

الحمد لله  
الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

عنوان:

شبیه سازی عددی جریان روی سرریز تنداب و ارزیابی اثرات ارتفاع زبری و شیب  
بستر تنداب بر پتانسیل رخداد کاویتاسیون  
(مطالعه موردی : سد آزاد مریوان)

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

نگارنده:

سید حسین موسوی

تیر ۱۳۹۹

ب



## تشکر و قدردانی

ابتدا خداوند بزرگ را سپاسگزارم که به من توفیق داد تا بتوانم این مرحله از تحصیل خود را با موفقیت به پایان برسانم. همچنین از زحمات و سختی هایی که پدر و مادرم که همواره در این مسیر حامی و پشتیبان من بودند، سپاسگزارم.

در نهایت از جناب دکتر رامین امینی استاد محترم راهنما که در به انتها رساندن پایان نامه کمک و همراه بنده بودند تشکر میکنم.

## تعهد نامه

اینجانب سید حسین موسوی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران – آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه شبیه سازی عددی جریان روی سرریز تنداب و ارزیابی اثرات ارتفاع زبری و شیب بستر تنداب بر پتانسیل رخداد کاویتاسیون (مطالعه موردی) تحت راهنمایی دکتر رامین امینی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است 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 تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، 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، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

## چکیده

در طول سالیان متمادی در کشور ما ایران، سازه های کنترل و ذخیره سازی جریان همانند بندهای انحرافی و سدها بطور گسترده اجرا شده اند. بزرگترین مشکلی که این سازه ها را تهدید می کند، احتمال وقوع کاویتاسیون در نواحی است که جریان آب دارای سرعت زیادی می باشد. تا به حال خسارات شدید کاویتاسیون در سرریزهای بزرگ در سراسر دنیا کشف گردیده است. در سال های اخیر به دلیل ابداع روش های پیشرفته و دقیق حل عددی معادلات و بوجود آمدن رایانه های قدرتمند برای انجام محاسبات، می توان در طراحی سازه های پیچیده هیدرولیکی از روش های عددی بهره جست.

در این تحقیق به کمک نرم افزار تجاری Fluent به بررسی پدیده کاویتاسیون روی سرریز تنداب پرداخته شده است. فرایند مدل سازی در دو مرحله انجام گردید، در گام اول، مدل سازی با هدف بدست آوردن نتایج آزمایشگاهی و عددی مشابه و اطمینان از صحت عملکرد نرم افزار صورت گرفت. نتایج این مرحله نشان داد که مدل ساخته شده با نرم افزار Fluent با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی و نتایج حاصل از آن انطباق مناسبی دارد. در گام دوم نیز مدل سازی علاوه بر مدل اصلی (مدل سرریز با شیب بستر ۳۶,۴٪)، مدل سازی با شیب های ۲۶٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ با ارتفاع زبری های مختلف ۰,۱۵ (بتن صاف)، ۰,۴، ۱,۵، ۳ و ۵ میلی متر بر روی بستر سرریز و تنداب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مرحله نیز نشان داد در مدل با شیب بستر ۲۶٪ و ۳۰٪ پتانسیل وقوع کاویتاسیون به ازای ارتفاع زبری های در نظر گرفته شده کم است. در مدل با شیب ۳۶,۴٪ در قسمتهایی از سرریز با زبری بیشتر پتانسیل وقوع کاویتاسیون پایینتر از مدل های با زبری کمتر می باشد. در مدل با شیب ۴۰٪ برای ارتفاع زبری های در نظر گرفته شده قسمت ۶۰ متر انتهایی سرریز در محدوده بحرانی شاخص کاویتاسیون قرار گرفته و پتانسیل وقوع کاویتاسیون بالا است.

**واژه های کلیدی:** سرریز تنداب، کاویتاسیون، شبیه سازی عددی، Fluent، شیب بستر سرریز، ارتفاع زبری کف سرریز.

## فهرست مطالب

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| فصل اول: مقدمه.....                                                | ۱  |
| ۱-۱- بیان مساله.....                                               | ۲  |
| ۲-۱- اهمیت پژوهش.....                                              | ۲  |
| ۳-۱- هدف پژوهش حاضر و روش انجام آن.....                            | ۴  |
| ۴-۱- ساختار پژوهش.....                                             | ۵  |
| فصل دوم: مبانی نظری و مروری بر تحقیقات پیشین.....                  | ۷  |
| ۱-۲- مقدمه.....                                                    | ۸  |
| ۲-۲- کاویتاسیون.....                                               | ۸  |
| ۳-۲- مکانیزم رخداد پدیده مخرب کاویتاسیون.....                      | ۹  |
| ۴-۲- عوامل موثر بر ایجاد کاویتاسیون.....                           | ۱۰ |
| ۵-۲- طبقه‌بندی کاویتاسیون.....                                     | ۱۱ |
| ۶-۲- انواع کاویتاسیون.....                                         | ۱۲ |
| ۷-۲- منشأ کاویتاسیون.....                                          | ۱۳ |
| ۸-۲- مکانیزم تخریب.....                                            | ۱۴ |
| ۹-۲- اثرات کاویتاسیون بر سرریزها.....                              | ۱۶ |
| ۱۰-۲- عوامل تشدید کننده آسیب رسانی کاویتاسیون به سطح.....          | ۱۷ |
| ۱۱-۲- راه‌های جلوگیری و کاهش خسارت کاویتاسیون.....                 | ۱۷ |
| ۱-۱۱-۲- ایجاد سطوح کاملاً صاف و صیقلی و استفاده از مواد مقاوم..... | ۱۸ |
| ۲-۱۱-۲- هوادهی جریان.....                                          | ۱۸ |
| ۱۲-۲- معرفی سرریزها و عملکرد آنها.....                             | ۱۹ |
| ۱-۱۲-۲- سرریز تندآب (شوت).....                                     | ۲۱ |
| ۱۳-۲- تاربخچه آسیب در سرریز سدها.....                              | ۲۲ |
| ۱۴-۲- توصیف فرآیند کاویتاسیون.....                                 | ۲۶ |
| ۱۵-۲- مروری بر مطالعات پیشین.....                                  | ۳۳ |
| فصل سوم: اصول مدلسازی عددی.....                                    | ۴۵ |
| ۱-۳- مقدمه.....                                                    | ۴۶ |
| ۲-۳- دینامیک سیالات محاسباتی (CFD).....                            | ۴۶ |
| ۳-۳- نرم افزار Fluent.....                                         | ۴۷ |
| ۴-۳- مدل‌های فیزیکی موجود در Fluent.....                           | ۴۸ |
| ۵-۳- روابط حاکم بر میدان جریان.....                                | ۴۹ |
| ۶-۳- مدل‌های آشفتگی.....                                           | ۵۲ |
| ۷-۳- معادلات پروفیل سطح آزاد.....                                  | ۵۳ |

|    |                                                                                        |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------|
| ۵۵ | ۳-۸-صحتسنجی.....                                                                       |
| ۶۱ | فصل چهارم: مدل سازی جریان و نتایج شبیه سازیهای عددی.....                               |
| ۶۲ | ۴-۱-مقدمه.....                                                                         |
| ۶۲ | ۴-۲-مراحل تحلیل مسئله در نرم افزار Fluent.....                                         |
| ۶۷ | ۴-۳-ارائه نتایج.....                                                                   |
| ۶۷ | ۴-۳-۱-تأثیر شیب بستر بر سرعت و فشار در مسیر سرریز.....                                 |
| ۶۹ | ۴-۳-۲-تأثیر ارتفاع زبری کف سرریز بر سرعت و فشار در مسیر سرریز.....                     |
| ۷۱ | ۴-۳-۳-بررسی همزمان اثر ارتفاع زبری و شیب بستر بر سرعت و فشار در مسیر سرریز.....        |
| ۷۳ | ۴-۳-۴-بررسی شاخص کاویتاسیون با در نظر گرفتن ارتفاع زبری کف و شیب بستر سرریز تنداب..... |
| ۷۷ | فصل پنجم: جمع بندی و نتیجه گیری.....                                                   |
| ۷۸ | ۵-۱-مقدمه.....                                                                         |
| ۷۸ | ۵-۲-مروری بر پژوهش.....                                                                |
| ۷۹ | ۵-۳-نتایج پژوهش.....                                                                   |
| ۷۹ | ۵-۴-پیشنهادهای.....                                                                    |
| ۸۱ | مراجع.....                                                                             |

## فهرست شکل ها

- شکل ۲-۱ دیاگرام فازی برای آب، [۳] ..... ۹
- شکل ۲-۲ تخریب به واسطه شکلگیری جت درون رو [۶] ..... ۱۴
- شکل ۲-۳ تخریب به واسطه شکلگیری جت درون رو [۶] ..... ۱۶
- شکل ۲-۴ تاثیر مخرب کاویتاسیون بر بتن، [۶] ..... ۱۷
- شکل ۲-۵ تخریب در سرریز سد کارون یک ..... ۲۳
- شکل ۲-۶ آسیب در سرریز سد Tarbela، [۱۳] ..... ۲۴
- شکل ۲-۷ آسیب در سرریز سد Glenn Canyon در سال ۱۹۸۳، [۱] ..... ۲۵
- شکل ۲-۸ توزیع فشار بر روی میله با شکل نیمکره [۸] ..... ۲۸
- شکل ۲-۹ شرایط تعادل برای حباب بخار حاوی هوا [۲] ..... ۲۹
- شکل ۲-۱۱ پلان سرریز سد بالارود [۱۶] ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۲ منحنی شاخص کاویتاسیون بر روی تنداب در دبیهای مختلف [۱۶] ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۳ میدان حل شامل مرز های جریان، شبکه و سلولهای محاسباتی، [۲۵] ..... ۳۷
- شکل ۲-۱۴ تغییرات شاخص کاویتاسیون در طول سرریز سد سورک به ازای دبی ماکزیمم، (برگرفته از [۲۷]) ..... ۳۹
- شکل ۲-۱۵ شاخص کاوستاسیون به ازای دبی جریان ۰/۱۹۰۳ (برگرفته از [۲۸]) ..... ۴۰
- شکل ۲-۱۶ جزئیات و ابعاد سرریز شوت (برگرفته از [۲۹]) ..... ۴۱
- شکل ۲-۱۷ مدل فیزیکی برای بررسی آزمایشگاهی کاویتاسیون، (برگرفته از [۲۹]) ..... ۴۱
- شکل ۲-۱۸ چگونگی توزیع پروفیل سطحی جریان آب در محور مرکزی سرریز شوت، (برگرفته از [۲۹]) ..... ۴۲
- شکل ۲-۱۹ توزیع سرعت میانگین در طول خط مرکزی سرریز و در کف آن، (برگرفته از [۲۹]) ..... ۴۳
- شکل ۲-۲۰ توزیع فشار در طول خط مرکزی سرریز و در کف آن، (برگرفته از [۲۹]) ..... ۴۳
- شکل ۲-۲۱ پروفیل توزیع شاخص کاویتاسیون، (برگرفته از [۲۹]) ..... ۴۴
- شکل ۲-۲۲ کانتور مربوط به توزیع شاخص کاویتاسیون در خط مرکزی سرریز، (برگرفته از [۲۹]) ..... ۴۴
- شکل ۳-۱ منحنی سرعت در جریان آشفته [۳۸] ..... ۵۲
- شکل ۳-۲ نمایی از ابتدای سرریز ..... ۵۶
- شکل ۳-۳ نمایی از شوت سرریز مدل سازی شده با شیب بستر ۳۶,۴٪ ..... ۵۶
- شکل ۳-۴ مشخصات هندسی هوادهها ..... ۵۷
- شکل ۳-۵ نمایی از حجم آب روی سرریز ..... ۵۷
- شکل ۳-۶ مقایسه مقادیر سرعت بدست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی ..... ۵۸
- شکل ۳-۷ مقایسه مقادیر فشار بدست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی ..... ۵۸
- شکل ۳-۸ مقایسه مقادیر سطح آب بدست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی (۱۰۰ متر ابتدای سرریز) ..... ۵۹
- شکل ۳-۹ مقایسه مقادیر سطح آب بدست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی (۱۰۰ متر میانی سرریز) ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۰ مقایسه مقادیر سطح آب بدست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی (۱۰۰ متر انتهای سرریز) ..... ۶۰

- شکل ۴-۱ نمایی از تنظیمات انجام شده در نرم افزار Fluent ..... ۶۴
- شکل ۴-۲ شرایط مرزی حل ..... ۶۵
- شکل ۴-۳ تنظیمات مربوط به شرایط مرزی دیوار ..... ۶۵
- شکل ۴-۴ مقادیر سرعت برای مدل‌های مورد بررسی با اثر ارتفاع زبری ثابت ..... ۶۸
- شکل ۴-۵ مقادیر فشار برای مدل‌های مورد بررسی با اثر ارتفاع زبری ثابت ..... ۶۸
- شکل ۴-۶ مقادیر سرعت در مدل با شیب بستر ۴۰٪ با اثر ارتفاع زبریهای مختلف ..... ۷۰
- شکل ۴-۷ مقادیر فشار در مدل با شیب بستر ۴۰٪ با اثر ارتفاع زبریهای مختلف ..... ۷۰
- شکل ۴-۸ مقادیر سرعت برای مدل‌های با شیب بستر ۳۰٪ و ۴۳٫۶٪ با ارتفاع زبریهای مختلف ..... ۷۱
- شکل ۴-۹ مقادیر فشار برای مدل‌های با شیب بستر ۳۰٪ و ۴۳٫۶٪ با ارتفاع زبریهای مختلف ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۰ منحنی شاخص کاویتاسیون مدل با شیب بستر ۲۶٪ برای زبریهای مختلف ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۱ منحنی شاخص کاویتاسیون مدل با شیب بستر ۳۰٪ برای زبریهای مختلف ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۲ منحنی شاخص کاویتاسیون مدل با شیب بستر ۳۶٫۴٪ برای زبریهای مختلف ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۳ منحنی شاخص کاویتاسیون مدل با شیب بستر ۴۰٪ برای زبریهای مختلف ..... ۷۵

## فهرست جدول‌ها

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| جدول ۱-۲ سدهای آسیب دیده ناشی از کاویتاسیون، [۱۴].....                                 | ۲۶ |
| جدول ۲-۲ رده‌بندی پتانسیل آسیب کاویتاسیون [۲۶].....                                    | ۳۸ |
| جدول ۳-۲ نتایج مربوط به شاخص کاویتاسیون به ازای دبیه‌های مختلف، (برگرفته از [۲۸])..... | ۴۰ |
| جدول ۱-۴ مشخصات هندسی مدلها.....                                                       | ۶۷ |
| جدول ۲-۴ رده بندی پیشنهادی برای کنترل شاخص کاویتاسیون.....                             | ۷۳ |
| جدول ۳-۴ شاخص بحرانی برای هر مدل مختلف از سرریز.....                                   | ۷۶ |

## فصل اول: مقدمه

## ۱-۱- بیان مساله

سرریز<sup>۱</sup> یک سازه هیدرولیکی است که در سدهای مخزنی و انحرافی برای آزادسازی آب اضافه یا سیلابی که مخزن به طور ایمن نمی‌تواند آن را ذخیره کند، ساخته می‌شود.

