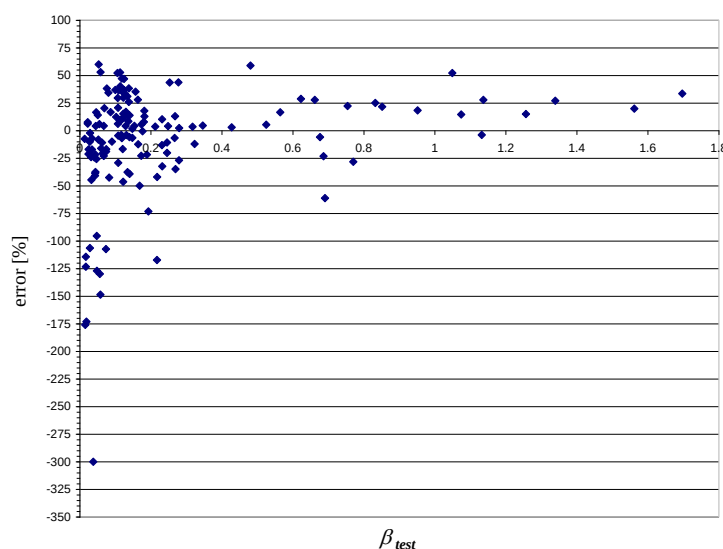
در نمودار شکل (۴-۵) درصد خطای محاسباتی رابطه (۵-۱۸) برای داده‌های تجربی نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، ۴۵/۳٪ خطاها در دامنه ۲۵-٪ و ۲۵٪ و ۸۰/۹٪ خطاها در دامنه ۵۰-٪ و ۵۰٪ و ۹۲/۴٪ خطاها در دامنه ۷۰-٪ و ۷۰٪ قرار دارند و ۴۹/۱٪ خطاها مثبت و ۵۰/۹٪ آنها منفی می‌باشند. میانگین خطاها ۴۱٪ و جذر میانگین مربعات خطاها برابر ۵۸/۸٪ می‌باشند.



شکل (۴-۵) : نمودار خطای محاسباتی رابطه (۵-۱۸)

برای رابطه (۵-۱۹) نتایج حاصل از مجموعه پارامترهای شماره ۳ در جدول (۲-۵) می‌باشد. در رابطه (۵-۱۹) عدد رینولدز مدل استفاده شده و برای محاسبه آن ν_w تحت شرایط آزمایشگاه برابر $10^{-6} \times 1/13$ در نظر گرفته شده است. این نتایج نشانگر آن است که اضافه شدن عدد رینولدز باعث تخمین دقیقتر ضریب هوادهی می‌گردد. نمودار شکل (۵-۵) درصد خطای محاسباتی رابطه (۵-۱۹) را برای داده‌های تجربی نشان می‌دهد.

$$\beta_c = 4.78 \times 10^{-12} Fr_c^{-1.1612} Re^{2.1348} G^{2.6575} a^{5.9536} (1-G)^{1.0525} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.6624} \quad R_p^r = 0.8485 \quad (۵-۱۹)$$



شکل (۵-۵) : نمودار خطای محاسباتی رابطه (۵-۱۹)

با توجه به نمودار شکل (۵-۵)، $55/8\%$ خطاها در دامنه -25% و 25% و $86/2\%$ خطاها در دامنه -50% و 50% و $91/2\%$ خطاها در دامنه -70% و 70% قرار دارند و $51/5\%$ خطاها مثبت و $48/5\%$ آنها منفی می‌باشند. میانگین خطاها $33/4\%$ و جذر میانگین مربعات خطاها برابر $52/3\%$ می‌باشند.

روابط (۵-۱۸) و (۵-۱۹) برآوردی از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی برای حالت $a \leq 1$ هستند. هر چند رابطه (۵-۱۹) نسبت به رابطه (۵-۱۸) دارای ضریب R_p^2 بالاتر و خطاهای کمتری است ولی یک پارامتر بیشتر دارد و بالا بودن دقت رابطه (۵-۱۹) با توجه به بیشتر بودن پارامترها قابل توجه نمی‌باشد.

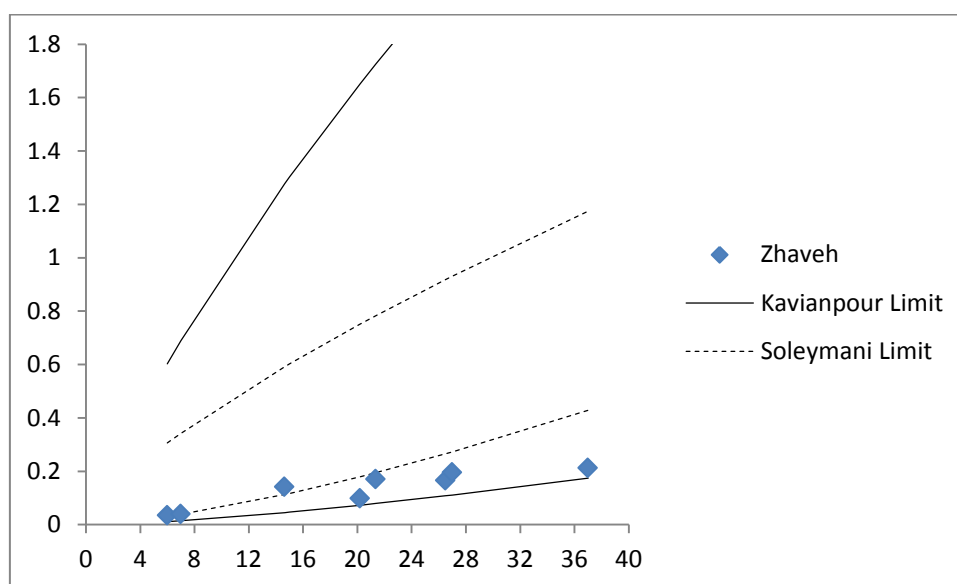
برای تعیین روابط حد بالا و حد پایین داده‌های این دسته، رابطه (۵-۱۷) ملاک عمل قرار گرفته است زیرا به غیر از عدد فرود سایر پارامترها به هندسه تونل و هواده مربوط هستند و برای یک

مدل ثابت می‌باشند. با بررسی نحوه پراکندگی داده‌های مدل‌های مختلف، دو رابطه زیر بعنوان حد بالا و پایین نتیجه‌گیری شده‌اند:

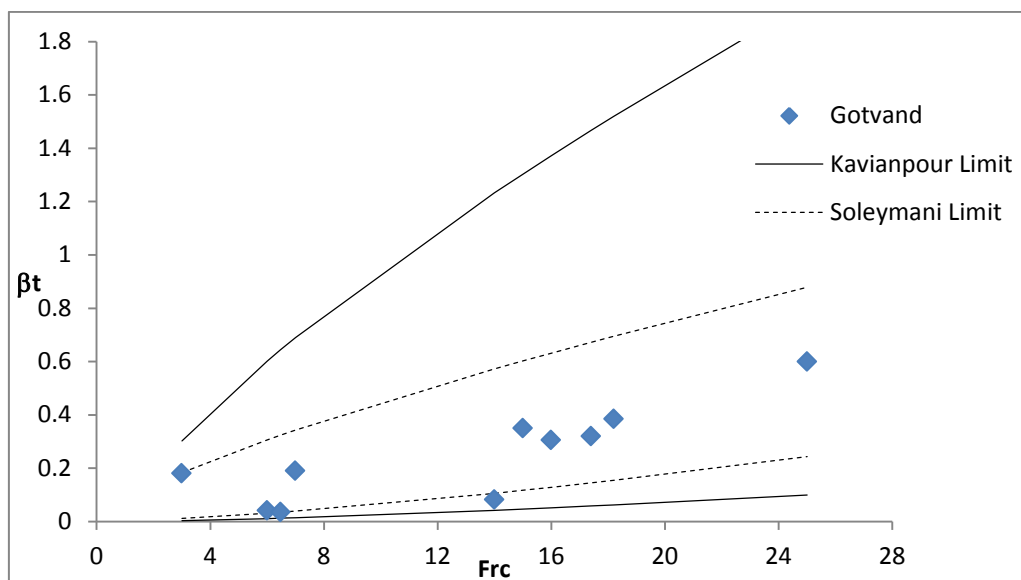
$$\beta = 0.0926 Fr_c^{0.74} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.59} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.71} a^{1.88} \quad (20-5) \text{ حد بالا}$$

$$\beta = 0.0027 Fr_c^{1.44} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.59} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.71} a^{1.88} \quad (21-5) \text{ حد پایین}$$

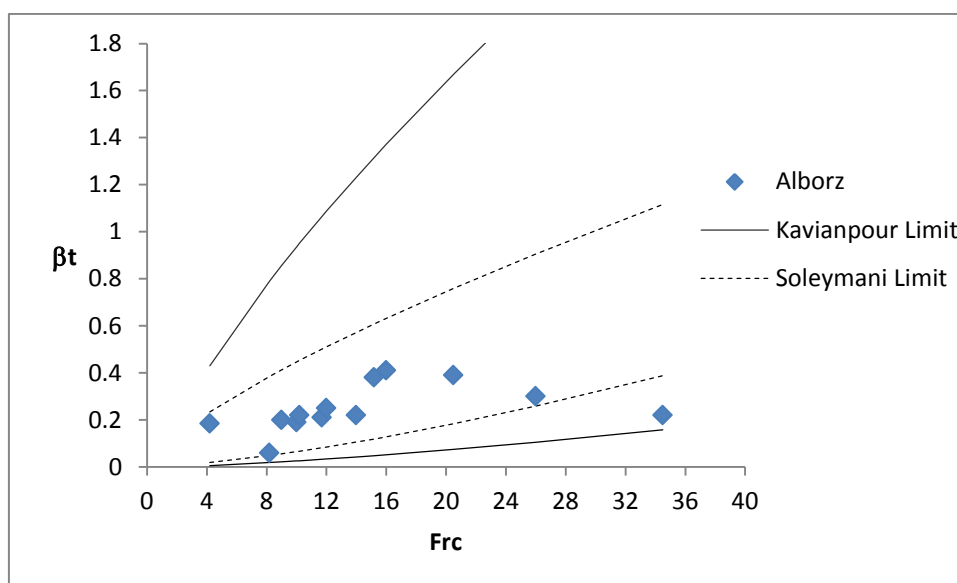
لازم به ذکر است که مدل Folsom نسبت به سایر مدل‌ها تفاوت‌هایی دارد. این مدل تنها دارای یک درجه کنترل می‌باشد و هندسه تونل در پایین‌دست درجه ثابت می‌ماند و دامنه تغییرات β_t نیز زیاد می‌باشد.



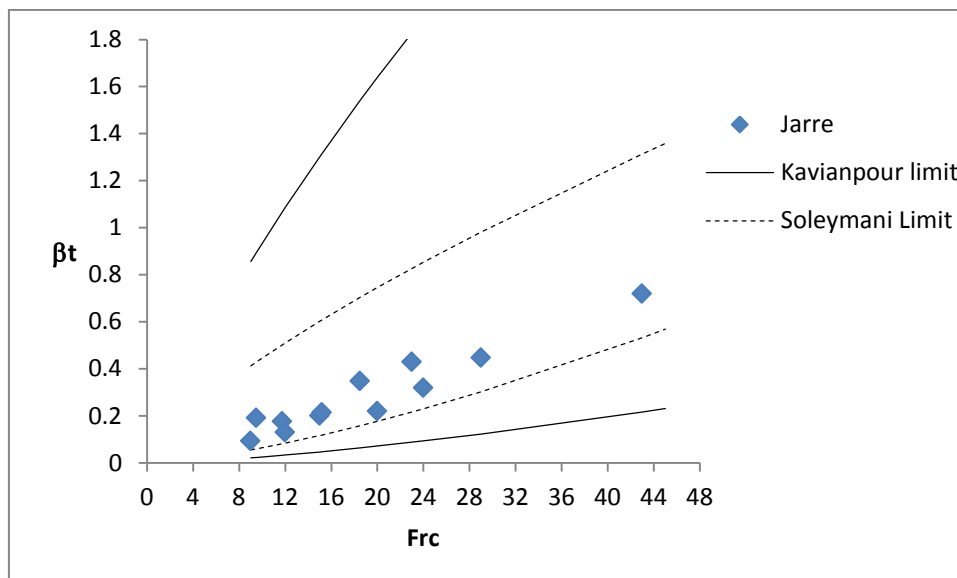
شکل (۶-۵): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی درجه اضطراری مدل ژاوه با روابط (۲۰-۵) و (۲۱-۵)



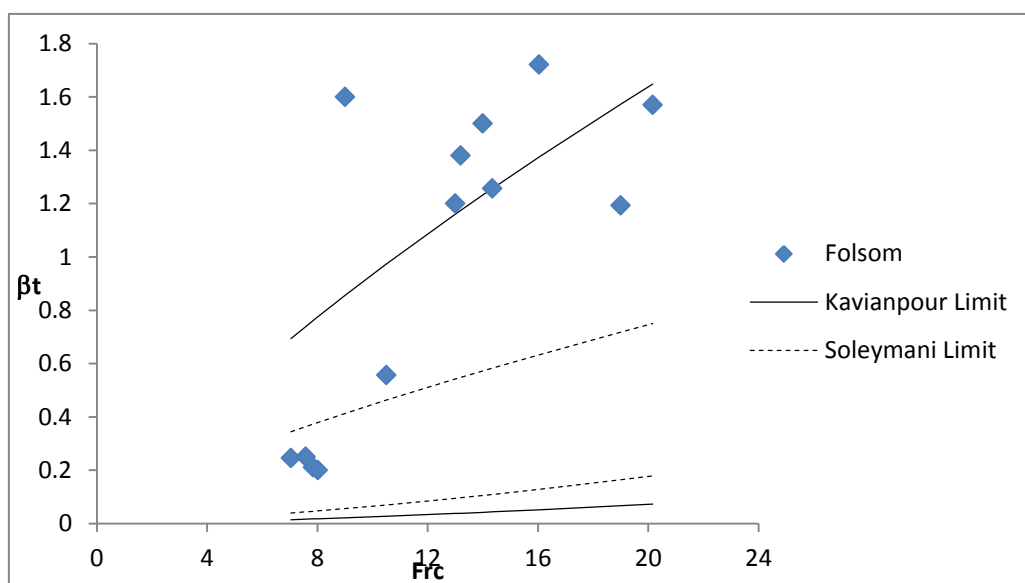
شکل (۷-۵): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی در پیچه اضطراری مدل گتوند علیا با روابط (۲۰-۵) و (۲۱-۵)



شکل (۸-۵): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی در پیچه اضطراری مدل البرز با روابط (۲۰-۵) و (۲۱-۵)



شکل (۵-۹): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریاچه اضطراری مدل جرّه با روابط (۵-۲۰) و (۵-۲۱)



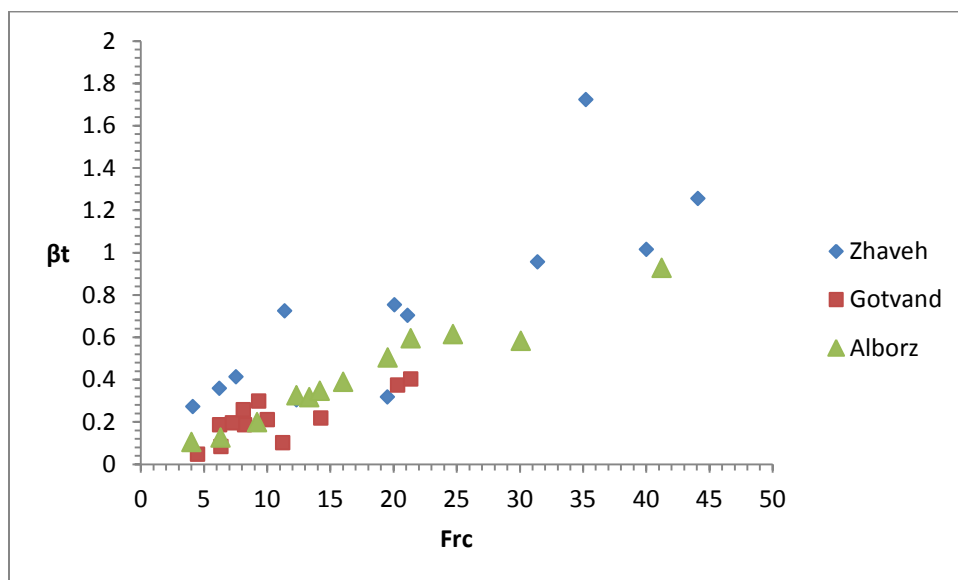
شکل (۵-۱۰): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریاچه کنترل مدل Folsom با روابط (۵-۲۰) و (۵-۲۱)

۵-۳-۲- تحلیل داده‌های مربوط به $a > 1$ (دسته دوم)

از میان مدل‌های مورد استفاده و با توجه به هندسه تونل پایین‌دست دریاچه، جت خروجی از دریاچه سرویس مدل‌های ژاوه، گتوند علیا و البرز از چهار طرف هواگیری نموده و لذا داده‌های آنها در دسته $a > 1$ قرار می‌گیرند.

در دسته دوم برای ۳ مدل فوق، از نتایج ۷۶ آزمایش جهت تحلیل هوادهی استفاده شده است. پارامترهای رابطه (۵-۸) بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در فصل چهارم و روابط مذکور در بخش (۵-۲) محاسبه شده‌اند. در این دسته پارامتر h_{g-w}/h_g قابل استفاده نیست.

ضریب هوادهی تجربی مدل‌های مختلف این دسته بر حسب عدد فرود در محل فشردگی، در نمودار شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که نحوه تغییرات β_t بر حسب Fr_c در مدل‌های مختلف تا حدودی با هم اختلاف دارند.



شکل (۵-۱۱): نمودار β_t نسبت به Fr_c برای مدل‌های مختلف دسته $a > 1$

با انجام تحلیل آماری با استفاده از تمام پارامترهای موجود، ضریب R_p^2 برابر ۰/۸۸۷۵ بدست آمد. سپس با بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف، نتایج مندرج در جدول (۵-۳) بدست آمد. در این جدول نتایج مجموعه‌های مختلف از پارامترها بر اساس ضریب R_p^2 اصلاح شده ($adj R_p^2$) بصورت

نزولی مرتب شده است. اعداد داخل پرانتز در ستون دوم جدول (۳-۵) معرف تعداد پارامترهای موجود در مجموعه مربوطه هستند.

جدول (۳-۵) : نتایج بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف در تحلیل داده‌های مربوط به $a > 1$

No.	Parameters	R_p^r	adj R_p^r
۱	$Fr_c, G, a, h_g/b_g (\xi)$	۰/۸۸۷۵	۰/۸۸۳۷
۲	$Fr_c, Re, G, a, h_g/b_g (\circ)$	۰/۸۸۷۵	۰/۸۸۲۷
۳	$Fr_c, a, h_g/b_g (\gamma)$	۰/۸۸۴۹	۰/۸۸۱۸
۴	$Fr_c, Re, We_c, G, a, A_d/A_g, h_g/b_g, h_g/h_c, b_g/h_c (\eta)$	۰/۸۸۷۵	۰/۸۴۱۴
۵	$Fr_c, a (\gamma)$	۰/۷۱۳۷	۰/۷۰۸۲
۶	$Fr_c, h_g/b_g (\gamma)$	۰/۶۳۴۳	۰/۶۲۷۲

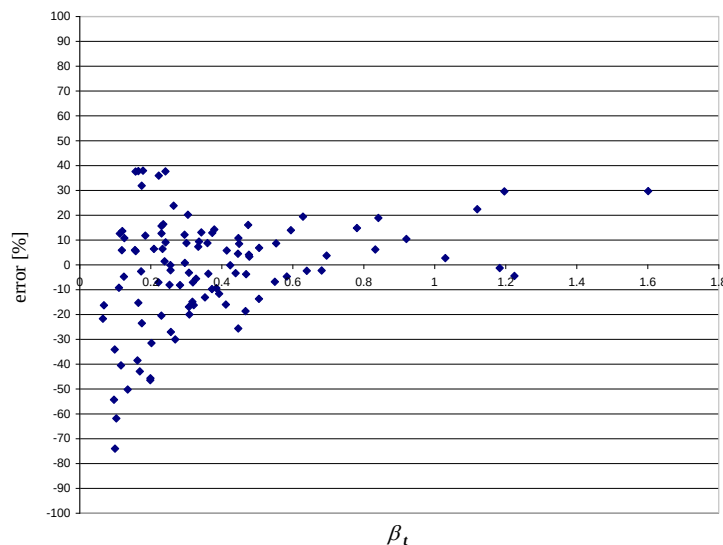
با توجه به جدول (۳-۵) مجموعه پارامترهای شماره ۳ با ۳ پارامتر و ضریب R_p^r برابر با ۰/۸۸۴۹ مناسب‌ترین گزینه می‌باشد. برای بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف مجموعه شماره ۳ بر دقت تخمین β ، ابتدا Fr_c را در نظر گرفته و رابطه مربوطه و ضریب R_p^r حاصل و سپس بقیه پارامترها اضافه شده است. نتایج حاصل در روابط (۲۲-۵) الی (۲۴-۵) ارائه شده است.

$$\beta_c = 0.0117 Fr_c^{0.9848} \quad R_p^r = ۰/۶۱۸۷ \quad (۲۲-۵)$$

$$\beta_c = 0.0056 Fr_c^{0.9138} a^{0.8125} \quad R_p^r = ۰/۷۱۳۷ \quad (۲۳-۵)$$

$$\beta_c = 6.65 \times 10^{-4} Fr_c^{0.8235} a^{1.7386} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{7.8612} \quad R_p^r = ۰/۸۸۴۹ \quad (۲۴-۵)$$

در نمودار شکل (۵-۸) درصد خطای محاسباتی رابطه (۵-۲۴) برای داده‌های تجربی نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، ۴۴.۸٪ خطاها در دامنه ۱۰٪- و ۱۰٪ و ۷۳.۸٪ خطاها در دامنه ۲۰٪- و ۲۰٪ و ۹۲.۸٪ خطاها در دامنه ۴۰٪- و ۴۰٪ قرار دارند و تعداد خطاهای مثبت و منفی با هم برابر می‌باشند. میانگین خطاها ۱۵.۸٪ و جذر میانگین مربعات خطاها برابر ۲۲.۳٪ می‌باشند.