پدیده کاویتاسیون<sup>۲</sup> یک فرآیند معمول و پیچیده در سرریزها می‌باشد که پایداری سازه سرریز را تهدید و باعث آسیب به سازه آن می‌شود. این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد که فشار محلی جریان آب کمتر از فشار بخار آب شود [۱].

مسئله خرابی ناشی از کاویتاسیون در سرریزهای هیدرولیکی یک تجربه جدید نبوده و از پدیده‌های شناخته شده به شمار می‌آید. اولین خرابی مهم در سرریزها که ناشی از کاویتاسیون بوده در سال ۱۹۴۱ در سرریز سد هوور<sup>۳</sup> بوجود آمد. در آن زمان کاویتاسیون تنها به عنوان یکی از علت‌های وقوع این خرابی در نظر گرفته شد، حال آنکه امروزه مشخص شده است کاویتاسیون دلیل اصلی آن بوده است [۲].

## ۱-۲- اهمیت پژوهش

سدهای<sup>۴</sup> ساخته شده دست بشر، خطرات بالقوه‌ای هستند که عدم توجه اصولی به ساخت آن‌ها مخاطره انگیز می‌باشد و سرریزها به عنوان یک بخش مهم از اجزاء سدها از این جهت اهمیت دارد که عدم توجه به طراحی ابعاد واقعی آن می‌تواند عواقب جبران ناپذیری به بار بیاورد، لذا بررسی فنی سرریزها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این زمینه، این پایان‌نامه به بررسی عملکرد سرریزها و امکان ایجاد پدیده کاویتاسیون روی سرریز تنداب می‌پردازد.

---

<sup>1</sup> Spillway

<sup>2</sup> Cavitation

<sup>3</sup> Hoover Dam

<sup>4</sup> Dams

عموماً در طراحی سرریزها مقادیر تئوریک پارامترهای هیدرولیکی مانند سرعت، فشار و عمق جریان، توسط معادلات یک بعدی جریان تعیین می‌گردند، ولی ماهیت پیچیده جریان روی سرریز، تندآب و پرتابه جامی شکل گاهاً باعث می‌شود که نتوان به درستی و با استفاده از این معادلات پارامترهای فوق‌الشاره را پیش‌بینی نمود. از همین رو یکی از اهداف مهم ساخت و مطالعه بر روی مدل‌های هیدرولیکی تعیین دقیق پارامترهای هیدرولیکی مربوطه می‌باشد.

نرم افزارهای متعددی از جمله HEC - GEO - RAS , HEC - RAS , GSTARS , MGS, Fluent , ANSYS CFX , FLOW3D و ... به منظور شبیه‌سازی جریان موجود می‌باشد که هر کدام در یک زمینه خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما در این تحقیق تلاش بر آن است که ضمن معرفی نرم افزار Fluent که قابلیت مدل‌سازی عددی جریان در سرریز را داراست، اطلاعات مناسب و قابل قبول در مورد مشخصات هیدرولیکی جریان اعم از فشار، سرعت و همچنین احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را نیز بدست آوریم.

به دلیل هزینه زیاد، پیچیدگی و زمان گیر بودن ساخت و تحلیل مدل‌های آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌های عددی که دارای قابلیت شبیه‌سازی سه بعدی هستند ضروری به نظر می‌رسد و همچنین از آنجا که عموماً در طراحی سرریزها مقادیر تئوریک پارامترهای هیدرولیکی مانند سرعت و فشار توسط معادلات یک بعدی جریان تعیین می‌گردند و از طرفی ماهیت پیچیده جریان روی سرریز گاهاً باعث می‌شود که نتوان به درستی و با استفاده از این معادلات پارامترهای مورد اشاره را پیش‌بینی کرد، اهمیت این تحقیق بیش از پیش مشخص می‌شود. بدیهی است شناسایی و دانش بیشتر از الگوی جریان در سرریز، نقش بسزایی در طراحی فنی و دقیق آن خواهد داشت و این در حالی است که پژوهشگران حوزه مهندسی سد در سرتاسر جهان در قالب تحقیقات علمی و صنعتی مختلف، به بررسی موضوع رفتار جریان در انواع سرریزها پرداخته‌اند و در همین راستا در این تحقیق سرریز سد مخزنی آزاد شهرستان مریوان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به مسئله خرابی ناشی از پدیده کاویتاسیون در سطح سرریز اهمیت بررسی مقادیر هیدرولیکی مربوط به شاخص کاویتاسیون با دقت بالا مشخص می‌شود. پس سرریز با توجه به پتانسیل وقوع پدیده کاویتاسیون طراحی و نهایتاً اجرا خواهد شد. بدیهی است که عدم توجه به پدیده

کاویتاسیون در طراحی می تواند خسارات زیادی در پی داشته باشد.

### ۱-۳-هدف پژوهش حاضر و روش انجام آن

در این پایان نامه تلاش شده است که خواننده با مفاهیم پایه ای و جایگاه پدیده کاویتاسیون به عنوان مساله تأثیرگذار بر خرابی سیستم سرریز سدها آشنائی یابد. در این راستا، مطالعات مختلف صورت گرفته توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج بدست آمده از مطالعات ایشان مورد بحث قرار گرفته اند. در ادامه، با توجه به اهمیت و ضرورت تحقیق بر آن شدیم که اقدام به ساخت مدل عددی سرریز سد مخزنی آزاد شهرستان مریوان گردد. از اینرو مدل سازی عددی با شیب های ۲۶٪، ۳۰٪، ۳۶٫۴٪ و ۴۰٪ با ارتفاع زبری های مختلف ۰٫۱۵، ۰٫۴، ۱٫۵، ۳ و ۵ میلی متر بر روی بستر سرریز و تنداب مورد بررسی قرار داده و نتیجه گیری خواهیم کرد. عمده هدف این مدل سازی عددی بدست آوردن مشخصات هیدرولیکی جریان (سرعت و فشار استاتیکی) و همچنین بررسی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون می باشد که در نهایت همه این مقادیر اندازه گیری شده در مدل عددی، با مقادیر مشابه در مدل فیزیکی مقایسه و بررسی شده اند.

خلاصه ای از روش انجام پژوهش و مراحل تکمیل آن بصورت زیر بیان شده است:

- ۱) ساخت هندسه مدل مورد نظر با استفاده از نرم افزار Gambit
- ۲) شبکه بندی هندسه مدل به طوری که رشد خطاها به حداقل برسد.
- ۳) اضافه کردن شرایط مرزی و شرایط اولیه مناسب
- ۴) حل همزمان تمام معادلات با استفاده از نرم افزار Fluent تا مرتبه ای که خطاها به پایین ترین مقادیر خود نزدیک شوند و جواب ها به همگرایی برسند.
- ۵) بررسی نتایج بدست آمده نظیر مشخصات هیدرولیکی و شاخص کاویتاسیون

## ۱-۴- ساختار پژوهش

این پایان‌نامه دارای پنج فصل به شرح زیر می‌باشد:

**فصل اول** شامل بخش‌های بیان مساله، اهمیت پژوهش، اهداف پژوهش و ساختار و مراحل کلی روند انجام پژوهش می‌باشد.

در **فصل دوم** ابتدا به بیان چندین تعریف و تشریح چند مفهوم مهم در زمینه سرریزها، پدیده کاویتاسیون و جریان‌های هیدرولیکی پرداخته می‌شود. در انتهای فصل نیز چندین مطالعه که توسط پژوهشگران در طول سالیان صورت پذیرفته اند، مورد بررسی و تفسیر قرار داده شده اند.

در **فصل سوم** به تشریح روند مدلسازی جریان در دینامیک سیالات محاسباتی و آشنایی با نرم افزار Fluent پرداخته شده است. همچنین در انتهای این فصل صحت سنجی مدل مورد نظر آورده شده است.

در **فصل چهارم** مدلسازی با انواع شیب‌ها و زبری‌ها صورت گرفته است و اثرات این تغییرات بر وقوع کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است.

**فصل پایانی و پنجم** شامل جمع‌بندی تحقیق، بررسی و بیان مهمترین جنبه‌های پژوهش و پیشنهادات و راهکارها برای مطالعات بعدی می‌باشد.



## فصل دوم: مبانی نظری و مروری بر

### تحقیقات پیشین

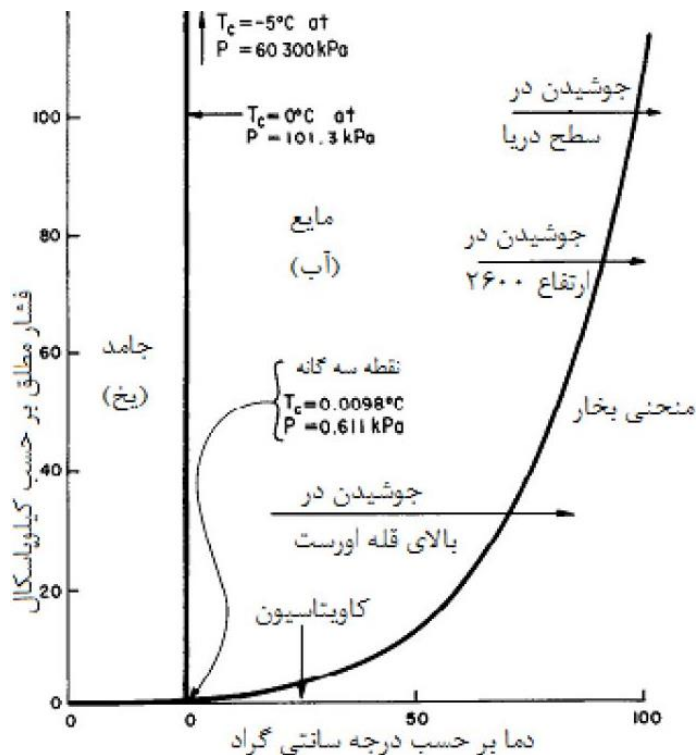
## ۲-۱- مقدمه

با توجه به پیچیده بودن هیدرولیک جریان‌ها روی سرریز سدها، شناخت الگوی جریان و مشخصه‌های هیدرولیکی بر روی سرریزها ضروری می‌باشد. در این فصل و قبل از بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، برخی از مفاهیم اولیه هیدرولیکی بکار رفته در تحلیل جریان عبوری از سرریز به اختصار توضیح داده می‌شوند.

## ۲-۲- کاویتاسیون

کاویتاسیون فرآیندی است که معمولاً با خسارت به سطح سازه یا صدای شدید همراه است. با بررسی روند جوشیدن می‌توان درک درستی از پدیده کاویتاسیون بدست آورد. زمانی که آب گرم می‌شود، دمای آب افزایش می‌یابد تا به نقطه جوش خود برسد. دمایی که جوشیدن در آن رخ می‌دهد تابعی از فشار است. هنگامیکه فشار کاهش می‌یابد، جوشیدن در دماهای پایین‌تری اتفاق می‌افتد. چون فشار تابعی از ارتفاع است، همانطور که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است، در ارتفاعات بالاتر جوشیدن در دماهای پایین‌تری به وقوع می‌پیوندد. اگر ممکن باشد به ارتفاعی برویم که به اندازه کافی بلند باشد، جوشیدن می‌تواند حتی در دمای اتاق اتفاق بیفتد.

جوشیدن، فرآیند گذر از حالت مایع به بخار با تغییر دما است، در حالیکه فشار محلی ثابت می‌باشد. کاویتاسیون فرآیند گذر از حالت مایع به بخار با تغییر فشار محلی، در حالیکه دما ثابت می‌باشد. کاهش فشار محلی می‌تواند به علت سرعت بالای جریان، آشفتگی یا وجود گردابه در جریان آب باشد.



شکل ۲-۱ دیاگرام فازی برای آب، [۳]

در سازه‌های هیدرولیکی، آب شامل حباب‌های هوا و انواع مختلف ناخالصی در اندازه‌های متفاوت است. حباب‌های هوا یا ناخالصی‌های میکروسکوپی موجود در آب برای شروع کاویتاسیون ضروری هستند [۳].

قابل ذکر است که چنانچه فشار جریان آب کاهش یابد و باعث شروع کاویتاسیون شود، به این حالت کاویتاسیون اولیه می‌گویند. همچنین، هنگامی که حباب‌های کاویتاسیون به طور ناگهانی به حباب‌های بزرگتر تبدیل شود، کاویتاسیون توسعه یافته یا سوپر کاویتاسیون گفته می‌شود.

## ۲-۳- مکانیزم رخداد پدیده مخرب کاویتاسیون

از نقطه نظر مهندسی، کاویتاسیون عبارتست از شکل‌گیری حباب بخار آب در جریان به دلیل کاهش فشار موضعی.

مکانیزم کلی کاویتاسیون بدین صورت است که مایع در اثر عوامل استاتیکی یا دینامیکی بر اثر

افزایش درجه حرارت تحت فشار ثابت یا در اثر کاهش فشار تحت درجه حرارت ثابت مخلوطی از هوا و بخار آب تولید شده و به تدریج حباب‌ها بزرگ می‌شوند، که این حباب‌ها اگر در محیطی با فشار زیاد قرار گیرند منفجر می‌شوند. بنابراین، می‌توان پدیده کاویتاسیون را یک پدیده دینامیکی دانست [۱].

پدیده کاویتاسیون طی ۲ مرحله تشکیل و آسیب بوقوع می‌پیوندد؛ در مرحله ابتدایی (تشکیل پدیده کاویتاسیون) حباب‌ها بسیار ریزاند و خطر کم است. با تغییر عواملی از جمله کاهش فشار و افزایش سرعت جریان حباب‌ها بزرگتر شده و کاویتاسیون به مرحله پیشرفته می‌رسد. نهایتاً و در مرحله پایانی (ایجاد آسیب کاویتاسیون) با ترکیدن حباب‌ها انرژی فوق العاده‌ای آزاد می‌شود که این انرژی صدمات بسیار شدیدی را به بدنه سرریز وارد می‌کند.

جدا شدگی خطوط جریان از بدنه سرریزها یکی از مهمترین دلایل بوجود آمدن کاویتاسیون در سرریزها می‌باشد. قابل ذکر است که عواملی مانند روزنه، برآمدگی، گودی، گوشه‌های تیز و تغییر ناگهانی سطح مقطع باعث جداشدگی می‌شوند. در ادامه این فصل فاکتورهای موثر در پدیده کاویتاسیون تشریح شده‌اند.

## ۲-۴- عوامل موثر بر ایجاد کاویتاسیون

مطالعات نشان می‌دهند که وقوع خرابی ناشی از کاویتاسیون در اثر علل و شرایط متنوعی است و تنها یک مسئله مشخص در بروز این پدیده نقش ندارد و وقوع آن مستلزم ترکیبی از عوامل هندسی، هیدرودینامیک و عوامل وابسته دیگر می‌باشند که از مهم‌ترین عوامل موارد ذیل را می‌توان برشمرد [۵]:

### □ عوامل هندسی

- ۱- ناهمواری‌های سطحی سرریز بخصوص برآمدگی و فرورفتگی‌های موضعی
- ۲- وجود سازه‌های متعدد برای ایجاد کاویتاسیون در سرریز مانند: درزهای ساختمانی، پایه‌ها،

جداکننده‌های جریان و دفلکتور، تغییر شکل مقطع عبور جریان

### □ عوامل هیدرودینامیکی

۱- فشار پیرومتری

۲- سرعت جریان

### □ موارد دیگر

۱- دمای آب

۲- انتقال گرما حین عمل ترکیدن

۳- تعداد و اندازه حباب‌های هوا در آب

۴- پراکندگی هوا

## ۲-۵- طبقه‌بندی کاویتاسیون

کاویتاسیون به اشکال مختلف دیده می‌شود و به دو عامل اصلی شرایط جریان و مشخصات فیزیکی محل عبور جریان بستگی دارد. نپ و دیرلی طبقه‌بندی زیر را در مورد کاویتاسیون انجام دادند :

### ۱) کاویتاسیون متحرک (Portable cavitation)

در این نوع کاویتاسیون، حباب‌های تولید شده همراه سیال حرکت کرده و در ضمن حرکت حجم آن‌ها افزایش یافته و سپس به ناحیه پرفشار رسیده و منفجر می‌شوند. کاویتاسیون متحرک ممکن است در سطح تماس سیال با جداره یا درون سیال یا در هسته جریان‌های گردابی رخ دهند. انفجار حباب‌ها معمولاً پس از چندین بار کوچک و بزرگ شدن حباب‌ها صورت می‌گیرد که علت آن ناشی از نوسانات فشار می‌باشد.

## ۲) کاویتاسیون ثابت (Stable cavitation)

در "کاویتاسیون ثابت" زمانی که سیال در حال حرکت از جداره، جدا می‌شود باعث ایجاد حباب در جداره و سپس رشد حباب و نهایتاً انفجار آن می‌شود و چنانچه رشد حباب تمام جداره را در بر گرفته و بعد انفجار رخ دهد به "کاویتاسیون پیشرفته" معروف است.

## ۳) کاویتاسیون گردابی (Vortex cavitation)

در "کاویتاسیون گردابی" حباب‌ها در مرکز گرداب‌ها که نیروی برشی در آن ناحیه زیاد است به وجود می‌آیند. این نوع کاویتاسیون در محیط‌های سیستم پمپ و توربین و پروانه کشتی‌ها رخ می‌دهد.

## ۴) کاویتاسیون لرزشی (Vibratory cavitation)

در "کاویتاسیون لرزشی" نیروهایی که باعث ایجاد حباب و انفجار می‌شوند نوسانات فشار با دامنه و فرکانس بالا می‌باشند این نوسانات در اثر ارتعاش یک جسم مستغرق در آب به وجود می‌آیند و زمانی که دامنه نوسان فشار به حدی برسد که فشار محیط را به پایین‌تر از فشار بخار آب برساند رخ می‌دهد.

## ۲-۶- انواع کاویتاسیون

کاویتاسیون را می‌توان به دو دسته کاویتاسیون گازی و کاویتاسیون بخاری تقسیم کرد [۶]. در نوع اول حباب از گازهایی بغیر از بخار آب پر است و در نوع دوم حباب مملو از بخار آب بوده که به عنوان کاویتاسیون معمولی نامیده می‌شود. کاویتاسیون را بر حسب وضعیت جریان و شکل حباب از دیدگاه جریان خارجی به نقل از منابع مختلف می‌توان به پنج دسته کاویتاسیون جابجا شونده، ابری، صفحه‌ای، ابر کاویتاسیون و گردابه‌ای تقسیم کرد [۷].

## ۷-۲- منشأ کاویتاسیون

برای پیدایش کاویتاسیون سه عامل مهم باید همزمان وجود داشته باشد. اولین عامل هستک‌ها یا فضاهای خالی مانند گپ‌های گازی یا ناخالصی و ذرات حل نشده در سیال برای شروع تبخیر است. دومین پارامتر رسیدن فشار محلی به فشار بخار در نقطه‌ای از سیستم و سومین عامل بازیافت فشار در اطراف حباب به فشاری بیشتر از فشار بخار برای انهدام حباب‌ها است.

### ➤ هستک‌ها

این لغت، تنها عنوان دیگری برای حباب‌های گاز، فضای خالی، ذرات آلوده کننده یا هوای حبس شده (حل شده) در داخل مایع است. هم برای جوشیدن و هم کاویتاسیون وجود هستک‌ها در مایع ضروری است. اگر هستک‌ها به طور کامل از سیال تخلیه شود، مایع مقاومت بیشتری در مقابل کشش و انبساط پیدا میکند و در دمای معمول نمی‌جوشد و اگر فشار به حد فشار بخار کاهش یابد، کاویتاسیون اتفاق نمی‌افتد. بنابر این وجود هستک از الزامات مقدماتی برای وقوع کاویتاسیون است. به طور معمول به اندازه کافی، هستک و ذرات آلوده در آب وجود دارد که باعث شکل‌گیری کاویتاسیون شود. تنها در آزمایشگاه در شرایط کنترل شده می‌توان مقدار هستک‌ها را تا حدودی کم نمود. آب خارج شده از کف مخازن بزرگ ممکن است دارای مقدار کم هوا و هستک باشد و چنین آبی می‌تواند کاویتاسیون را نسبتاً کاهش دهد. اگر آب از حباب‌های هوا چه به صورت تصادفی چه به صورت عمدی (هوا دهی) اشباع باشد، کاویتاسیون زودتر اتفاق می‌افتد ولی این کاویتاسیون از نوع گازی بوده و خسارت کمتری به سیستم وارد می‌کند [۱].

### ➤ اثر گردابه‌ها

یکی از پارامترهای مهم در فرایند کاویتاسیون نوسانات فشار ایجاد شده در اثر تلاطم یا تشکیل و نابودی گردابه‌ها در واحد زمان است. نوسانات فشار وابسته به زمان، از اولین دلایل دشوار بودن پیش‌بینی کاویتاسیون است و منجر به وابستگی مطالعه کاویتاسیون به نتایج آزمایشگاهی شده است. با استفاده از معادله انرژی و تخمین درست تلفات در سیستم، فشار متوسط قابل پیش‌بینی است ولی فشار در سمت داخل نقاط جدایش، گردابه‌ها و جریانهای

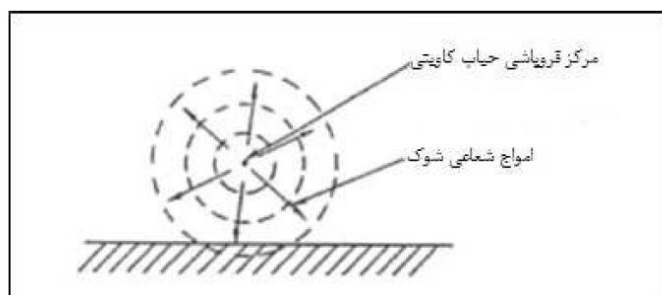
چرخشی تنها از داده های تجربی قابل تخمین است. با این وجود با پیشرفت قابل توجه روش های عددی، امروزه امکان پیش بینی و محاسبه میزان افت فشار در نقاط شکل گیری جدایش سیال و گردابه ها فراهم شده و می توان از آن ها به عنوان ابزاری برای کاهش هزینه های آزمون و خطا در آزمایشات و به عبارتی دقیق تر ساختن آن ها استفاده کرد.

### ➤ بازیافت فشار

مرحله سوم برای تکمیل پدیده کاویتاسیون، وجود محلی در میدان جریان است که فشاری بیش از فشار بخار داشته باشد تا حباب های بخار از بین بروند. همانطور که حباب ها به سمت منطقه پر فشار حرکت می کنند، فشار مورد نیاز برای تخریب حباب ها تامین می شود. همچنین همانطور که گردابه های چرخشی در لایه های مرزی نابود می شود مقداری برگشت فشار وجود دارد که نهایتاً منجر به انهدام حباب ها می شود.

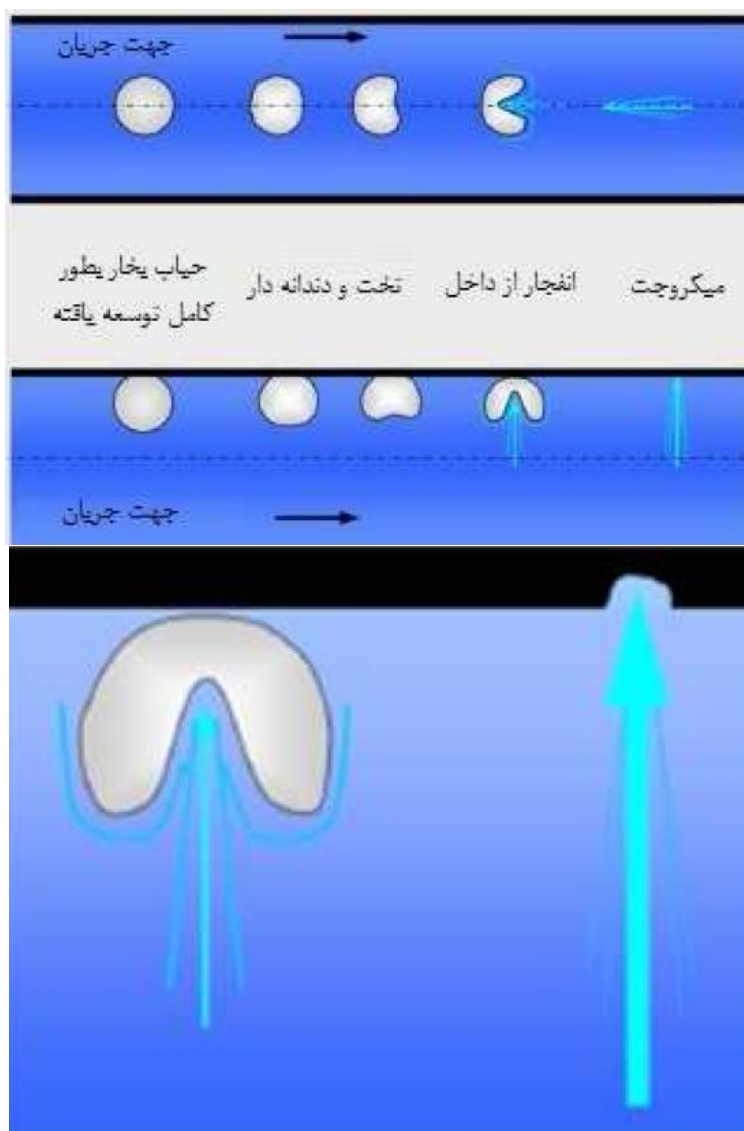
## ۲-۸- مکانیزم تخریب

انفجار حباب در فاصله نزدیک به اندازه یک قطر حباب با جدار جامد موج انفجاری با فشاری در حدود  $10^6 \text{ psi}$  ( $68800 \text{ kg/cm}^2$ ) به سطح اعمال می کند. در شکل ۲-۲ موج انفجار حباب بخار در نزدیکی مرز جامد نمایش داده شده است. این فشار برای تخریب سخت ترین فلزات نیز کفایت می کند.



شکل ۲-۲ تخریب به واسطه شکل گیری جت درون رو [۶]

عامل دیگر تخریب، شکل‌گیری میکروجت یا جت دورن رو (جت جریانی که به سمت داخل حباب حرکت می‌کند) است. هنگامی که حباب در نزدیکی جسم منفجر می‌شود به دلیل وجود مرز جامد توزیع فشار انفجار متقارن نیست و در قسمت خارجی دورتر از مرز جامد فشار بیشتری وجود دارد که هنگام انفجار، جت‌های به سمت داخل حباب را تشکیل می‌دهد. این جت‌ها با سرعت زیادی که دارند به بدنه برخورد کرده و تخریب ایجاد می‌کند. پس از رسیدن فلز به آستانه تخریب، با افزایش سرعت، میزان خسارت و فرسایش به شدت زیاد می‌شود، به گونه‌ای که تخریب با توان  $n$  سرعت رابطه مستقیم دارد ( $n$  عددی بین ۴ تا ۷ می‌باشد). در شکل ۲-۳ تخریب به واسطه شکل‌گیری جت نمایش داده شده است. مواد رسوبی داخل سیال نیز بر شدت خوردگی می‌افزایند. خوردگی یکی دیگر از جنبه‌های فرسایش ناشی از کاویتاسیون است. در اثر کاویتاسیون مواد اکسید شده از سطح جسم جامد کنده شده و سطح جدیدی از فلز در معرض کاویتاسیون قرار می‌گیرد. این اصل به عنوان یک روش آزمایشگاهی در تشخیص خسارت کاویتاسیون استفاده می‌شود.