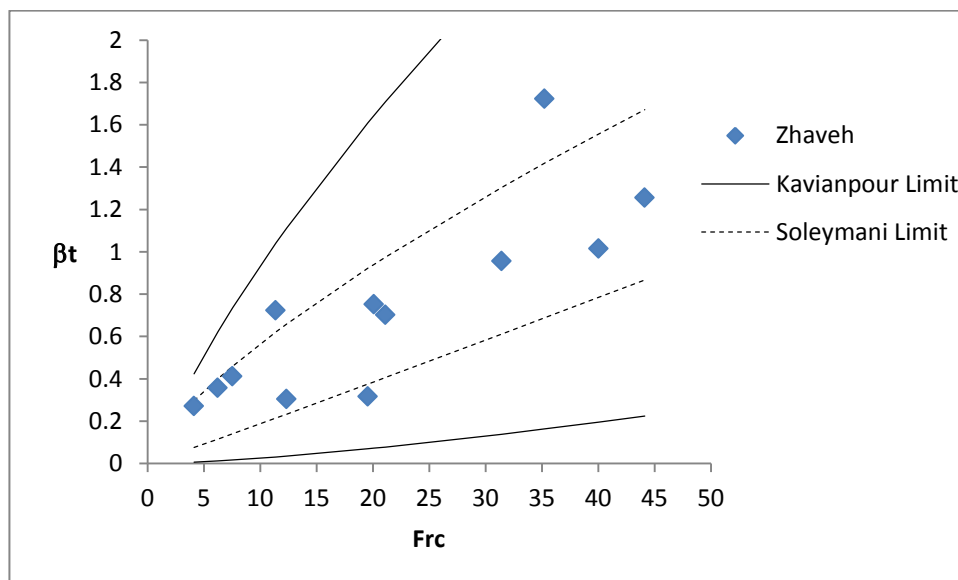
شکل (۵-۱۲): نمودار خطای محاسباتی رابطه (۵-۲۴)

رابطه (۵-۲۴) با دقت بالا برآوردی از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی برای حالت $a > 1$ می‌باشد.

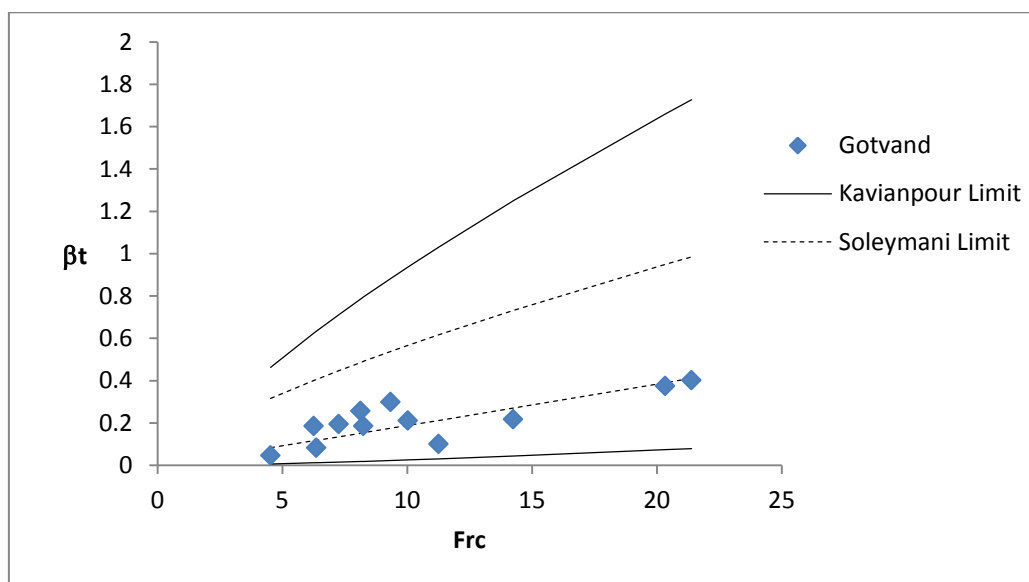
برای تعیین روابط حد بالا و حد پایین داده‌های این دسته، رابطه (۵-۲۴) ملاک عمل قرار گرفته است. در این رابطه به غیر از عدد فرود، دو پارامتر دیگر به هندسه تونل مربوط هستند و برای یک مدل ثابت می‌باشند. با بررسی پراکندگی داده‌های مدل‌های مختلف، روابط (۵-۲۵) و (۵-۲۶) بعنوان حد بالا و پایین داده‌ها نتیجه‌گیری شده‌اند:

$$\beta = 0.0012 Fr_c^{0.73} a^{1.74} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{7.86} \quad (۵-۲۵) \text{ حد بالا}$$

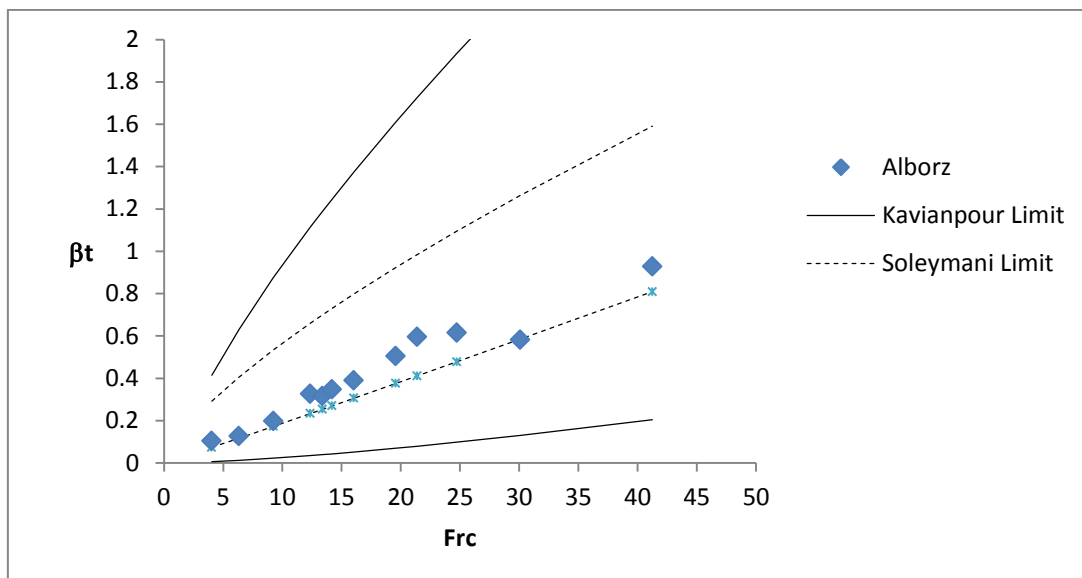
$$\beta = 0.0002 Fr_c^{1.03} a^{1.74} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{7.86} \quad (26-5) \text{ حد پایین}$$



شکل (۱۳-۵): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه سرویس مدل زاوه با روابط (۲۵-۵) و (۲۶-۵)



شکل (۱۴-۵): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه سرویس مدل گتوند علیا با روابط (۲۵-۵) و (۲۶-۵)

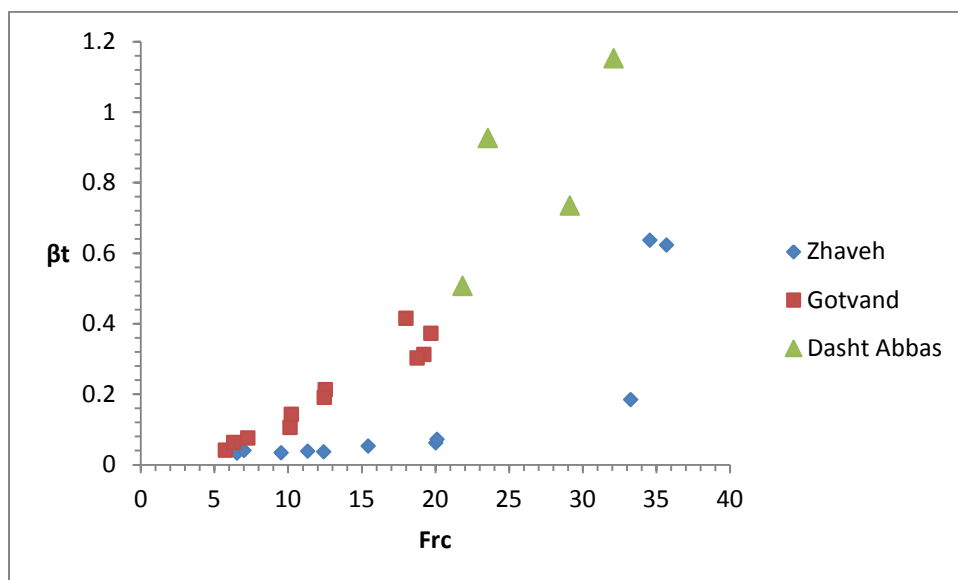


شکل (۵-۱۵): مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی دریچه سرویس مدل البرز با روابط (۵-۲۵) و (۵-۲۶)

۵-۴- ارزیابی میزان هوادهی بین دو دریچه

همانطور که در فصل سوم بیان شد، اطلاعات کمی از پارامترهای تاثیرگذار بر هوادهی بین دو دریچه در هنگام عملکرد دریچه اضطراری، موجود است. لذا جهت بررسی پارامترهای تاثیرگذار آزمایشاتی بر روی دو مدل ژاوه و گتوند علیا توسط نگارنده صورت گرفته است. داده‌های بدست آمده با اطلاعات محدودی از مدل دشت عباس تلفیق و با توجه به روش ارائه شده در بخش قبلی تحلیل شده‌اند. در این حالت برای ۳ مدل فوق از نتایج ۱۲۶ آزمایش برای تحلیل فرآیند هوادهی استفاده شده است. پارامترهای رابطه (۵-۸) بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در فصل چهارم و روابط مذکور در بخش (۵-۲) محاسبه شده‌اند. در این حالت پارامتر A_s / A_w (سطح مقطع بازشدگی دریچه سرویس می‌باشد) نیز به مجموعه پارامترها اضافه شده است.