شکل ۲-۳ تخریب به واسطه شکل‌گیری جت درون رو [۶]

## ۲-۹- اثرات کاویتاسیون بر سرریزها

بطور کلی، کاویتاسیون در سیستم‌های هیدرولیکی زیان آور است. با این حال، اثرات مفیدی نیز دارد. به عنوان مثال، از تلاطم زیاد ناشی از رخداد پدیده کاویتاسیون برای اختلاط و تشدید واکنش‌های شیمیایی و تمیز کردن سطوح استفاده می‌شود. ولی صدا، نوسانات فشار، افت راندمان، لرزش، فرسایش و خوردگی از اثرات زیان بار کاویتاسیون است. همچنین قابل ذکر است که نوع و شدت صدای کاویتاسیون وابسته به موقعیت وقوع کاویتاسون می باشد بطوریکه در یک شیر

کوچک دارای صدای ترکیدگی خفیف است در حالی که در یک شیر بزرگ بیشتر شبیه صدای انفجار است [۶]. در شکل ۲-۴ نمونه‌ای از اثرات مخرب پدیده کاویتاسیون بر یک سطح بتنی را مشاهده می‌نمائید.



شکل ۲-۴ تاثیر مخرب کاویتاسیون بر بتن، [۶]

## ۲-۱۰- عوامل تشدید کننده آسیب رسانی کاویتاسیون به سطح

هنگامیکه جریان با سرعت بالا از روی یک سطح عبور می‌کند، پتانسیلی بر روی سطح برای تخریب بواسطه پدیده کاویتاسیون تولید می‌گردد. فاکتورهای تاثیر گذار در آسیب رسانی روی سطح مذکور عبارتند از [۸]:

- ۱- موقعیت و محل آسیب دیدگی
- ۲- بزرگی سرعت جریان
- ۳- حجم هوای موجود در آب
- ۴- مدت زمانی که سطح در معرض آسیب کاویتاسیون قرار داد

## ۲-۱۱- راه های جلوگیری و کاهش خسارت کاویتاسیون

به منظور کاهش میزان خسارت ناشی از پدیده کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی، بر اساس مدل‌های هیدرولیکی ساخته شده در مراکز تحقیقاتی، روش‌های متفاوتی پیشنهاد شده است. در

یک دسته‌بندی کلی می‌توان روش‌های جلوگیری و کاهش خسارت کاویتاسیون را به دو دسته عمومی (الف) پرداخت سطحی و استفاده از مواد مقاوم در مقابل کاویتاسیون، (ب) هوادهی جریان بر روی سرریز تقسیم بندی نمود.

## ۲-۱۱-۱- ایجاد سطوح کاملاً صاف و صیقلی و استفاده از مواد مقاوم

برای جلوگیری از وقوع کاویتاسیون بهتر است که بعد از شناخت عوامل مؤثر در کاویتاسیون، عوامل موجود را تا حد امکان از بین برده یا حداقل تأثیرشان را در وقوع پدیده کاویتاسیون کم کرد. مهمترین عامل در کاویتاسیون سرریزها که باعث جداشدگی جریان می‌شود، وجود ناهمواری‌های سطح بتن می‌باشد.

با کنترل دقیق میزان ناهمواری‌های سطحی بتن و استفاده از بتن‌های با مقاومت فشاری بسیار بالا و مقاوم در مقابل سایش، مانند بتن‌های الیاف دار، سعی کنیم عدد کاویتاسیون بحرانی تا حد امکان کاهش یابد، تا همواره عدد کاویتاسیون جریان از عدد بحرانی کاویتاسیون بزرگتر باشد و بدین ترتیب از بروز خسارات ناشی از کاویتاسیون جلوگیری گردد.

## ۲-۱۱-۲- هوادهی جریان

تجربیات مهندسين نشان داده است که تأمین چنین سطح صاف و مقاومی نه تنها اجرایی نیست، بلکه حتی در صورت تأمین نیز پس از مدت زمانی کوتاه با خروج کلسیت از میان ترک‌های موئی و هوازدگی سطح بتن، سطوح ناهمواری ایجاد می‌شوند.

تحقیقات به عمل آمده نشان داده‌اند که مقدار بسیار ناچیزی هوا در جریان سیال به مقدار قابل توجهی از میزان خرابی‌های ناشی از پدیده کاویتاسیون می‌کاهد. در حقیقت، سیستم هوادهی، علاوه بر هزینه کمتر کاملاً موفق می‌باشد. افزایش فشار موضعی در مناطقی که احتمال وقوع

کاویتاسیون وجود دارد از مناسب‌ترین و عملی‌ترین راه‌هایی است که توصیه و بکار برده شده است. افزایش فشار موضعی و در نتیجه جلوگیری از تشکیل حباب‌های کاویتی بوسیله هوادهی امکان پذیر است.

استفاده از روش هوادهی جریان برای مقابله با پدیده کاویتاسیون اولین بار در سال 1945 در سمپوزیوم ASCE مطرح گردید و از آن تاریخ تا به امروز به عنوان مطمئن‌ترین راه‌حل در سازه‌ها و ماشین‌های هیدرولیکی شناخته شده است [۸].

## ۲-۱۲- معرفی سرریزها و عملکرد آنها

حفظ و بهره برداری از منابع مختلف آب از جمله آب سطحی و زیرزمینی به عنوان یک ضرورت، از آغاز زندگی بشر مورد نظر انسان بوده است و همواره مسائل مهم بشر مانند مسائل فرهنگی، اقتصادی و بهداشتی را تحت الشعاع خود قرار داده است. در این راستا، علم مهندسی آب و هیدرولیک به عنوان دانشی که رفتار مکانیکی و فیزیکی آب را بررسی می‌کند روز به روز در حال پیشرفت است. هیدرولیک از واژه یونانی هیدرو بر گرفته شده است که به معنای جریان و حرکت سیال می باشد. با توجه به ضرورت حفظ و نگهداری از منابع آب سالهاست که بشر در طول جریان های سطحی مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و جریانهای زیرزمینی شروع به مطالعه و احداث سازه های نگهدارنده و کنترل‌کننده برای این مایع ارزشمند کرده است.

یکی از بزرگترین سازه ای هیدرولیکی برای کنترل و حفظ منابع آب، سازه سد است. سدها به منظور تامین آب آشامیدنی و کشاورزی، جلوگیری از سیلاب‌های مخرب، تامین آب برای پروژه های صنعتی و تبدیل منطقه به منطقه گردشگری و توریستی بکار می‌روند [۹].

سدها از نظر مصالح به سدهای خاکی، سنگریزه‌ای و بتنی تقسیم می‌شوند. از نقطه نظر هیدرولیکی به سدهای با سرریز و سدهای بدون سرریز دسته‌بندی می‌شوند. همچنین از نظر نحوه استفاده به سدهای مخزنی، سدهای انحرافی و سدهای بازدارنده تفکیک می‌شوند. بالاخره، از نقطه نظر ارتفاع سد، به سدهای کوتاه و بلند تقسیم می‌شوند [۱۰].

از عوامل مهم برای احداث سدها جلوگیری از سیلاب‌های مخرب است. سیل به عنوان یکی از بلاهای طبیعی همواره خسارت‌های جبران ناپذیری به شهرها، روستاها، زمین‌های کشاورزی، کارخانه‌ها و .... وارد نموده و حیات بسیاری از انسان‌ها را در طول تاریخ گرفته است. از این رو، مهمترین بخش احداث هر سد، مطالعه و بررسی کارشناسی برای ساخت سیستم کنترل کننده سیلاب است. به عبارت دیگر، برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌های بالا دست به پایین دست سدها از سازه‌ای به نام سرریز استفاده می‌شود. سرریزها باید سازه‌های قوی، مطمئن و با راندمان بالا انتخاب شوند که در هر لحظه و شرایطی بتوانند برای بهره‌برداری آمادگی لازم را داشته باشند. در یک تعریف عمومی‌تر، سرریزها، شیر اطمینان برای سدها هستند که باید گنجایش تخلیه سیلاب‌های اضافی را بدون آسیب رساندن به سد و یا تاسیسات وابسته به آن را داشته باشند. پارامترهای تاثیرگذار بر انتخاب نوع سرریز عبارتند از: زلزله خیزی منطقه، حجم سیلاب، نوع سد، میزان دبی طراحی و مسائل اقتصادی پروژه [۱۱].

بطور خلاصه می‌توان سرریزها را بر اساس تقسیم‌بندی زیر شناخت:

#### ❖ تقسیم بندی بر اساس وجود و یا عدم وجود دریچه

در تقسیم بندی بر اساس وجود یا عدم وجود دریچه، چنانچه توپوگرافی محل و میزان جریان به نحوی باشد که بتوان از سرریز بدون دریچه استفاده نمود، در آن صورت بهره‌برداری از سرریز ساده خواهد شد که این امر در مقاطع عریض رودخانه میسر است. برای مقاطع تنگ رودخانه، سدها یا سرریزها معمولاً با دریچه طراحی می‌شوند. در حالت دوم، کنترل جریان بهتر صورت می‌پذیرد و این نوع سرریز به سرریز کنترل کننده ی سیل نیز معروف است. در زمان وقوع سیل، اگر مخزن یا فضای پشت سرریز پر باشد، دریچه‌ها به منظور عبور جریان کاملاً باز نگه داشته می‌شوند. در حال حاضر، بیشتر سدها به دریچه‌های تنظیم مجهز هستند تا بهره‌برداری انعطاف پذیر را امکان پذیر سازند.

## ❖ تقسیم بندی بر اساس محل قرارگیری سرریز

سرریزها از نظر محل قرارگیری نسبت به سد به انواع متنوعی تقسیم بندی می‌شوند. سرریزهای اوجی و سرریزهای لبه پهن، سرریزهایی هستند که معمولاً در بدنه سد قرار داده می‌شوند و به سرریزهای مستقیم شهره‌اند. همچنین، سرریزهای غیرمستقیم که خارج از بدنه سد ساخته می‌شوند عبارتند از: سرریز جانبی، سرریزهای شوت، نیلوفری (لاله‌ای)، سیفونی. از آنجایی که هدف بررسی پتانسیل رخداد کاویتاسیون روی سرریز تنداب می‌باشد، در ادامه توضیح مختصری از این نوع سرریز بیان می‌شود.

### ۲-۱۲-۱- سرریز تندآب (شوت)

سرریز شوت معمولاً شامل یک آبراهه ورودی، یک سازه کنترل، کانال تخلیه، سازه پایانه و یک آبراهه خروجی است. سازه کنترلی سرریز شوت می‌تواند به صورت تاج آزاد، سرریز اوجی، سرریز جانبی یا روزنه دریچه دار و یا انواع دیگر باشد که در مطالعه موردی این پایان‌نامه از سرریز اوجی در ابتدای تنداب استفاده شده است. تنها شرط لازم برای این سرریزها این است که کانال تخلیه آن‌ها به صورت شوت باشد.

ساده‌ترین شکل سرریز شوت، یک محور مستقیم دارد و عرض آن در سرتاسر شوت ثابت است. اغلب لازم می‌شود که به منظور انطباق در پستی و بلندی طبیعی، محور آبراهه ورودی و یا کانال تخلیه را به صورت قوس در نظر گرفت. در این گونه موارد سعی می‌شود که در حد امکان، به خاطر سرعت تقرب، انحنا را به آبراهه ورودی محدود کرد. معمولاً انتخاب نهایی پروفیل شوت، با توجه به توپوگرافی منطقه و شرایط لایه‌های زیرین انجام می‌پذیرد. سازه کنترل نیز با محور سد در یک خط قرار می‌گیرد و یا بالادست آن واقع می‌شود. معمولاً، برای به حداقل رساندن خاکبرداری، قسمت اولیه کانال تخلیه را با حداقل شیب ممکن تا جایی ادامه می‌دهند که کانال تخلیه به سطح زمین برسد. سپس قسمتی از کانال تخلیه که دارای شیب تند خواهد بود آغاز

می‌شود و با توجه به شیب طبیعی زمین ادامه می‌یابد.

عواملی که سبب انتخاب این سرریز می‌شوند عبارتند از:

۱- به سادگی قابل طرح و اجرا هستند.

۲- تقریباً در کلیه شرایط فونداسیون می‌توان از آن‌ها استفاده کرد.

۳- حجم وسیع خاکبرداری حاصله را می‌توان در بدنه سد خاکی مورد استفاده قرار داد و از این طریق از هزینه‌ها کاست. سرریز شوت، بر روی انواع مختلف فونداسیون از سنگ سخت تا زمین نرم با موفقیت اجرا و بهره‌برداری شده است.

۴- جریان در بالادست تاج سرریز معمولاً در حالت زیر بحرانی است و به هنگام عبور از سازه کنترل به سرعت بحرانی می‌رسد. در شوت عموماً جریان به صورت فوق بحرانی و بر حسب مورد به صورت یکنواخت یا تند شونده خواهد بود.

برای طراحی مناسب اندازه و حجم در هر سرریز شوت، دبی نهایی سیلاب در نظر گرفته می‌شود که شامل برآورد سرعت رواناب و حجم سیلاب که هر کدام نیز وابسته به عوامل مختلف در رواناب می‌باشد. اندازه‌های طراحی شده برای سازه باید قادر به تحمل رواناب طرح باشند. سرریز شوت برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال می‌تواند به عنوان سرریز در سدهای بزرگ واقع بر دره‌های عمیق موجود در مسیر رودخانه‌ها انتخاب و مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲-۱۳- تاریخچه آسیب در سرریز سدها

خسارت و آسیب ناشی از کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی از سال‌ها قبل مورد مطالعه و پژوهش بوده است. سدهای زیادی در دنیا بر اثر پدیده کاویتاسیون در معرض آسیب و تخریب قرار گرفته‌اند. در ادامه چند نمونه از موارد تحت آسیب مرور می‌شوند.

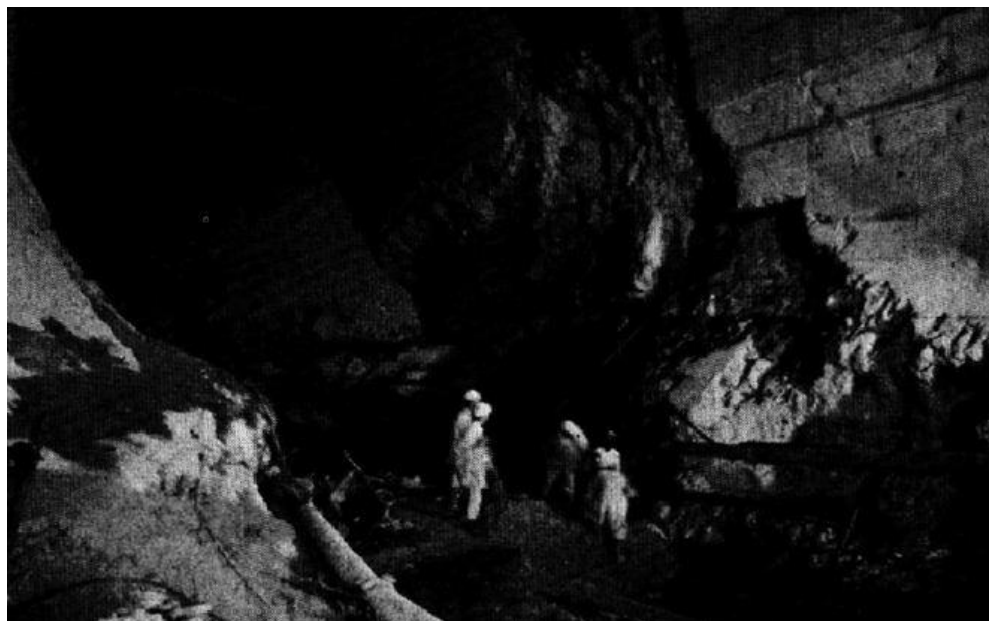
سد کارون ۱ (شهید عباسپور) اولین پروژه تولید و ذخیره انرژی برق‌آبی بر روی کارون، پرآب‌ترین و بزرگترین رودخانه ایران، در سال‌های ۱۳۵۶ و ۱۳۵۸، در اولین سال‌های بهره

برداری، تحت اثر آسیب‌های شدید در سرریز شوت خود (به علت وقوع پدیده کاویتاسیون) قرار گرفت. با وجود ترمیم و اصلاح در سال‌های بعد نیز این سرریز در عبور سیلاب‌ها دچار آسیب ناشی از کاویتاسیون شد. علت پتانسیل این آسیب ضعف بتن و سنگ پی و عدم وجود میل مهار قوی در اتصال با سنگ پی بیان شده است. در شکل ۲-۵ سد شهید عباسپور نشان داده شده است.



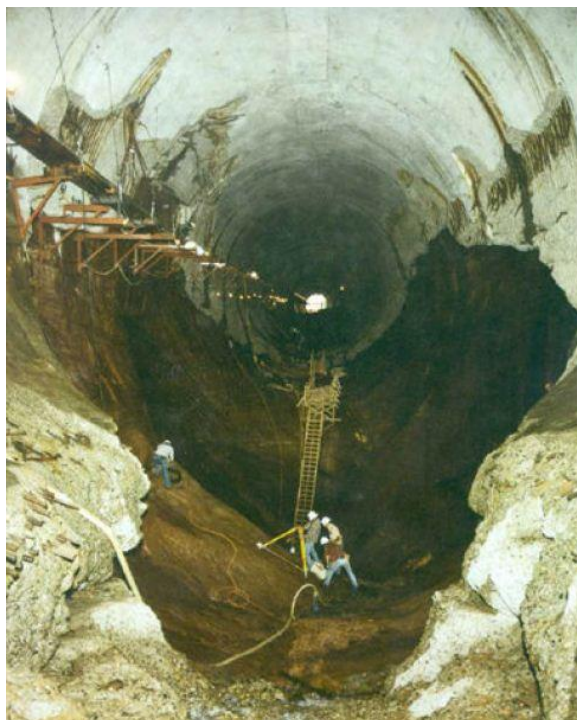
شکل ۲-۵ تخریب در سرریز سد کارون یک

سد Tarbela در پاکستان (شکل ۲-۶) دارای سرریز تونلی است که دچار آسیب کاویتاسیون شده است. برای نخستین مرتبه، مخزن این سد در سال ۱۹۷۴ پر شد. سطح آب مخزن با تونل‌های عمیق کنترل می‌شد. هر تونل سه دریچه در انتهای دهانه آبگیر خود دارد. هنگامی مشکل شروع شد که دریچه آخر و وسطی در هنگام بسته شدن، نیمه باز ماندند و گردابه‌های بوجود آمده و جریان برشی سریع و قدرتمند موجب وقوع کاویتاسیون شدند و سرانجام به کنده شدن بتن و تخریب تونل انجامید [۱۲].



شکل ۲-۶ آسیب در سرریز سد Tarbela، [۱۳]

سد Glenn Canyon (شکل ۲-۷) واقع بر رودخانه کلرادو دارای دو سرریز تونلی است. به دلیل وجود ترک در پوشش بتنی دیواره، در سالهای ۱۹۸۰-۱۹۸۱ در محل‌های متعددی، کاویتاسیون بوجود آمد. از این رو، برای بهبود بخشی و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی در آینده، هوادهایی پیش‌بینی و طراحی شد و قرار بود که در سال ۱۹۸۴ عملیات نصب آن آغاز گردد. با این حال، یک سال زودتر (یعنی در سال ۱۹۸۳) این سرریزها بار دیگر دچار آسیب کاویتاسیون شدند که شدیدتر از گذشته بود. شکل ۲-۷ آسیب سد Glenn Canyon در اثر وقوع پدیده کاویتاسیون را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲ آسیب در سرریز سد Glenn Canyon در سال ۱۹۸۳، [۱]

علاوه بر موارد فوق الذکر، در جدول ۱-۲ به چند سد مهم که کاویتاسیون خسارات شدیدی بر آنها وارد آورده، اشاره می‌گردد [۱۴].

جدول ۱-۲ سدهای آسیب دیده ناشی از کاویتاسیون، [۱۴]

| سال          | سد                                | محل کاویتاسیون                                            | ترمیم خرابیها                                            |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| ۱۹۴۱<br>۱۹۸۱ | هاوور <sup>۱</sup> ، آمریکا       | تخریب سرریز تونلی در ۱۹۴۱ و تخریب سرریز ترمیم شده در ۱۹۸۱ | استفاده از هواده                                         |
| ۱۹۶۰         | گرند کولی <sup>۲</sup> ، آمریکا   | تخریب مجرای خروجی بعلت تغییر مسیر جریان                   | استفاده از هواده                                         |
| ۱۹۶۴         | پالساد <sup>۳</sup> ، آمریکا      | تخریب پایین دست دریچه                                     | استفاده از هواده                                         |
| ۱۹۶۶         | آلدا-دیویلا <sup>۴</sup> ، پرتغال | تخریب سرریز تونلی                                         | استفاده از هواده                                         |
| ۱۹۶۷         | تروکریک <sup>۵</sup> ، آمریکا     | تخریب بتن حوضچه آرامش                                     | استفاده از ورقهای فولادی روی سطح حوضچه آرامش             |
| ۱۹۶۷         | یلوتایل <sup>۶</sup> ، آمریکا     | تخریب سرریز تونلی                                         | استفاده از بتن پلیمردار روی سطح سرریز و استفاده از هواده |
| ۱۹۷۰         | کلرکریک <sup>۷</sup> ، آمریکا     | تخریب بتن حوضچه آرامش                                     | استفاده از هواده                                         |
| ۱۹۷۲         | لیبی <sup>۸</sup> ، آمریکا        | تخریب حوضچه آرامش                                         | استفاده از هواده                                         |
| ۱۹۷۴         | تاریلا <sup>۹</sup> ، پاکستان     | تخریب کانال آبرسانی                                       | استفاده از بتن پلیمردار روی سطح کانال و استفاده از هواده |
| ۱۹۷۷         | کارون، ایران                      | تخریب تندآب سرریز                                         | استفاده از بتن پلیمردار روی سطح تندآب                    |
| ۱۹۸۲         | استمپد <sup>۱۰</sup> ، آمریکا     | تخریب بتن سرریز                                           | تزریق هوا                                                |
| ۱۹۸۳         | گلن کانیون <sup>۱۱</sup> ، آمریکا | تخریب سرریز تونلی                                         | ترمیم با هواده                                           |

## ۱۴-۲- توصیف فرآیند کاویتاسیون

در بخش‌های قبل به وجود ترکیبی از سرعت جریان، فشار جریان و فشار بخار آبی که در آن کاویتاسیون ظاهر شده، ناپدید می‌شود و یا خود به خود به سوپر کاویتاسیون انتقال می‌یابد اشاره شد. برای کمی کردن ویژگی‌های جریان در هر سطح معین کاویتاسیون به پارامتر بدون بعد نیاز است. قالب این پارامتر با توجه به نوع وسیله تغییر می‌کند. در فصل پیش رو ابتدا پارامترهای کاویتاسیون را مورد دسته‌بندی قرار داده، سپس تحقیقات انجام گرفته در زمینه کاویتاسیون با

محوریت قرار دادن مطالعات آزمایشگاهی و عددی بیان خواهند شد.

### ❖ پارامترهای کاویتاسیون

در گذشته پتانسیل کاویتاسیون را تنها با در نظر گرفتن سرعت جریان تعیین می‌کردند، به عنوان مثال یک قاعده معمول این بود که کاویتاسیون در سرعت‌های بیش از ۱۵ متر بر ثانیه رخ خواهد داد و در سرعت‌های بیش از ۳۰ متر بر ثانیه موجب خسارت‌های شدیدی می‌گردد، لیکن این قانون نمی‌تواند تاثیر فشار و همچنین خرابی‌های شدید غیر عادی در پایین دست قوس‌های قائم را توجیه نماید. بر این اساس و به منظور مشخص شدن میزان کاویتاسیون در انواع ناهمواری‌ها، اداره بهسازی ایالات متحده (USBR) و اداره مهندسی ارتش آمریکا (USACE) آزمایشات متعددی بر روی اشکال مختلف ناهمواری‌ها انجام داده‌اند که دستاورد این آزمایشات معرفی پارامتری به نام اندیس بحرانی کاویتاسیون است [۲].

این پارامتر به عنوان شاخص کاویتاسیون شناخته می‌شود. در شکل ۲-۸ با نوشتن معادله برنولی بین دو نقطه واقع بر بدنه داریم [۸]،

$$Z_0 + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (۱-۲)$$

از افت انرژی بین دو نقطه صرف‌نظر می‌شود. همچنین، رابطه (۱-۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\left[\left(\frac{P}{\gamma} + Z\right) - \left(\frac{P_0}{\gamma} + Z_0\right)\right]}{\frac{V_0^2}{2g}} = 1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \rightarrow \quad (۲-۲)$$

$$1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = \frac{E - E_0}{\frac{V_0^2}{2g}} = C_p$$

که در آن،

$$\left(Z + \frac{P}{\gamma}\right) = E \quad (۳-۲)$$

$$\left(Z_0 + \frac{P_0}{\gamma}\right) = E_0 \quad (2-4)$$

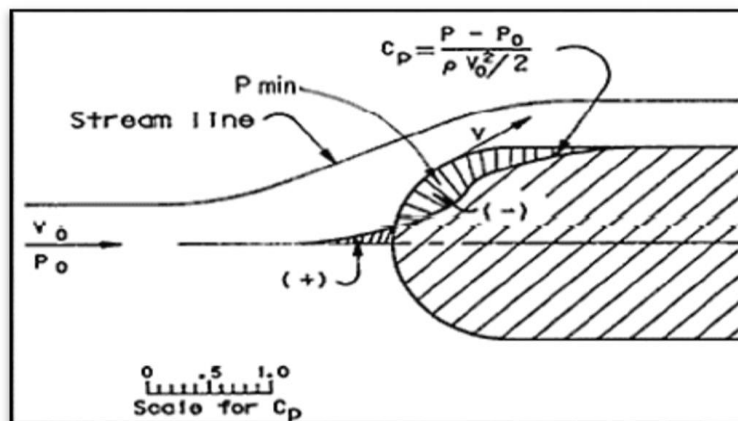
و نیز ضریب فشار است.

به عبارت دیگر پارامتر کاویتاسیون به ارتفاع و پتانسیل فشاری و سرعت جریان ارتباط پیدا می‌کند. اگر ارتفاع و پتانسیل فشاری  $\left(\frac{P_0}{\gamma}\right)$  برابر باشند، در اینصورت می‌توان ضریب فشار را به صورت عدد اولر نشان داد:

$$C_p = \frac{(P_v - P_0)}{\gamma \left(\frac{V_0^2}{2g}\right)} \quad (2-5)$$

$$\sigma = -(C_p)_{min} \quad (2-6)$$

که در آن،  $\sigma$  بیانگر شاخص کاویتاسیون،  $P_v$  فشار بخار سیال در دمای آب در حال جریان،  $P_0$  فشار روی حباب و  $V_0$  میزان سرعت جریان می‌باشند.