ضریب هوادهی تجربی مدل‌های مختلف این دسته بر حسب عدد فرود در محل فشردگی، در نمودار شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که نحوه تغییرات β_t (ضریب هوادهی آزمایشگاهی) بر حسب Fr_c در مدل‌های مختلف با هم اختلاف دارند.



شکل (۵-۱۶): نمودار β_t نسبت به Fr_c برای مدل‌های مختلف در حالت هوادهی بین دو دریچه

با انجام تحلیل آماری با استفاده از تمام پارامترهای موجود، ضریب R_p^2 برابر ۰/۹۱۵۳ بدست آمد. سپس با بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف، نتایج مندرج در جدول (۵-۴) بدست آمد. در این جدول نتایج مجموعه‌های مختلف از پارامترها بر اساس ضریب R_p^2 اصلاح شده ($adj R_p^2$) بصورت نزولی مرتب شده است. اعداد داخل پرانتز در ستون دوم جدول (۵-۴) معرف تعداد پارامترهای موجود در مجموعه مربوطه هستند.

جدول (۵-۴): نتایج بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف در تحلیل داده‌های مربوط به هوادهی بین دو دریچه

No.	Parameters	R_p^2	$adj R_p^2$
۱	$Fr_c, Re, G_e, G_s, A_d/A_g, h_g/b_g, \gamma - G_e (7)$	۰/۹۱۵۳	۰/۹۱۱۶
۲	$Fr_c, Re, G_e, G_s, A_d/A_g, \gamma - G_e (6)$	۰/۹۱۳۳	۰/۹۱۴۷
۳	$Fr_c, Re, G_e, A_d/A_g, \gamma - G_e (5)$	۰/۹۱۰۴	۰/۹۰۷۶
۴	$Fr_c, G_e, A_d/A_g, h_g/b_g, \gamma - G_e (5)$	۰/۹۰۹۸	۰/۹۰۷۵
۵	$Fr_c, G_e, A_d/A_g, h_g/b_g (4)$	۰/۹۰۵۲	۰/۹۰۲۸
۶	$Fr_c, Re, G_e, A_d/A_g (4)$	۰/۹۰۰۹	۰/۸۹۸۴

۷	$Re, G_e, A_d/A_g, \lambda - G_e (\xi)$	۰/۸۹۶۳	۰/۸۹۲۵
۸	$Fr_c, A_d/A_g, h_g/b_g (\zeta)$	۰/۸۸۴۳	۰/۸۸۱۲
۹	$Fr_c, Re, We_c, G_e, G_s, A_d/A_g, A_s/A_w, h_g/b_g, a, h_g/h_c, b_g/h_c, \lambda - G_e (\eta)$	۰/۹۱۵۳	۰/۸۷۳۵

با توجه به جدول (۴-۵) مجموعه پارامترهای شماره ۵ با ۴ پارامتر و ضریب R_p^r برابر با ۰/۹۰۵۲ مناسب ترین گزینه می باشد. برای بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف مجموعه شماره ۵ بر دقت تخمین β ، ابتدا Fr_c را در نظر گرفته و رابطه مربوطه و ضریب R_p^r حاصل و سپس بقیه پارامترها اضافه شده است. نتایج حاصل در روابط (۲۷-۵) الی (۳۰-۵) ارائه شده است.

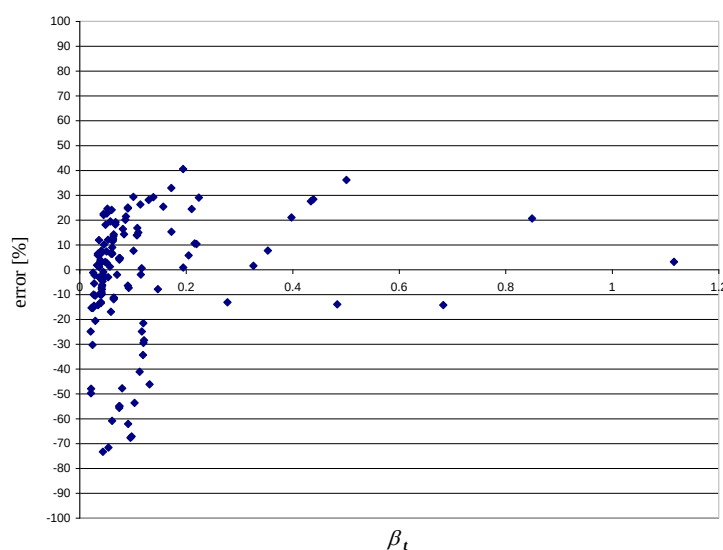
$$\beta_c = 0.0026 Fr_c^{1.1482} \quad R_p^r = ۰/۴۳۱۶ \quad (۲۷-۵)$$

$$\beta_c = 0.0011 Fr_c^{1.2154} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.3156} \quad R_p^r = ۰/۸۱۲۲ \quad (۲۸-۵)$$

$$\beta_c = 0.0418 Fr_c^{1.076} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.8455} \left(\frac{A_d}{A_g} \right)^{0.8472} \quad R_p^r = ۰/۸۸۸۳ \quad (۲۹-۵)$$

$$\beta_c = 0.906 Fr_c^{0.5823} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.2675} \left(\frac{A_d}{A_g} \right)^{0.7536} G_e^{-0.3265} \quad R_p^r = ۰/۹۰۵۲ \quad (۳۰-۵)$$

با توجه به نمودار زیر، ۴۲/۵٪ خطاها در دامنه ۱۰-٪ و ۱۰٪ و ۶۶/۹٪ خطاها در دامنه ۲۰-٪ و ۲۰٪ و ۸۹/۱٪ خطاها در دامنه ۴۰-٪ و ۴۰٪ قرار دارند و ۵۲/۶٪ خطاها مثبت و ۴۷/۴٪ آنها منفی می باشند. میانگین خطاها ۱۸/۳٪ و جذر میانگین مربعات خطاها برابر ۲۵/۱٪ می باشند.



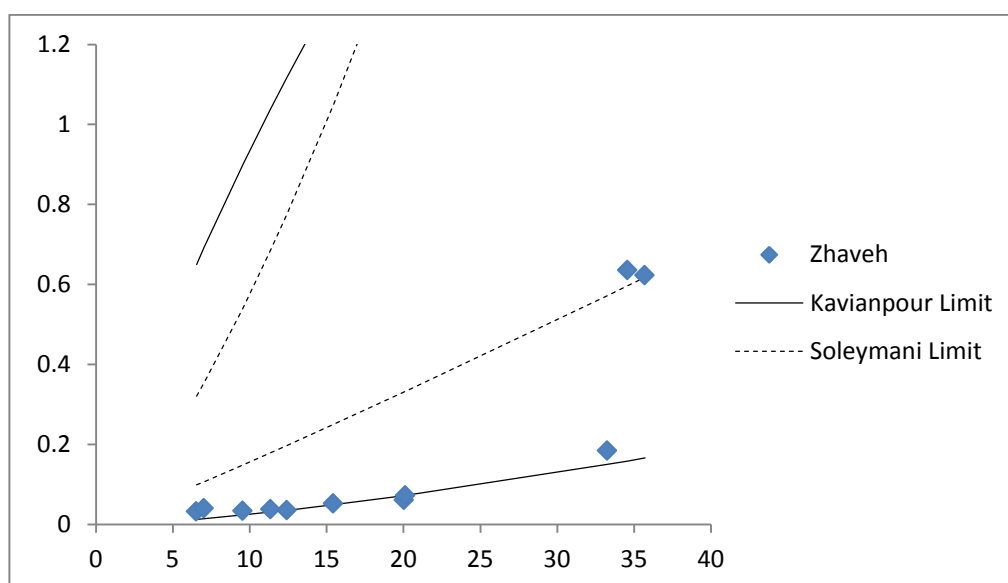
شکل (۵-۱۷) : نمودار خطای محاسباتی رابطه (۵-۳۰)

رابطه (۵-۳۰) با دقت بالا برآوردی از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی برای حالت هوادهی بین دو دریچه می‌باشد. نکته قابل توجه در ارتباط با نتایج بررسی‌های فوق آن است که هوادهی بین دو دریچه در هنگام عملکرد توام آن دو با توجه به کل دامنه بازشدگی‌های دریچه‌ها، به شرایط هندسی تونل و هواده و میزان بازشدگی دریچه اضطراری وابستگی بیشتری دارد. البته میزان بازشدگی دریچه سرویس و همچنین عدد فرود، تاثیر زیاد خود را در زمانی نشان می‌دهند که بازشدگی‌های دو دریچه حدوداً یکسان می‌باشند.

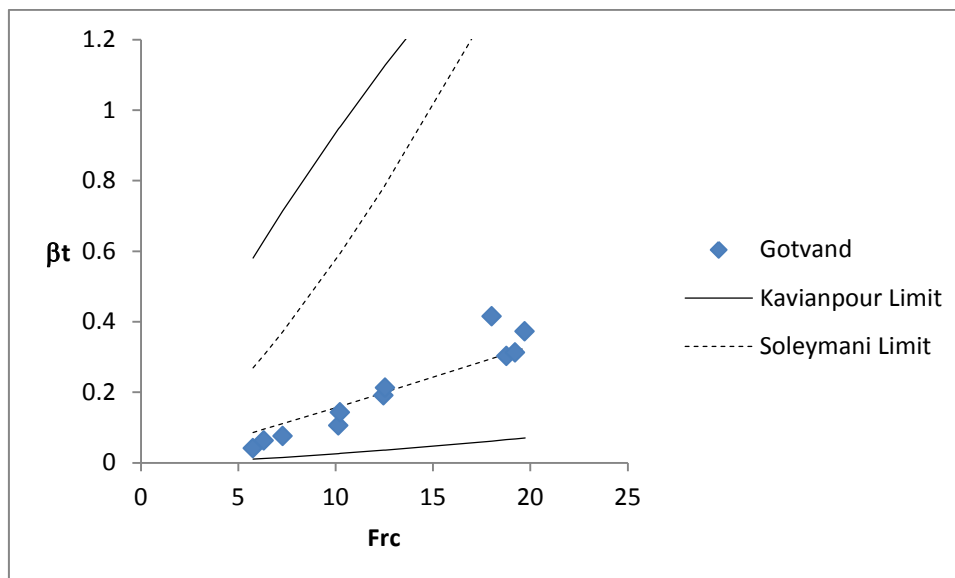
برای تعیین روابط حد بالا و حد پایین داده‌های این دسته، رابطه (۵-۲۹) ملاک عمل قرار گرفته است زیرا در این رابطه به غیر از عدد فرود، دو پارامتر دیگر به هندسه تونل و هواده مربوط هستند و برای یک مدل ثابت می‌باشند. با بررسی نحوه پراکندگی داده‌های مدل‌های مختلف، روابط (۵-۳۱) و (۵-۳۲) بعنوان حد بالا و پایین داده‌ها نتیجه‌گیری شده‌اند:

$$\beta = 0.024 Fr_c^{1.38} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.85} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.85} \quad \text{حد بالا (۳۱-۵)}$$

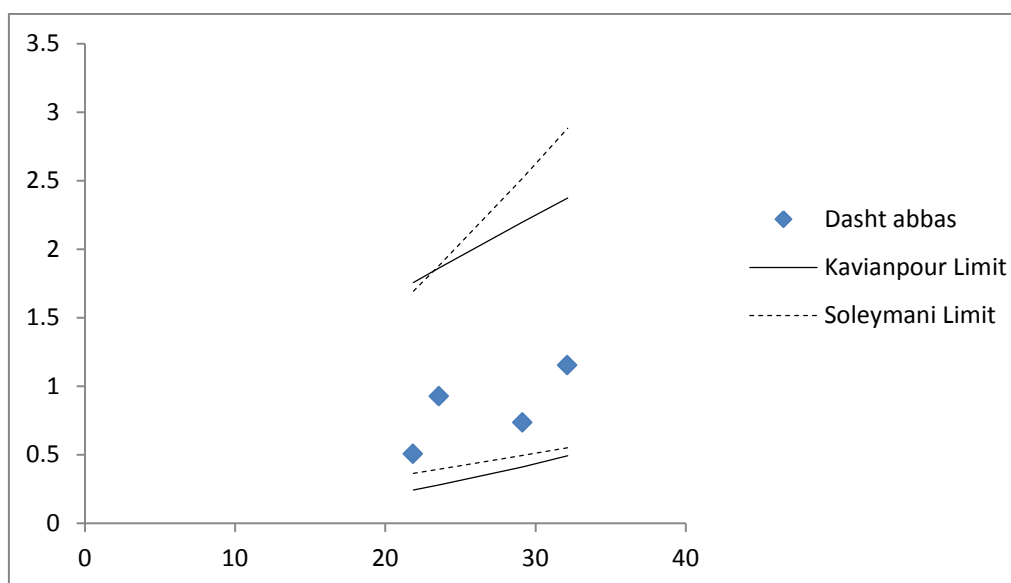
$$\beta = 0.013 Fr_c^{1.08} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.85} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.85} \quad \text{حد پایین (۳۲-۵)}$$



شکل (۱۸-۵) : مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی بین دو دریچه مدل ژاوه با روابط (۳۱-۵) و (۳۲-۵)



شکل (۵-۱۹) : مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی بین دو دریچه مدل گتوند علیا با روابط (۵-۳۱) و (۵-۳۲)

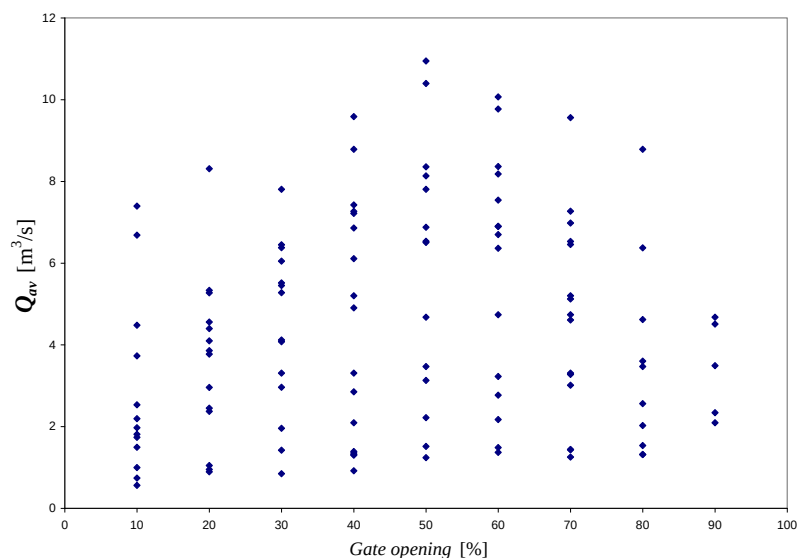


شکل (۵-۲۰) : مقایسه نتایج آزمایش‌های هوادهی بین دو دریچه مدل دشت عباس با روابط (۵-۳۱) و (۵-۳۲)

۵-۵- دبی هوادهی ماکزیمم

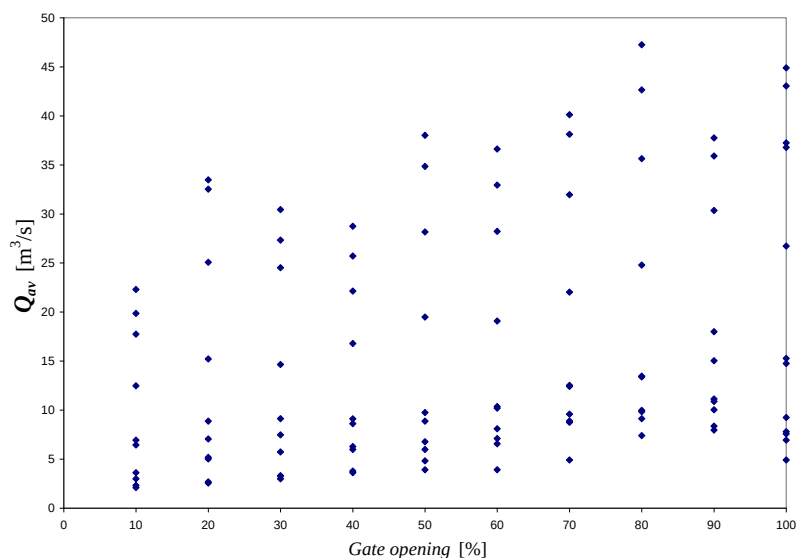
برای طراحی هواده‌ها لازم است دبی ماکزیمم هوای عبوری از هواده برای حالات مختلف جریان آب عبوری از تخلیه‌کننده برآورد گردد. همانطور که در فصل سوم بیان شد، در برخی منابع (Davis & Sorensen, 1984)، ماکزیمم هوادهی در بازشدگی ۸۰٪ گزارش گشته است. این در حالی

است که کاوانپور (۱۳۷۹) با بررسی مدل‌های فیزیکی تخلیه‌کننده‌ها مشاهده نمود که به‌علت دو مکانیزم مختلف تاثیرگذار بر هواگیری جریان در تخلیه‌کننده‌ها، Q_{av} ماکزیمم در بازشدگی ۵۰٪ و یا ۹۰٪-۱۰۰٪ در مدل‌های مختلف اتفاق می‌افتد. به همین دلیل برای تعیین شرایطی که دبی هوای ماکزیمم در آنها روی می‌دهد، برای سه حالت هوادهی پایین‌دست یک دریچه با $a \leq 1$ و $a > 1$ و نیز هوادهی بین دو دریچه، برای هر مدل جداول مربوطه در فصل چهارم مورد بررسی قرار گرفته و همچنین برای ارائه دیدگاهی کلی نمودارهای Q_{av} نسبت به بازشدگی دریچه برای نتایج تجربی این جداول در شکل‌های (۲۱-۵) و (۲۲-۵) و (۲۳-۵) رسم شده‌اند.



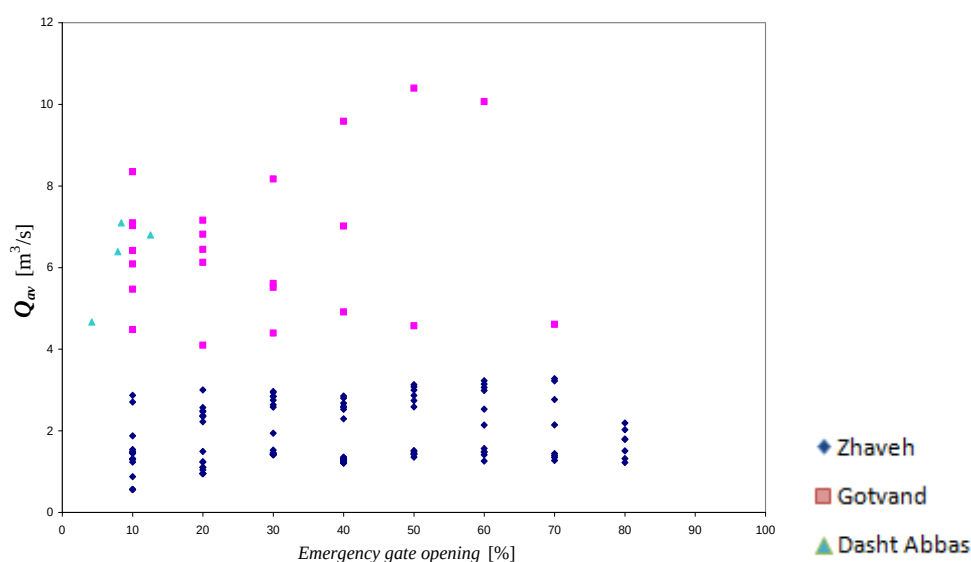
شکل (۲۱-۵): نمودار دبی هوای عبوری از هواده در مقیاس واقعی نسبت به بازشدگی

دریچه برای حالت هوادهی پایین‌دست یک دریچه با $a \leq 1$



شکل (۲۲-۵): نمودار دبی هوای عبوری از هواده در مقیاس واقعی نسبت به بازشدگی

دریچه برای حالت هوادهی پایین دست یک دریچه با $a > 1$



شکل (۲۳-۵): نمودار دبی هوای عبوری از هواده در مقیاس واقعی نسبت به بازشدگی

دریچه اضطراری برای حالت هوادهی بین دو دریچه

با بررسی داده‌های مربوط به هوادهی پایین دست یک دریچه با هواگیری جت از یک وجه و با

توجه به نمودار شکل (۲۱-۵)، دبی ماکزیمم هوا در مدل‌های مختلف در بازشدگی‌های دریچه ۴۰٪

الی ۶۰٪ روی می‌دهد. در نمودار شکل (۲۱-۵) داده‌های مربوط به مدل Folsom بعلت بالا بودن

مقدار دبی هوا نسبت به سایر مدل‌ها نشان داده نشده است. با بررسی داده‌های مربوط به هوادهی

پایین دست یک دریچه با هواگیری جت از چهار وجه و با توجه به نمودار شکل (۵-۱۸)، دبی ماکزیمم هوا در مدل های مختلف در بازشدگی های دریچه ۸۰٪ الی ۱۰۰٪ روی می دهد. دلیل اختلاف نتایج این دو دسته را می توان شرایط هندسی متفاوت در پایین دست دریچه ها در این دو حالت عنوان کرد. زیرا در حالت اول با افزایش بازشدگی در هد ثابت و در نتیجه افزایش دبی جریان آب، تونل پایین دست دریچه در حال پر شدن است و فضای بالای سطح آب کوچکتر می گردد.