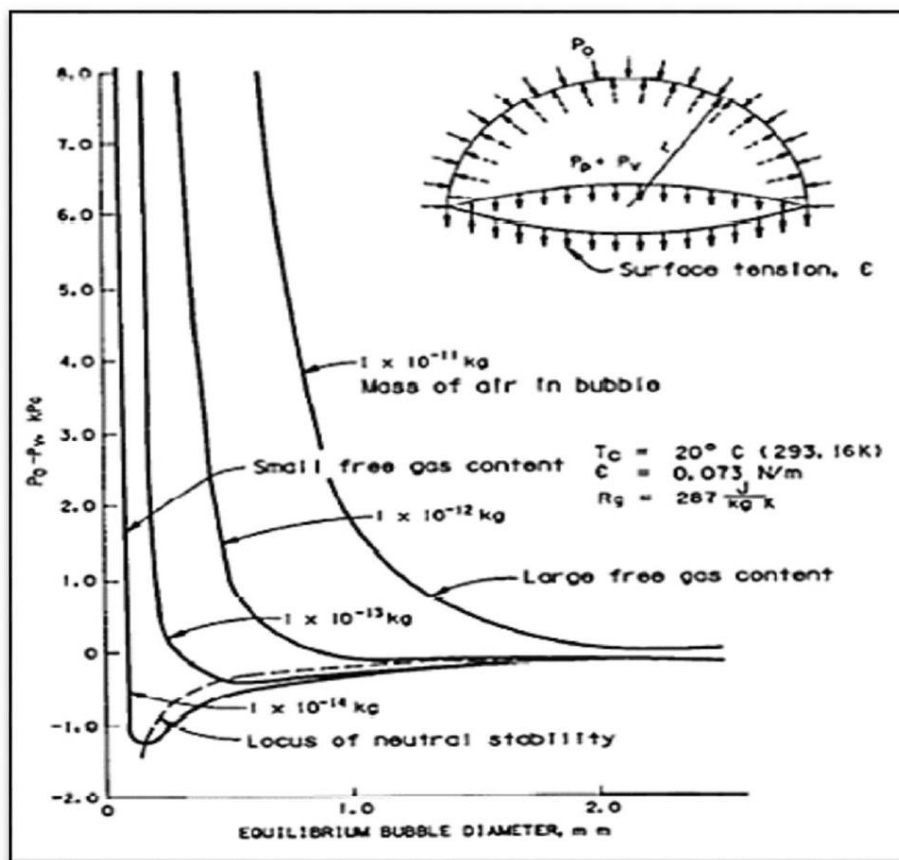


شکل ۸-۲ توزیع فشار بر روی میله با شکل نیمکره [۸]

## ❖ ساختار کاویتاسیون

اگر تعادل نیروهای وارد بر حباب نوشته و از آن دیفرانسیل گرفته شود، دسته ای از منحنی‌ها

را نتیجه می دهد که در شکل ۹-۲ مشاهده می شوند.



شکل ۹-۲ شرایط تعادل برای حباب بخار حاوی هوا [۲]

با توجه به این منحنی ها می توان به نکات زیر دست یافت:

(۱) اگر یک حباب با جرم کمی از گاز آزاد به یک ناحیه کم فشار انتقال یابد، قطر حباب تقریباً ثابت می ماند. اگر فشار به اندازه ای کاهش یابد که ابعاد حباب به شعاع بحرانی برسد، اندازه حباب به طور ناگهانی کاهش می یابد. انبساط سریع تنها هنگام تبخیر آب و با سهم اندکی از انبساط گاز امکان پذیر است. بنابراین، این فرآیند یک نوع کاویتاسیون تبخیری است.

(۲) اگر حباب شامل جرم زیادی از گاز آزاد به ناحیه کم فشاری انتقال یابد، قطر حباب بدون اینکه به شعاع بحرانی برسد به طور متناوب منبسط می شود. در این مورد، انبساط حباب عمدتاً ناشی از گاز است. این رشد غیر ناگهانی حباب که هرگز به فشار بخار نمی رسد ویژگی

کاویتاسیون گازی است.

۳) با توجه به منحنی مشخص می‌شود که اگر اختلاف فشار (میان فشار موضعی و فشار بخار) منفی نشود (تحت هر مقدار خاص و دلخواه از گاز) حالت ناپایداری حباب‌ها (انفجار) بوجود نیامده و بنابراین کاویتاسیون رخ نمی‌دهد.

۴) با توجه به منحنی‌های رسم شده برای مقادیر مختلف جرم گاز نتیجه می‌دهد هرچه جرم حباب‌ها بزرگتر باشد اختلاف فشار کمتر موجب مضمحل شدن حباب‌ها و کاویتاسیون می‌شود.

۵) هرچه جرم حباب‌ها بزرگتر باشد، نتیجتاً کاویتاسیون زودتر رخ می‌دهد [۲].

### ❖ چگونگی پایداری حباب کاویتاسیون

پایداری حباب کاویتاسیون همانند سایر پدیده‌های مشابه به تعادل نیروهای خارجی و داخلی ارتباط پیدا می‌کند. این نیروها عبارتند از:

۱) نیروهای داخلی که همانند فشار داخلی ناشی از فشار هوا، گاز یا بخار آب است.

۲) نیروهای خارجی که حاصل کشش سطحی و فشار هوا یا آب خارج از حباب در یک حباب

میکروسکوپی است. در حالت پایدار این نیروها به شرح زیر عمل می‌کنند:

$$\pi r^2 (P_v + P_p) = 2 \pi r t + \pi r^2 P_0 \quad (۷-۲)$$

که در آن،

$P_v$ : فشار بخار سیال در دمای آب در حال جریان

$P_0$ : فشار مبنا یا فشار جو روی حباب

$P_p$ : فشار جزئی گاز

$t$ : کشش سطحی که در طول عمل می‌کند

$r$ : شعاع حباب

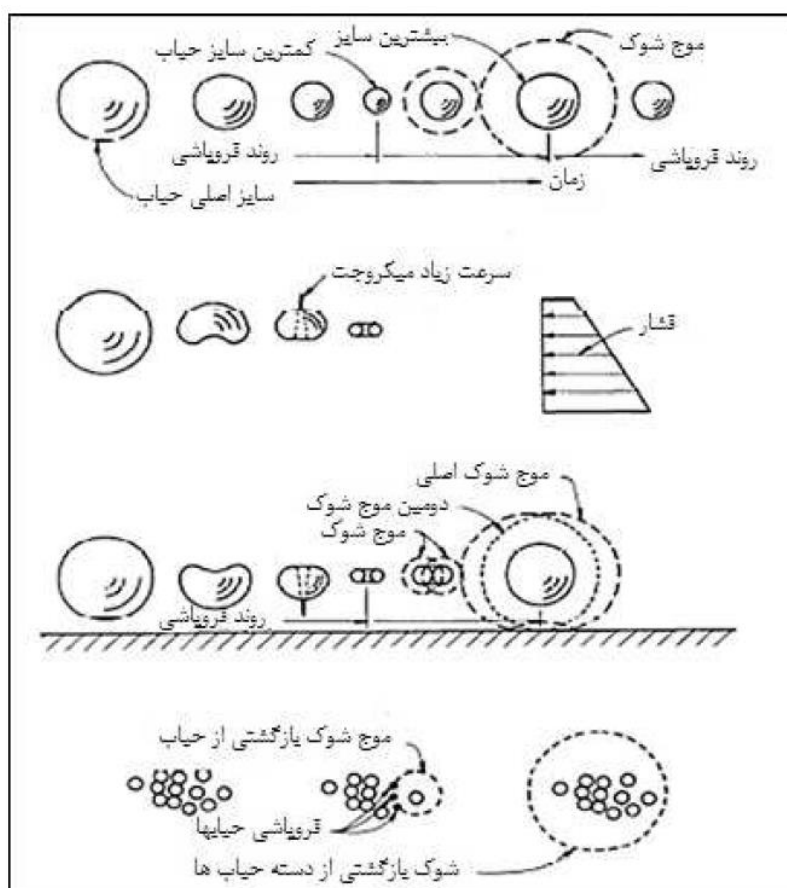
با ساده نمودن معادله فوق داریم که:

$$P_v + P_p = \frac{2t}{r} + P_0 \quad (۸-۲)$$

در حالت فوق حباب پایدار است و هر گونه تغییر در طرفین معادله سبب انفجار حباب می گردد.

### ❖ تلاشی حباب کاویتی

متلاشی شدن حباب بصورت تخریب دینامیکی صورت می گیرد. البته در فرض غیر قابل تراکم بودن سیال آب در هنگام متلاشی شدن حباب باید شک کرد، زیرا در نتیجه انفجار حباب، نیروی حاصل به قدری زیاد است که می تواند با تشکیل میکروجت به سطح آسیب بزند. در طول مرحله فروپاشی یا جهش حباب یک موج ضربه ای شکل می گیرد. فروپاشی حباب در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰ نحوه فروپاشی حبابها [۱۱]

مطابق شکل ۲-۱۰ حباب‌های داخل سیال به دلیل شرایط محلی شروع به کوچک شدن کرده و در یک مرحله بحرانی، انفجار حباب حاصل می‌شود و سپس حباب‌های ریز حاصله شروع به کوچکتر شدن می‌کنند و در یک مرحله بحرانی، انفجار حباب مجدداً رخ می‌دهد و سپس حباب-های ریز حاصله شروع به بزرگ شدن و سپس به مرحله دوم انفجار می‌رسند. وجود چند میلیون حباب در حال انفجار سبب ایجاد نیروی مخربی می‌شود که سازه را تخریب می‌کنند.

### ❖ کنترل شاخص کاویتاسیون در سرریز

در جریان پایین دست شوت، سرعت جریان افزایش و ارتفاع آن کاهش می‌یابد. ترکیب این دو اثر شاخص کاویتاسیون را در طول شوت کم می‌کند. سرانجام در روی شوت به نقطه‌ای می‌رسد که در آن سطح نرمال به دلیل شروع کاویتاسیون مختل می‌شود. به وسیله کاهش سرعت جریان یا افزایش فشار مرزی می‌توان از کاویتاسیون جلوگیری کرد. سرعت جریان عامل اصلی کاهش فشار در جریان هیدرولیکی است و معمولاً سرعت‌های بالاتر از ۱۰ متر بر ثانیه نگران کننده است. البته گاهی اوقات در سرعت‌های ۳۰ متر بر ثانیه نیز خسارت اتفاق نیافتاده که این به عوامل دیگر بستگی دارد. همچنین هوای موجود در آب موجب کاهش کاویتاسیون می‌گردد و معمولاً بیش از ۰/۰۷ مول در هر مول آب خسارت را از بین می‌برد.

عامل مقاومت سطح جریان اثر بسیار مهمی در کاهش اثر کاویتاسیون دارد، بطوریکه فولاد ضد زنگ، فولاد کربن دار، آلومینیوم، بتن پلیمری و بتن معمولی به ترتیب خسارت بیشتری را نشان می‌دهد.

پارامتر مهمی که وقوع کاویتاسیون را مشخص می‌کند عدد کاویتاسیون است. طبق مطالعات USBR در صورتی که شاخص کاویتاسیون بیشتر از ۰/۲ باشد پدیده کاویتاسیون رخ نمی‌دهد و در صورتی که شاخص کاویتاسیون کمتر از ۰/۲ باشد، احتمال وقوع کاویتاسیون زیاد است. طبق این مطالعات اگر عدد کاویتاسیون بین ۰/۲ و ۰/۱ باشد، وجود سیستم هواده یا روش‌های دیگر جلوگیری از کاویتاسیون ضروری خواهد بود و در صورتی که اندیس کاویتاسیون کمتر از ۰/۱ باشد سرریز نیاز به طراحی مجدد دارد [۱۷].

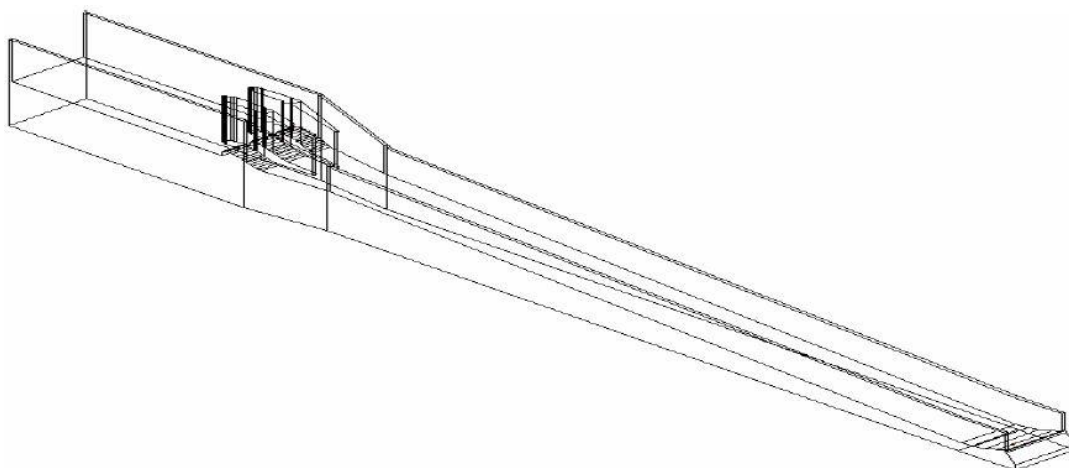
## ۲-۱۵- مروری بر مطالعات پیشین

در این قسمت به تاریخچه‌ای از پدیده کاویتاسیون و آثار آن در سرریزها پرداخته شده است. در این زمینه، پیشینه مطالعات و کارهای عددی/آزمایشگاهی مربوط به دینامیک سیالات محاسباتی را در سرریزها ارائه می‌دهیم. پژوهش‌های عددی انجام شده بر پدیده کاویتاسیون در سرریزها، بیشتر بصورت آنالیز عددی، ارزیابی پارامترهای موثر و تشخیص احتمال وقوع آسیب بوده است. در ادامه، مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی، عددی و کامپیوتری انجام شده در زمینه پدیده کاویتاسیون، شرح داده شده است.