در نمودار شکل (۵-۲۳) دبی هوا برای تونل های مختلف در حالت هوادهی بین دو دریچه بصورت مجزا ترسیم شده است و مشاهده می گردد که به علت هندسه متفاوت و اختلاف فاصله دو دریچه از یکدیگر در تخلیه کننده های ژاوه و گتوند علیا روند هواگیری فرق دارد. در تخلیه کننده ژاوه دبی ماکزیمم برای هد پایینتر در بازشدگی دریچه اضطراری و سرویس بترتیب ۶۰٪ و ۶۰٪ و همچنین ۳۰٪ و ۴۰٪ و برای هد بالاتر در بازشدگی دریچه اضطراری و سرویس بترتیب ۵۰٪ و ۶۰٪ و همچنین ۶۰٪ و ۷۰٪ روی می دهد. در این نتیجه گیری از حالاتی که بازشدگی دریچه سرویس ۱۰۰٪ می باشد، صرف نظر شده است ولی در نمودار شکل (۵-۲۲) این نقاط نیز موجود هستند و لازم است در بررسی نمودار مزبور به این نکته توجه شود. این اختلافات وجود مکانیزم متفاوت در هدها و بازشدگی های مختلف را نشان می دهد. در تخلیه کننده گتوند علیا نیز با صرف نظر از حالاتی که بازشدگی دریچه سرویس ۱۰۰٪ می باشد دبی هوای ماکزیمم در بازشدگی دریچه اضطراری و سرویس بترتیب ۳۰٪ و ۹۰٪ و نیز ۱۰٪ و ۵۰٪ اتفاق می افتد که نشان از مکانیزم متفاوت هواگیری در بازشدگی های مختلف می باشد.

در فصل ششم، نتایج بدست آمده بدست آمده در این فصل، جمع بندی گشته و نیز پیشنهاداتی برای ادامه تحقیق در زمینه ارزیابی هوادهی در تونل پایین دست دریچه های تخلیه کننده ها ارائه شده است.

فصل ششم:

جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات

همانطور که در قسمت‌های مختلف این پایان‌نامه بیان شده، هوادهی جریان مخصوصاً در تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها بعنوان راهی مطمئن برای جلوگیری یا کنترل بروز فشارهای منفی و کنترل کاویتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای هوادهی کافی جریان، مجرای هواده باید طراحی مناسبی داشته باشد و این طراحی مستلزم آن است که میزان دبی عبوری از هواده به دقت برآورد گردد.

با بررسی روابط موجود در این زمینه، مشخص شد که این روابط برای شرایط خاص و محدودی دارای اعتبار هستند و برای شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی جریان پایین‌دست دریاچه مناسب نمی‌باشند. برخی از این روابط از پوش داده‌های تجربی بدست آمده‌اند و در بر گیرنده پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر هوادهی جریان نیستند و لذا ممکن است برای تونلی با هندسه و شرایط هیدرولیکی متفاوت، دبی هوای بالایی را نتیجه دهند که در طراحی هواده منجر به افزایش قطر آن می‌گردد. البته باید به این واقعیت اشاره نمود که جریان با هواگیری در تونل پایین‌دست دریاچه‌ها دارای پیچیدگی‌های زیادی است و نمی‌توان در قالب روابط ریاضی به توصیف دقیق آن پرداخت. اما به دلیل نیاز طراحان لازم است با بررسی دقیقتر این پدیده به نتایج و روابطی کاربردی دست یافت که با خطای کمتر و بصورت مناسب توصیف‌کننده ویژگی‌ها و حالات مختلف این پدیده باشند. در همین راستا در این رساله سعی گشته با بررسی داده‌های زیادی از مدل‌های مختلف با شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف، روابطی ارائه گردند که دبی محتمل جریان هوای عبوری از هواده را با دقت بالا پیش‌بینی نماید در حالیکه برای تونل‌هایی با هندسه مختلف قابل استفاده باشند.

از طرف دیگر ارزیابی هوادهی بین دو دریاچه غالباً بر اساس نتایج مدل انجام می‌گیرد و عوامل مختلف تاثیرگذار به درستی مشخص نمی‌باشد و بررسی مناسبی تاکنون از این پدیده صورت نگرفته است. به همین دلیل در این پایان‌نامه همچنین تلاش شده با انجام آزمایشات، داده‌های تجربی

جدیدی از مدل‌ها بدست آید و با بررسی آنها، عوامل مختلف تاثیرگذار بر هوادهی بین دو دریچه در زمان عملکرد دریچه اضطراری مشخص گردد و رابطه‌ای برای تخمین شدت هواگیری در این زمینه با دقت بالا ارائه گردد.

۶-۲- جمع‌بندی نتایج

با توجه به بررسی داده‌های تجربی موجود و نتایج تحقیقات پیشین، به علت تاثیر هندسه و عملکرد دریچه‌ها بر هوادهی، تعیین میزان هوادهی هواده‌ها در مدل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها به دو بخش اصلی پایین دست یک دریچه و بین دو دریچه تقسیم شده است. همچنین هوادهی پایین دست یک دریچه، به علت وجود دو مکانیزم حاکم بر سیستم هوادهی، به دو قسمت هوادهی پایین دست یک دریچه بدون افزایش سطح مقطع تونل در پایین دست (دسته $a \leq 1$) و هوادهی پایین دست یک دریچه با افزایش سطح مقطع تونل در پایین دست (دسته $a > 1$) تقسیم گشته است. در حالت اول هوا صرفاً از ناحیه بالای جت وارد جریان آب می‌گردد و در حالت دوم جت از چهار طرف هوادهی می‌شود. لازم به ذکر است که در بررسی‌های انجام شده داده‌های تجربی مورد استفاده مربوط به کل دامنه بازشدگی دریچه‌ها می‌باشند و شامل حالات مختلف جریان پایین دست دریچه (فصل سوم) هستند.

با تحلیل داده‌های تجربی هر دسته، روابطی جداگانه برای آنها ارائه شده‌اند. البته نتایج حاصل از این روابط به اعمال ضریبی جهت تعمیم نتایج به پروتوتیپ نیاز دارند که در مطالعات مدلی همواره توصیه می‌گردد. در ادامه نتایج بدست آمده از تحلیل داده‌های تجربی با توجه به تقسیم‌بندی فوق جمع‌بندی شده است.

۶-۲-۱- نتایج تحلیل داده‌های هوادهی پایین دست یک دریچه مربوط به دسته

$$a \leq 1$$

از مدل‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه با توجه به هندسه تونل پایین دست دریچه، جت خروجی از دریچه اضطراری مدل‌های ژاوه، گتوند علیا، البرز و جره و دریچه کنترل مدل Folsom صرفاً از سطح بالایی خود هواگیری می‌نماید و لذا نتایج ۱۰۳ آزمایش مربوط به ۵ مدل فوق در دسته $a \leq 1$ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با انجام تحلیل آماری با استفاده از تمام پارامترهای مورد نظر، ضریب R_p^2 برابر ۰/۸۵۳۴ برای این حالت بدست آمده است. با بررسی میزان تاثیر پارامترهای استفاده شده بر دقت تخمین β و با حذف پارامترهای با تاثیر پایین دو رابطه (۵-۱۸) و (۵-۱۹) بترتیب با ۵ و ۶ پارامتر و ضریب R_p^2 برابر با ۰/۸۱۴۱ و ۰/۸۴۸۵ بدست آمده‌اند.

با وجود اینکه رابطه (۵-۱۹) دارای دقت بیشتری ولی یک پارامتر بیشتر دارد و حضور عدد رینولدز باعث پیچیده شدن آن رابطه شده است و لازم است با دقت بیشتری این رابطه به شرایط پروتوتیپ تعمیم داده شود. به همین دلیل رابطه (۶-۱) که همان رابطه (۵-۱۸) می‌باشد بعنوان برآوردی مناسب از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی برای حالت $a \leq 1$ معرفی می‌گردد. اما تاثیر عدد رینولدز در دقت‌تر شدن تخمین β نشانگر آن است که شدت آشفته‌گی جریان و بالطبع سرعت جریان بر هوادهی در این حالت تاثیر زیادی دارند.

$$\beta = 0.4265 Fr_c^{0.3352} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.6792} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.431} a^{2.7052} (1-G)^{0.7641} \quad R_p^2 = 0.8141 \quad (6-1)$$

بررسی درصد خطای محاسباتی رابطه (۶-۱) برای داده‌های تجربی نشان می‌دهد که ۴۵/۳٪ خطاها در دامنه ۲۵-٪ و ۲۵٪ و ۸۰/۹٪ خطاها در دامنه ۵۰-٪ و ۵۰٪ و ۹۲/۴٪ خطاها در دامنه ۷۰-٪ و ۷۰٪ قرار دارند و ۴۹/۱٪ خطاها مثبت و ۵۰/۹٪ آنها منفی می‌باشند. میانگین خطاها ۴۱٪ و جذر میانگین مربعات خطاها برابر ۵۸/۸٪ می‌باشند. با توجه به نتایج فوق و نمودار درصد خطای محاسباتی

رابطه (۱-۶) (شکل ۴-۵) و مقایسه آن با نمودارهای مربوط به تحقیقات پیشین (فصل چهارم) نتیجه‌گیری می‌شود که رابطه (۱-۶) برآورد دقیق‌تری از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی برای حالت $a \leq 1$ می‌باشد.