### ❖ بررسی مطالعات انجام شده به روش تجربی

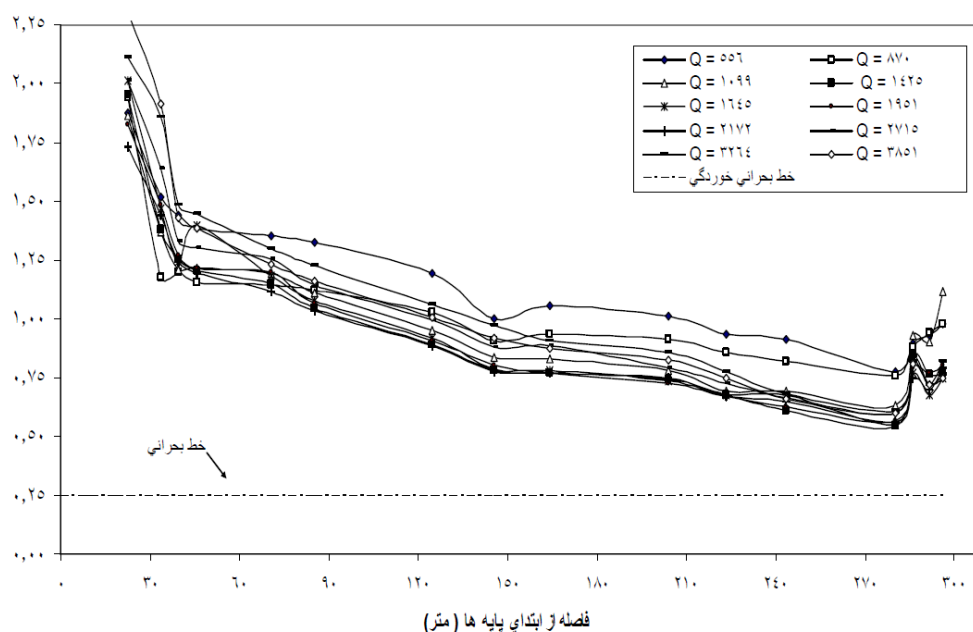
معمولاً جهت کاهش هزینه‌های احداث پروژه، کانال‌های تنداب و مجاری انتقال در کوتاه‌ترین مسیر و با شیب زیاد طراحی می‌شوند، بدین ترتیب احتمال وقوع خرابی‌های ناشی از کاویتاسیون به دلیل سرعت زیاد جریان وجود دارد. محققان با استفاده از نتایج مطالعات نمونه واقعی و مدل‌های هیدرولیکی معیارهایی را برای جلوگیری از پدیده کاویتاسیون معرفی نموده‌اند، که با استفاده از آن می‌توان بروز کاویتاسیون را پیش‌بینی کرد. بر همین اساس مدل‌های هیدرولیکی سرریز اکثر سدها ساخته و با اندازه‌گیری فشار و سرعت جریان، وقوع کاویتاسیون پیش‌بینی شده و مطالعات کاملی در تعیین ابعاد و محل هواده صورت می‌گیرد.

ابن جلال و مهري در تحقيق به بررسی پدیده کاویتاسیون در سرریز سد بالارود پرداختند. در این تحقیق مدل سرریز سد مخزنی بالارود با مقیاس ۱:۱۱۰ ساخته شد. آزمایش‌ها با برقراری ۱۴ دبی مختلف و متناسب با شرایط واقعی با اندازه‌گیری پارامترهای مهم جریان (عمق، سرعت و فشار) در دو محور وسط و طرفین مسیر انجام گرفت. با مطالعه و بررسی نتایج اندازه‌گیری‌های شاخص کاویتاسیون در مقاطع مختلف در طول سرریز تعیین و با مقدار بحرانی ضریب کاویتاسیون مقایسه شد [۱۶]. پلان سرریز سد بالا رود در شکل ۲-۱۱ آورده شده است.



شکل ۱۱-۲ پلان سرریز سد بالارود [۱۶]

شکل نتایج نشان داد که با افزایش سرعت در تنداب به ازاء هر دبی جریان، شاخص کاویتاسیون کاهش یافته و در ابتدای پرتاب کننده‌ی جامی در محور وسط به کمترین مقدار خود می‌رسد. نتایج ضریب کاویتاسیون در شکل ۱۲-۲ آورده شده است. همچنین حداقل ضریب کاویتاسیون ( $\sigma_{cr}$ ) برابر ۰/۵۴۵ می‌شود که بیشتر از ضریب بحرانی ( $\sigma_{cr} = 0.25$ ) است و کاویتاسیون رخ نمی‌دهد.



شکل ۱۲-۲ منحنی شاخص کاویتاسیون بر روی تنداب در دبی‌های مختلف [۱۶]

## ❖ بررسی مطالعات انجام شده به روش عددی

استفاده از مدل عددی اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط کسیدی در تعیین فشار روی تاج سرریز بر اساس جریان پتانسیل به صورت دو بعدی صورت گرفت. نتایج حاصله از این تحلیل عددی جریان بر روی سرریز با نتایج آزمایشگاهی تقریباً یکسان بوده و نتیجه حاصل از این تحقیق بیانگر تاثیر ناچیز لزجت در تعیین سطح آزاد بوده است [۱۷].

در سال ۱۹۷۳ واشیزو و ایکگاواک در روش حل خود در حل معادلات حاکم بر میدان جریان از المان محدود به صورت خطی استفاده کردند، نتایج بدست آمده توسط کسیدی را تکرار نمودند اما سرعت همگرایی در تحلیل عددی افزایش یافت [۱۸].

لی و همکاران در سال ۱۹۸۹ از انفصال میدان جریان به روش المان محدود و حل دو بعدی میدان جریان به صورت جریان پتانسیل نتایج دقیق‌تری از انحنای سطح آب در تحلیل جریان بدست آوردند [۱۹].

در سال ۱۹۹۸ اولیسین و جلسویگ با استفاده از معادلات رینولدز میانگین گیری شده در زمان (RANS) و نیز معادلات  $k-\epsilon$  استاندارد به روش حجم محدود جریان عبوری از روی سرریز را به صورت دو بعدی و سه بعدی تحلیل نمودند. در تعیین سطح آزاد جریان، ابتدا کل سرریز بصورت مستغرق در نظر گرفته شده است، که با گذر زمان به علت وجود عبارت مربوط به ثقل در معادلات حاکم سطح آزاد جریان شکل واقعی خود را بدست می‌آورد. نتایج بدست آمده بیانگر دقت بالای روش استفاده شده می‌باشد. نکته مهمی که از این تحلیل بدست آمده آن است که اثر الگوی پخش در تعیین ضریب دبی سرریز بسیار کم و ناچیز می‌باشد [۲۰].

در سال ۱۹۹۹ بورگسیر و روشمنه جریان دو بعدی قائم بر روی تاج سرریز را به روش المان محدود با فرض جریان تراکم ناپذیر و آشفته تحلیل نمودند. معادلات حاکم بر جریان معادلات رینولدز میانگین گیری شده می‌باشد که نتایج حاصل از حل عددی در تعیین ضریب دبی سرریز و نحوه توزیع فشار روی آن به نتایج تجربی بسیار نزدیک بوده است. به منظور تعیین سطح آزاد آب ابتدا سطح آزاد جریان بر اساس نتایج قبلی آزمایشگاهی برای مدل تعریف شده و سپس میدان جریان حل می‌شود. چنانچه شرط مرزی سطح آزاد آب، که همان فشار صفر و سرعت نرمال صفر

می‌باشد، ارضاء نشود در سلول مدنظر جریان در راستای قائم جابجا خواهد شد [۲۱].

یونانی و همکاران در سال ۱۹۹۹ با ترکیب دو روش حجم محدود و المان محدود جریان سطح آزاد روی سرریز را به صورت دو بعدی با شبکه نامنظم مثلثی شکل مدل کردند و از روش-های آپولند و گالری استاندارد در انفضال معادلات مومنتوم و پیوستگی استفاده نمودند. الگوریتم زمانی مورد استفاده بر پایه روش رانگ کوتا مرتبه چهارم استوار می‌باشد. نتایج بدست آمده از تحلیل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی از دقت بالایی برخوردار نمی‌باشد و دلیل آن لایه‌ای در نظر گرفتن نوع جریان می‌باشد [۲۲].

توفی و ویلسون در سال ۲۰۰۱ به روش تفاضل محدود جریان دو بعدی در قائم عبوری از تاج سرریز را با فرض جریان پتانسیل و اعمال شرط نیومن بر مرزهای میدان جریان تحلیل نمودند. نتایج حاصل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بیانگر اثر کم لزجت بر میدان جریان می‌باشد. سطح آزاد محاسباتی نیز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که دقت مناسب روش را بیان می‌کند.

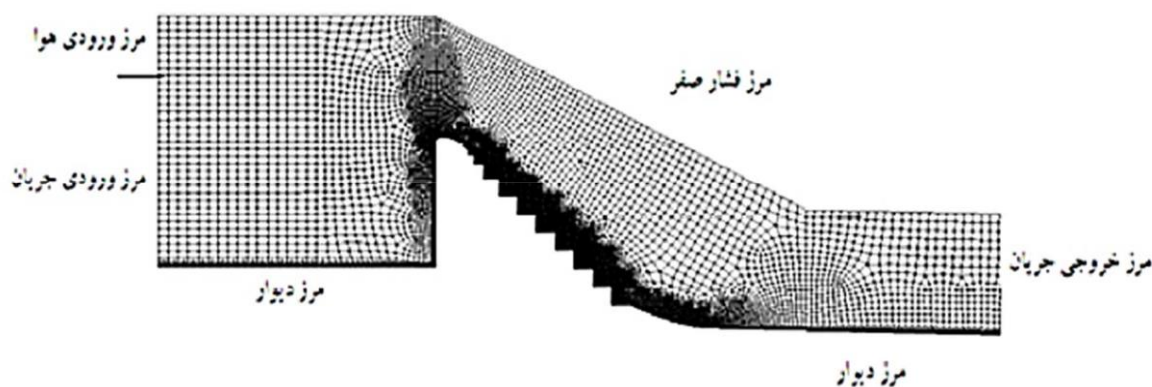
بروس و همکاران در سال ۲۰۰۱ جریان عبوری از روی یک سرریز اوجی استاندارد را به صورت فیزیکی و عددی مدل نمودند. نتایج حاصل از تحلیل عددی دوبعدی در قائم جریان آشفته با استفاده از معادلات  $k-\epsilon$  استاندارد به روش حجم محدود، که توسط نرم افزار Flow 3D صورت گرفته است به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک می‌باشد. در این نرم افزار به منظور تعیین پروفیل سطح آب از تکنیک حل معادله VOF بهره گرفته شده است.

خورشیدی و همکاران در یک تحقیق به مطالعه و بررسی پدیده کاویتاسیون در مجرای تخلیه کننده تحتانی سد سفیدرود به کمک نرم افزار Fluent پرداختند و با استفاده از مدل حجم سیال، جریان متلاطم دو فازی آب و هوا مدل گردید. در این مدل مقادیر فشار و سرعت جریان در طول مجرا حاصل شد و سپس تخمین کاویتاسیون انجام گرفت [۲۳].

کاویانپور و همکاران در یک تحقیق با استفاده از نرم افزار Fluent به تحلیل عددی جریان هوادهی در پایین دست هواده ها پرداختند. برای مدل کردن آشفتگی جریان، از مدل  $k-\epsilon$  در حل عددی استفاده شد. به منظور حل عددی در مرحله اول هندسه این مدل توسط نرم افزار Gambit

تهیه شده و مش بندی گردید، سپس با حل عددی توسط نرم افزار Fluent به بررسی تاثیر هوادهی بر پارامترهای هیدرولیکی پرداخته شده است. به منظور بررسی هوادهی از مدل VOF استفاده گردید [۲۴].

شمسایی و محمدی در تحقیقی به مطالعه تاثیر هندسه پله بر افت انرژی در سرریزهای پلکانی با شبیه سازی عددی پرداختند. شکل ۲-۱۳ هندسه، شرایط مرزی و شبکه بندی مدل شمسایی را نشان می دهد. این شبیه سازی با استفاده نرم افزار Fluent و برای پیش بینی خصوصیات عمده جریان مانند: سطح آزاد، سرعت جریان، فشار روی پله ها و نیز تعیین میزان افت انرژی بکار رفته است. برای شبیه سازی جریان آشفته از مدل  $k-\epsilon$  استفاده گردید [۲۵].



شکل ۲-۱۳ میدان حل شامل مرزهای جریان، شبکه و سلول های محاسباتی، [۲۵]

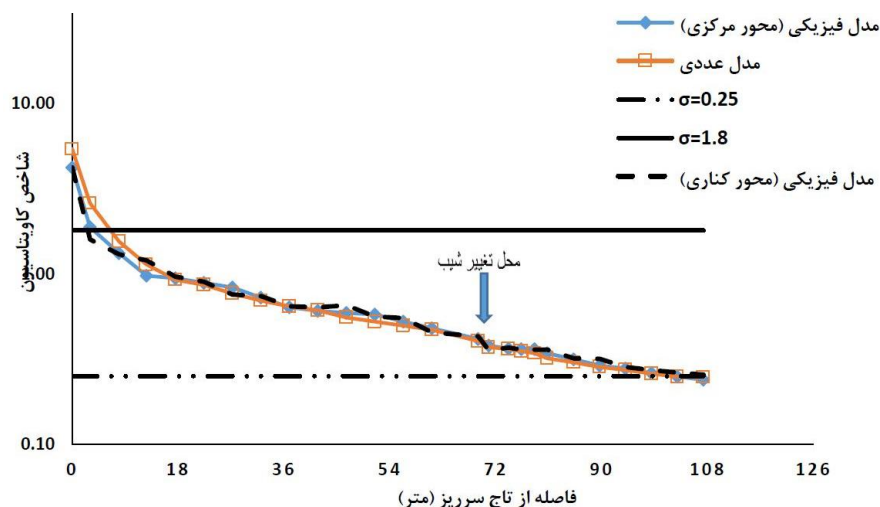
کرمانی و همکاران سطوح آسیب کاویتاسیون بر روی سرریزها را رده بندی نمودند. بر این اساس، پنج نوع سطح آسیب منحصر بفرد (از عدم وقوع کاویتاسیون گرفته تا وقوع کاویتاسیون فراگیر در سرریز) در برابر رخداد کاویتاسیون تعیین شد. به این منظور، دو عامل عمده موثر بر آسیب کاویتاسیون (شامل سرعت جریان و شاخص کاویتاسیون) در نظر گرفته شده اند. کرمانی و همکاران مطابق با این دو عامل موثر، میزان آسیب کاویتاسیون و محل مربوط به وقوع این آسیب را برای سرریز شوت سد شهید عباسپور پیش بینی نمودند. هنگامیکه میزان سرعت جریان کمتر یا مساوی ۵ متر بر ثانیه باشد، هیچگونه آسیب و خرابی ناشی از وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریز

قابل رویت نمی‌باشد و جریان بدون آسیب سطحی از سرریز عبور خواهد کرد. چنانچه میزان سرعت جریان عبوری از سرریز در دامنه ۵ تا ۱۶ متر بر ثانیه باشد، وقوع یا عدم وقوع کاویتاسیون محتمل‌اند. همچنین، به ازای سرعت‌های ۱۶-۱۸ متر بر ثانیه خرابی ناشی از کاویتاسیون در سطوح سرریز پدید می‌آید. در نهایت با افزایش سرعت جریان به مقادیر بزرگتر از ۴۰ متر بر ثانیه آسیب گسترده ناشی از کاویتاسیون در سطح سرریز مربوطه رخ می‌دهد. در جدول ۲-۲، رده‌بندی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون بر اساس شاخص کاویتاسیون نیز تعیین شده است [۲۶].