با بررسی نحوه پراکندگی داده‌های مدل‌های مختلف، دو رابطه زیر بعنوان حد بالا و پایین برای داده‌های تجربی این دسته نتیجه‌گیری شده‌اند:

$$\beta = 0.0926 Fr_c^{0.74} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.59} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.71} a^{1.88} \quad (۲-۶) \text{ حد بالا}$$

$$\beta = 0.0027 Fr_c^{1.44} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.59} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.71} a^{1.88} \quad (۳-۶) \text{ حد پایین}$$

روابط (۲-۶) و (۳-۶) این ویژگی را دارند که برای شرایط هندسی مختلف منحنی‌های مختلفی بر حسب Fr_c نتیجه می‌دهند و لذا نسبت به روابط حدی تحقیقات پیشین دارای انعطاف بیشتری هستند و تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی نتایج مناسب‌تری ارائه می‌دهند.

با بررسی داده‌های مربوط به این دسته، دبی ماکزیمم هوا در مدل‌های مختلف در بازشدگی‌های دریچه ۴۰٪ الی ۶۰٪ روی می‌دهد. در این بازشدگی‌ها برای هد طراحی تخلیه‌کننده‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه، نتایج رابطه (۱-۶) از نتایج تجربی بزرگتر هستند و بنابراین با توجه به میزان دقت رابطه (۱-۶) می‌توان از آن در طراحی هواده‌ها استفاده نمود.

۲-۲-۶- نتایج تحلیل داده‌های هوادهی پایین‌دست یک دریچه مربوط به دسته $a > 1$

از مدل‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه با توجه به هندسه تونل پایین‌دست دریچه، جت خروجی از دریچه سرویس مدل‌های ژاوه، گتوند علیا و البرز از چهار طرف هواگیری می‌نماید و لذا نتایج ۷۶ آزمایش مربوط به ۳ مدل فوق در دسته $a > 1$ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با انجام تحلیل

آماری با استفاده از تمام پارامترهای مورد نظر، ضریب R_p^2 برابر $0/8875$ برای این حالت بدست آمده است. با بررسی میزان تاثیر پارامترهای استفاده شده بر دقت تخمین β و با حذف پارامترهای با تاثیر پایین رابطه (۲۴-۵) با ۳ پارامتر و ضریب R_p^2 برابر با $0/8849$ نتیجه شده است. به همین دلیل رابطه (۴-۶) که همان رابطه (۲۴-۵) می باشد بعنوان برآوردی با دقت بالا از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی برای حالت $a > 1$ معرفی می گردد.

$$\beta_c = 6.65 \times 10^{-4} Fr_c^{0.8235} a^{1.7386} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{7.8612} \quad R_p^2 = 0/8849 \quad (4-6)$$

بررسی درصد خطای محاسباتی رابطه (۴-۶) برای داده های تجربی نشان می دهد که $44/8\%$ خطاها در دامنه 10% و 10% و $73/8\%$ خطاها در دامنه 20% و 20% و $92/8\%$ خطاها در دامنه 40% و 40% قرار دارند و تعداد خطاهای مثبت و منفی با هم برابر می باشند. میانگین خطاها $15/8\%$ و جذر میانگین مربعات خطاها برابر $22/3\%$ می باشند.

با توجه به نتایج فوق و نمودار درصد خطای محاسباتی رابطه (۴-۶) (شکل ۵-۸) و مقایسه آن با نمودارهای مربوط به تحقیقات پیشین (فصل چهارم) نتیجه گیری می شود که رابطه (۴-۶) برآوردی دقیقتر از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی برای حالت $a > 1$ می باشد.

با بررسی نحوه پراکندگی داده های مدل های مختلف، دو رابطه زیر بعنوان حد بالا و پایین برای داده های تجربی این دسته نتیجه گیری شده اند:

$$\beta = 0.0016 Fr_c^{0.75} a^{1.74} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{7.86} \quad (5-6) \text{ حد بالا}$$

$$\beta = 0.0003 Fr_c^{1.05} a^{1.74} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{7.86} \quad (6-6) \text{ حد پایین}$$

روابط فوق بعثت داشتن پارامترهایی مربوط به هندسه تونل، این ویژگی را دارند که برای شرایط هندسی مختلف منحنی‌های مختلفی بر حسب Fr_c نتیجه می‌دهند و لذا نسبت به روابط حدی تحقیقات پیشین دارای انعطاف بیشتری هستند و تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی نتایج مناسبتری ارائه می‌دهند.

با بررسی داده‌های مربوط به این دسته، دبی ماکزیمم هوا در مدل‌های مختلف در بازشدگی‌های دریچه ۸۰٪ الی ۱۰۰٪ روی می‌دهد. در این بازشدگی‌ها برای هد طراحی تخلیه‌کننده‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه، نتایج رابطه (۴-۶) با نتایج تجربی مدل‌های ژاوه و گتوند علیا تطابق خوبی دارند ولی از نتایج مدل البرز تا حدودی کمتر می‌باشند و لذا با اعمال ضریبی به نتایج رابطه (۴-۶) می‌توان از آن در طراحی هواده‌ها استفاده نمود.

۳-۲-۶- نتایج تحلیل داده‌های هوادهی بین دو دریچه

نتایج ۱۲۶ آزمایش از ۳ مدل ژاوه، گتوند علیا و دشت عباس برای تحلیل فرآیند هوادهی بین دو دریچه در هنگام عملکرد دریچه اضطراری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با انجام تحلیل آماری با استفاده از تمام پارامترهای مورد نظر، ضریب R_p^2 برابر ۰/۹۱۵۳ بدست آمده است. با بررسی میزان تاثیر پارامترهای مستعمل بر دقت تخمین β و با حذف پارامترهای با تاثیر پایین رابطه (۵-۳۰) با ۴ پارامتر و ضریب R_p^2 برابر با ۰/۹۰۵۲ نتیجه شده است. به همین دلیل رابطه (۶-۷) که همان رابطه (۵-۳۰) می‌باشد بعنوان برآوردی با دقت بالا از نحوه تغییرات ضریب هوادهی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی برای حالت هوادهی بین دو دریچه در هنگام عملکرد اضطراری معرفی می‌گردد.

$$\beta_c = 0.906 Fr_c^{0.5832} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.2675} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.7536} G_e^{-0.3265} \quad R_p^r = 0.9052 \quad (7-6)$$

بررسی درصد خطای محاسباتی رابطه (۷-۶) برای داده‌های تجربی نشان می‌دهد که ۴۲/۵٪ خطاها در دامنه ۱۰-٪ و ۱۰٪ و ۶۶/۹٪ خطاها در دامنه ۲۰-٪ و ۲۰٪ و ۸۹/۱٪ خطاها در دامنه ۴۰-٪ و ۴۰٪ قرار دارند و ۵۲/۶٪ خطاها مثبت و ۴۷/۴٪ آنها منفی می‌باشند. میانگین خطاها ۱۸/۳٪ و جذر میانگین مربعات خطاها برابر ۲۵/۱٪ می‌باشند.

نکته قابل توجه در ارتباط با نتایج بررسی‌های فوق آن است که هوادهی بین دو دریچه در هنگام عملکرد توام آن دو با توجه به کل دامنه بازشدگی‌های دریچه‌ها، به شرایط هندسی تونل و هواده و میزان بازشدگی دریچه اضطراری وابستگی بیشتری دارد. میزان بازشدگی دریچه سرویس و عدد فرود تاثیر زیاد خود را زمانی نشان می‌دهند که میزان بازشدگی‌های دو دریچه نزدیک به هم باشند. بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری نمود که دو مکانیزم مختلف برای هوادهی بین دو دریچه در زمان عملکرد توام آنها وجود دارد. یک مکانیزم مربوط به میزان بازشدگی‌های نزدیک به هم دو دریچه است و دیگری به میزان بازشدگی‌های با اختلاف زیادتر دو دریچه ارتباط دارد. آزمایشات نشان می‌دهد که اگر بازشدگی دریچه سرویس کمتر از بازشدگی دریچه اضطراری گردد، هواده از آب پر می‌گردد.

با بررسی نحوه پراکندگی داده‌های مدل‌های مختلف، روابط زیر بعنوان حد بالا و پایین داده‌ها نتیجه‌گیری شده‌اند:

$$\beta = 0.024 Fr_c^{1.38} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.85} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.85} \quad \text{حد بالا} \quad (8-6)$$

$$\beta = 0.013 Fr_c^{1.08} \left(\frac{h_g}{b_g} \right)^{3.85} \left(\frac{A_a}{A_g} \right)^{0.85} \quad (9-6) \text{ حد پایین}$$

روابط (۸-۶) و (۹-۶) این ویژگی را دارند که برای شرایط هندسی مختلف منحنی‌های مختلفی بر حسب Fr_c نتیجه می‌دهند.

با بررسی داده‌های مربوط به این دسته، دبی ماکزیمم بعثت هندسه متفاوت و اختلاف فاصله دو دریچه از یکدیگر در تخلیه‌کننده‌های مختلف در شرایط مختلفی روی می‌دهد. همچنین این شرایط در یک تخلیه‌کننده بر حسب هد جریان متغیر است. در تخلیه‌کننده ژاوه دبی ماکزیمم برای هد پایین‌تر در بازشدگی دریچه اضطراری و سرویس بترتیب ۶۰٪ و ۶۰٪ و همچنین ۳۰٪ و ۴۰٪ و برای هد بالاتر در بازشدگی دریچه اضطراری و سرویس بترتیب ۵۰٪ و ۶۰٪ و همچنین ۶۰٪ و ۷۰٪ روی می‌دهد و در تخلیه‌کننده گتوند علیا نیز دبی هوای ماکزیمم در بازشدگی دریچه اضطراری و سرویس بترتیب ۳۰٪ و ۹۰٪ و نیز ۱۰٪ و ۵۰٪ اتفاق می‌افتد. در بهره‌برداری از تخلیه‌کننده‌ها باید سعی شود شرایط وقوع دبی هوای ماکزیمم فراهم نگردد یا باید سرعت از آنها عبور کرد.

تحت شرایط بحرانی فوق نتایج رابطه (۷-۶) از نتایج تجربی تا حدودی بزرگتر هستند و بنابراین می‌توان با استفاده از این رابطه برآوردی از دبی در این شرایط بحرانی بدست آورد. لازم به ذکر است در دو مدل ژاوه و گتوند علیا در حالتی که دریچه سرویس کاملاً باز می‌باشد و دریچه اضطراری در وضعیتی است که دبی هوای عبوری از هواده ماکزیمم می‌باشد، رابطه (۷-۶) نتایجی بزرگتر از نتایج تجربی ارائه می‌دهد و این اختلاف در حد قابل قبولی می‌باشد.

۶-۳- پیشنهاداتی برای ادامه تحقیق

با توجه به بررسیهای انجام گرفته و نتایج بدست آمده در این پایان نامه، پیشنهاداتی را برای ادامه تحقیق در زمینه هوادهی پایین دست دریچه های تخلیه کننده ها در دو زمینه بررسی های تجربی و روش های تحلیل ارائه می نماییم. در زمینه بررسی های تجربی موارد زیر پیشنهاد می گردند:

❖ با انجام آزمایشاتی بر مدل های بیشتر با ویژگی های متفاوت، داده های بیشتری گردآوری شود تا نتایج تحلیل داده ها دارای دقت و اعتبار بیشتری باشد.

❖ در انجام آزمایشات از ابزار دقیق همچون سنسورهای دقیق برای اندازه گیری سرعت آب در داخل جریان (Hot-Film) و همچنین سنسورهای دقیق برای اندازه گیری سرعت هوا در هواده (Hot-Wire)، سنسورها و ابزار دقیق اندازه گیری فشار بخصوص در هواده ها و سیستم لیزری داپلر برای تعیین سرعت و توزیع آن با دقت بالا در مجرای آب، استفاده شود تا اطلاعاتی با حداقل خطا حاصل گردند.



شکل (۶-۱): نمایی از یک دستگاه Hot wire جهت اندازه گیری سرعت هوا

❖ آزمایشات مستقیمی بر تخلیه کننده های پروتوتیپ صورت گیرد و نتایج آن با آزمایشات مدل مقایسه شود. با انجام این مقایسه، ضریبی برای ارتباط روابط بدست آمده از داده های مدل به نتایج پروتوتیپ بدست آید. این امر دارای اهمیت فراوانی است زیرا در مدل شدت آشفته گی جریان خیلی پایین تر است و نیز خطاهای مقیاسی دیگری در این میان وجود دارند. در نتیجه

کم بودن شدت آشفته‌گی جریان در مدل، میزان هوادهی در مدل کمتر از میزان هوادهی در پروتوتیپ می‌باشد.

❖ همانطور که اشاره شد می‌توان نتیجه‌گیری نمود که دو مکانیزم مختلف برای هوادهی بین دو دریچه در زمان عملکرد توام آنها وجود دارد. یک مکانیزم مربوط به میزان بازشدگی‌های نزدیک به هم دو دریچه است و دیگری به میزان بازشدگی‌های با اختلاف زیادتر دو دریچه ارتباط دارد. برای بررسی دقیقتر عوامل تاثیرگذار بر هوادهی در حالت نزدیک به هم بودن میزان بازشدگی‌های دو دریچه، آزمایشاتی در این حالت انجام گیرد.

در زمینه روشهای تحلیل داده‌های تجربی موارد زیر را پیشنهاد می‌نماییم:

❖ موضوع هوادهی موشکافانه‌تر بررسی شود و پارامترهای تاثیرگذار دیگری در صورت وجود در تحلیل داده‌ها در نظر گرفته شوند. همانطور که مشاهده شد عدد رینولدز مدل بر دقت تخمین میزان هوادهی پایین‌دست یک دریچه در حالت $a \leq 1$ تاثیر می‌گذارد.

❖ با توجه به اینکه در پایین‌دست دریچه تحت شرایط مختلف، حالات مختلفی از جریان روی می‌دهد، داده‌های تجربی مربوط به این حالات تفکیک شده و بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرند.

❖ به منظور ارائه منحنی‌های پوش دقیقتر، در تحلیل داده‌ها محدوده‌ای از بازشدگی‌های دریچه یک مدل مد نظر قرار گیرد که دبی هوای عبوری از هواده در این بازشدگی‌ها نسبت به سایر حالات بیشتر باشند. لازم به ذکر است که در بازشدگی‌های کوچک دریچه بعلاوه ایجاد جریان پودری هوای زیادی نسبت به دبی آب وارد تونل می‌گردد و در نتیجه ضریب هوادهی بزرگی بدست می‌آید در حالیکه غالباً دبی ماکزیمم در این حالت اتفاق نمی‌افتد. همچنین عدد فرود جریان در این حالت بزرگ است.

❖ در مدل هایی که هم پایین دست دریچه اضطراری و هم پایین دست دریچه سرویس دارای

هواده هستند، میزان تاثیر عملکرد این دو هواده بر یکدیگر بررسی گردد.

در پایان نامه حاضر تلاش شد تا ویژگی های عمل هوادهی جریان در تخلیه کننده ها بررسی

گردد و نتایجی کاربردی در این زمینه ارائه شود. البته لازم به ذکر است که تحقیق حاضر حتماً نتیجه

نهایی را ارائه نمی کند و برای توصیف هر چه بهتر این پدیده پیچیده باید بررسی های بیشتر و

دقیقتری صورت گیرد.

مراجع

- ١) Campbel F.B. and Guyton B. (1953), "Air Demand in Gated Outlet Works", Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convention, IAHR/ASCE, Minneapolis, USA, pp. 529-533.
- ٢) Falvey H.T. (1980), "Air-water Flow in Hydraulic Structures", USBR Engineering Monograph No. 41, Denver, USA.
- ٣) Frizell K.W. (1998), "Hydraulic Model Studies of Aeration Enhancements at the Folsom Dam Outlet Works: Reducing Cavitation Damage Potential", Water Resources Research Laboratory, USBR, USA.
- ٤) Killen, J. M., Anderson, A. G., "A Study of the Air-Water Interface in Air Entrained Flow in Open Channels," 13th Congress of the International Association for Hydraulic Research, Japan, vol. 2, pp. 339-347, 1969.
- ٥) Kalinske A.A. and Robertson J.M. (1943), "Closed Conduit Flow", Transactions of Symposium on Entrainment of Air in Flowing Water, ASCE, USA, pp. 1435-1447.
- ٦) 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 Dergree of PHD, Manchester, UK.
- ٧) Montgomery D.C. and Runger G.C. (1994), "Applied Statistics and Probability for Engineers", John Wiley & Sons, New York, USA.
- ٨) Novak P. (1984), "Developments in Hydraulic Engineering-2", Elsevier Applied Science Publishers, New York, USA.
- ٩) Peterka A.J. (1953), "The Effect of Entrained Air on Cavitation Pitting", Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convention, IAHR/ASCE, Minneapolis, USA, pp. 507-518.
- ١٠) Sharma H.R. (1976), "Air-Entrainment in High Head Gated Conduits", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 102(HY 11), pp. 1629-1646.
- ١١) Shi, Q., Pains. Shao, Y., and Yuan, X. (1983). "Experimental Investigation of Flow Aeration to Prevent Cavitation Erosion by a Deflector.", *Shuili Xuebao (Jl of Hydraulic Engrg.)*, Beijing, China, Vol, 3, pp. 1-13.
- ١٢) Speerli J. (1999), "Air Entrainment of Free-Surface Tunnel Flow", VAW, Dissertation ETHZ, CH-8092, Zurich, Switzerland.
- ١٣) United States Army Corps of Engineers (1964), "Hydraulic Design Criteria: Air Demand-regulated Outlet Works", USACE, USA.
- ١٤) Wood I.R. (Editor) (1991), "Air Entrainment in Free Surface Flows", Hydraulic Structures Design Manual No. 4, IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

- ۱۵) کاویانپور م.ر. (۱۳۸۰)، "ارزیابی روابط تجربی ضریب هوادهی دریچه‌ها"، مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی، کرمان، ایران.
- ۱۶) گزارش مدل هیدرولیکی سرریز سد شهید عباسپور (کارون ۱) بخش هیدرولیک، مؤسسه بررسی‌ها و آزمایشگاه‌های منابع آب، وزارت نیرو، خرداد ۱۳۶۳، نشریه شماره ۶۲
- ۱۷) کاویانپور م.ر. و مقسومی ع. و هاشمیان ا. (۱۳۷۹)، "بررسی تجربی هواده‌ها در تخلیه‌کننده‌های تحتانی سدها"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس سدسازی ایران، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران (IRCOLD)، تهران، ایران.
- ۱۸) مؤسسه تحقیقات آب (۱۳۷۹)، "گزارش نهایی مدل هیدرولیکی دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی سد جره"، وزارت نیرو، تهران، ایران.
- ۱۹) مؤسسه تحقیقات آب (۱۳۷۹)، "گزارش نهایی مدل هیدرولیکی دریچه‌های تونل انتقال دشت عباس"، وزارت نیرو، تهران، ایران.
- ۲۰) مؤسسه تحقیقات آب (۱۳۸۲)، "گزارش نهایی مدل هیدرولیکی دریچه‌های تخلیه‌کننده سد البرز"، مؤسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو، تهران، ایران.
- ۲۱) مؤسسه تحقیقات آب (۱۳۸۶)، "گزارش نهایی مدل هیدرولیکی تخلیه‌کننده تحتانی سد ژاوه"، مؤسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو، تهران، ایران.
- ۲۲) مؤسسه تحقیقات آب (۱۳۸۶)، "گزارش نهایی مدل هیدرولیکی تخلیه‌کننده تحتانی سد گتوند علیا"، مؤسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو، تهران، ایران.
- ۲۳) مؤسسه تحقیقات آب (۱۳۸۹) مقسومی ع. "گزارش اولیه مدل هیدرولیکی تخلیه‌کننده تحتانی و حوضچه آرامش سد مخزنی ژاوه"، مؤسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو، تهران، ایران.

Abstract:

In the present thesis, the aeration downstream of gates is studied by evaluating the performance of aerators in bottom outlets of dams. This evaluation is based on the rate of aeration. Experimental data from hydraulic models of outlets built in Water Research Center laboratory were collected and combined with data from other references. According to previous studies and considering the performance of gates, data analysis is classified into two main sections, downstream of one gate and between two gates. According to new studies on the collected data and the results of pervious researches, the first section is classified into two sub-sections, with or without cross-sectional expansion of downstream tunnel. It is because there are two different aeration mechanisms in this section.

The collected data were insufficient for analysis and also there were no data for aeration between two gates while the emergency gate is operating. To complete the data set, new experiments were performed on the existing models of Water Research Center laboratory. Study of the laboratory experiments showed that the results from the equations proposed by other researchers had lots of differences with the experimental results and the evaluation of the performance of aerators would have considerable errors by using these equations. Therefore the effective parameters on aeration downstream of gates are determined and by paying special attention to geometry and hydraulic characteristics of water flow, new equations for each section are presented. Finally by studying air-water flow in hydraulic structure, rate of aeration in bottom outlet gate determine using various parameters of the flow.

Keywords: Bottom outlet, Air-water flow, Gate, Rate of Aeration, Cavitation, Aeration.



Shahrood University of Technology
Department of Civil engineering

**Determination of the aeration of bottom outlet gate using various
parameters of the flow**

Peyman Soleymani

Supervisor:
Dr. Ramin Amini
Counselor:
Eng. Reza Roshan

February 2013