جدول ۲-۲ رده‌بندی پتانسیل آسیب کاویتاسیون [۲۶]

| Level | Cavitation Damage Risk                            | Intervals of Velocity | Intervals of Cavitation Index |
|-------|---------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| ۱     | بدون ایجاد خرابی ناشی از کاویتاسیون               | $V \leq 5$            | $\sigma > 1$                  |
| ۲     | احتمال ایجاد خرابی در سطح سرریز مربوطه وجود دارد. | $5 < V \leq 16$       | $0.45 < \sigma \leq 1$        |
| ۳     | آسیب کاویتاسیون به وقوع می‌پیوندد.                | $16 < V \leq 25$      | $0.25 < \sigma \leq 0.45$     |
| ۴     | آسیب شدید                                         | $25 < V \leq 40$      | $0.17 < \sigma \leq 0.25$     |
| ۵     | آسیب گسترده در سطح سرریز                          | $V > 40$              | $\sigma \leq 0.17$            |

عباسی با بهره‌گیری از مدل فیزیکی و شبیه‌سازی‌های عددی در نرم افزار Fluent، پدیده کاویتاسیون در سرریز سد سورک را مطالعه نمودند [۲۷]. ایشان با ساخت مدل فیزیکی در مقیاس ۱:۵۰، پارامترهای عمق جریان، فشار، سرعت و شاخص کاویتاسیون را به ازای پنج دبی مختلف تعیین نمودند. به دنبال آن، نتایج مدل فیزیکی با استفاده از نرم افزار Fluent مورد ارزیابی و مدل‌سازی قرار گرفتند. در زمان عبور دبی ماکزیمم از روی سرریز مورد نظر، از فاصله سه متری از تاج سرریز با افزایش سرعت جریان شاخص کاویتاسیون کاهش یافته و مقدار آن کمتر از ۱/۸ محاسبه و مشاهده گردید که این روند تا فاصله ۱۰۳ متری از تاج سرریز ادامه دارد. در این محدوده، می‌بایست به کمک اصلاح نامنظمی‌ها و ناهمواری‌های سطح بتن جریان در سرریز سد سورک اصلاح گردد تا از وقوع کاویتاسیون جلوگیری شود [۲۷].

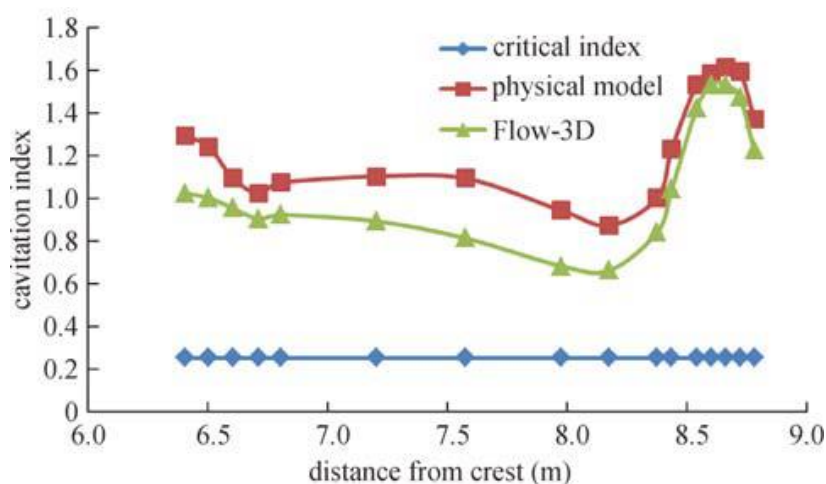


شکل ۲-۱۴ تغییرات شاخص کاویتاسیون در طول سرریز سد سورک به ازای دبی ماکزیمم، (برگرفته از [۲۷])

پارسایی پدیده کاویتاسیون در قسمت پرتاب کننده جامی سرریز سد بالارود را مطالعه نمود [۲۸]. به این منظور، مدلسازی عددی بر اساس فرمولبندی دینامیک سیالات محاسباتی در نرم افزار FLOW-3D انجام شده است. لازم به گفتن است که مدل آشفتگی RNG نیز برای مدلسازی کاویتاسیون برگزیده شده است. نتایج به دست آمده مربوط به توزیع فشار از تحلیل عددی، به ازای سه نرخ جریان عبوری متفاوت، نشان دهنده‌ی این است که نواحی پر فشار به شدت مستعد بروز آسیب کاویتاسیون هستند. نتایج مربوط به محاسبه شاخص کاویتاسیون در جدول ۲-۳ ارائه شده‌اند. همانگونه که مشخص است با دور شدن از تاج سرریز و حرکت به سمت پائین دست، شاخص کاویتاسیون به دلیل کاهش فشار و افزایش در سرعت جریان، کاهش می‌یابد. این روند نزولی به ازای تمامی دبی‌های عبوری مشهود است و با رسیدن جریان به پرتاب کننده جامی، منحنی شاخص کاویتاسیون مقعر شده و شاخص کاویتاسیون افزایش یافته است.

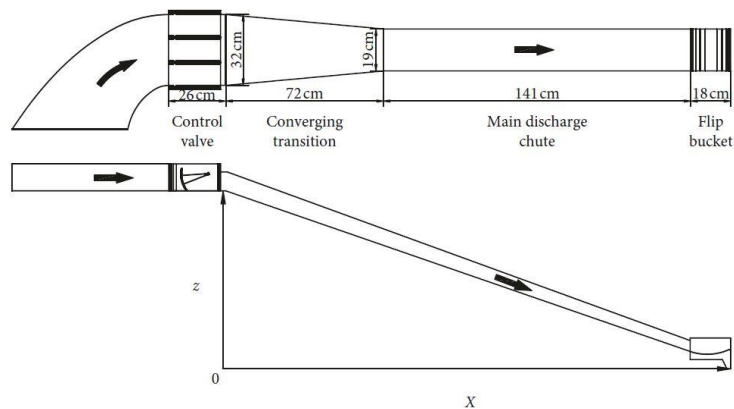
جدول ۳-۲ نتایج مربوط به شاخص کاویتاسیون به ازای دبی‌های مختلف، (برگرفته از [۲۸])

| piezometer number | distance from crest | $\sigma_{cr}$ | $Q = 66.7 \text{ (m}^3/\text{s)}$ |         | $Q = 85.9 \text{ (m}^3/\text{s)}$ |         | $Q = 160 \text{ (m}^3/\text{s)}$ |         | $Q = 190.3 \text{ (m}^3/\text{s)}$ |         |
|-------------------|---------------------|---------------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|----------------------------------|---------|------------------------------------|---------|
|                   |                     |               | physical model                    | Flow 3D | physical model                    | Flow 3D | physical model                   | Flow 3D | physical model                     | Flow 3D |
| 22                | 6.407               | 0.25          | 1.78                              | 1.55    | 1.78                              | 1.85    | 1.1                              | 0.97    | 1.29                               | 1.02    |
| 23                | 6.507               | 0.25          | 1.39                              | 1.62    | 1.32                              | 1.83    | 1.14                             | 0.96    | 1.24                               | 1       |
| 24                | 6.607               | 0.25          | 1.41                              | 1.6     | 1.29                              | 1.74    | 1.22                             | 0.92    | 1.09                               | 0.95    |
| 25                | 6.717               | 0.25          | 1.7                               | 1.51    | 1.34                              | 1.62    | 1.08                             | 0.9     | 1.02                               | 0.9     |
| 26                | 6.807               | 0.25          | 1.57                              | 1.55    | 1.43                              | 1.49    | 1.13                             | 0.9     | 1.07                               | 0.92    |
| 27                | 7.207               | 0.25          | 1.65                              | 1.28    | 1.45                              | 1.26    | 1.11                             | 0.87    | 1.1                                | 0.89    |
| 28                | 7.58                | 0.25          | 1.16                              | 1.07    | 1.25                              | 1.01    | 0.93                             | 0.76    | 1.09                               | 0.81    |
| 29                | 7.978               | 0.25          | 1.11                              | 0.94    | 1.14                              | 0.98    | 0.94                             | 0.67    | 0.94                               | 0.68    |
| 30                | 8.178               | 0.25          | 1.11                              | 0.91    | 1.03                              | 0.95    | 0.84                             | 0.7     | 0.87                               | 0.66    |
| 31                | 8.378               | 0.25          | 0.95                              | 0.97    | 1.05                              | 1       | 0.77                             | 0.81    | 1                                  | 0.84    |
| 32                | 8.438               | 0.25          | 0.84                              | 1.08    | 1.05                              | 1.18    | 0.97                             | 0.93    | 1.23                               | 1.04    |
| 33                | 8.542               | 0.25          | 0.9                               | 1.53    | 1.31                              | 1.79    | 1.13                             | 1.33    | 1.53                               | 1.42    |
| 34                | 8.602               | 0.25          | 1.28                              | 1.76    | 1.53                              | 2.05    | 1.25                             | 1.42    | 1.58                               | 1.53    |
| 35                | 8.662               | 0.25          | 1.37                              | 1.71    | 1.56                              | 2.07    | 1.4                              | 1.43    | 1.61                               | 1.53    |
| 36                | 8.722               | 0.25          | 1.5                               | 1.88    | 1.46                              | 1.94    | 1.26                             | 1.48    | 1.59                               | 1.47    |
| 37                | 8.782               | 0.25          | 1.66                              | 1.88    | 1.51                              | 1.7     | 1.26                             | 1.2     | 1.37                               | 1.22    |



شکل ۲-۱۵ شاخص کاوستاسیون به ازای دبی جریان ۰/۱۹۰۳ (برگرفته از [۲۸])

وان و همکاران به بررسی عددی جریان هیدرولیکی و پدیده کاویتاسیون در سرریز شوت روباز پرداختند [۲۹]. ایشان صحت نتایج و تحلیل عددی خود را با انجام آزمایش هیدرولیکی تصدیق نمودند. در شکل ۲-۱۷ سرریز شوت مورد بررسی را مشاهده می‌کنید که شامل شیر کنترل، نازل، شوت جریان اصلی و پرتاب کننده جامی می‌باشد. همچنین، در شکل ۲-۱۸ مدل آزمایشگاهی سرریز شوت و پرتاب کننده جامی نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۶-۲ جزئیات و ابعاد سرریز شوت (برگرفته از [۲۹])



الف) شوت اصلی تخلیه جریان

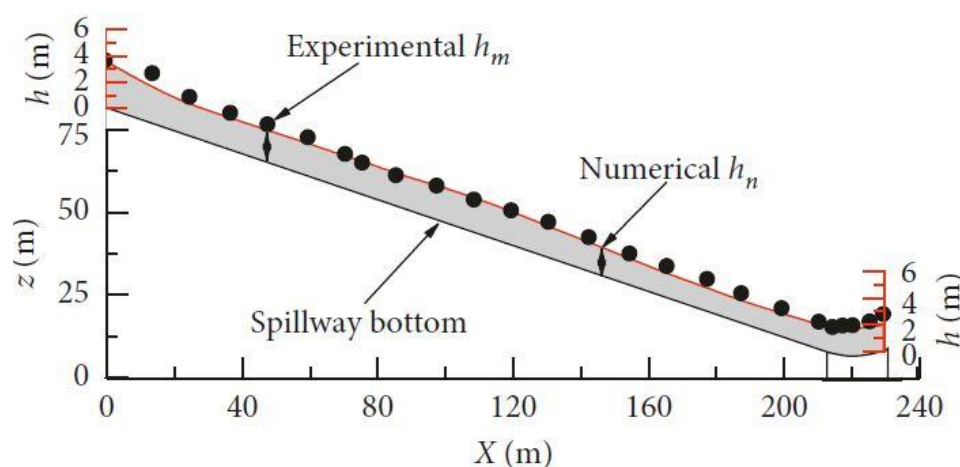


ب) پرتاب کننده جامی

شکل ۱۷-۲ مدل فیزیکی برای بررسی آزمایشگاهی کایتاسیون، (برگرفته از [۲۹])

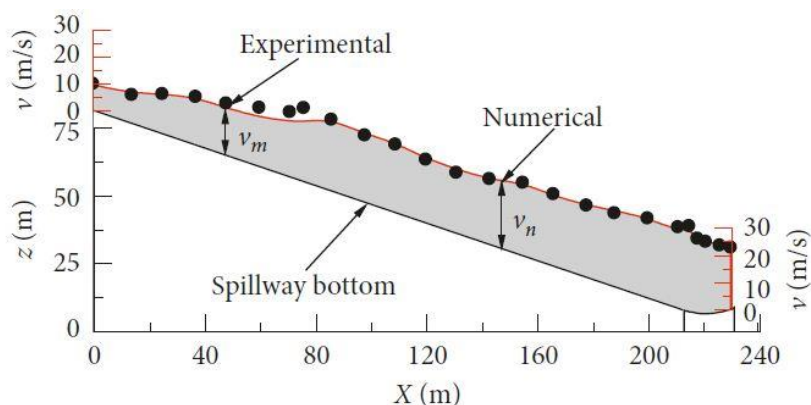
در این قسمت به بررسی داده‌های بدست آمده از پژوهش وان و همکاران پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا به بررسی پروفیل جریان در طول سرریز می پردازیم. لازم به گفتن است که پروفیل سطح جریان معرف عمق آب در موقعیت های مختلف در طول سرریز می باشد. در شکل ۱۹-۲ نتایج تحلیل عددی و یافته های آزمایشگاهی مربوط به پروفیل جریان نشان داده شده است.

مقایسه میان دو روش فوق حاکی از دقت نتایج و صحت عملکرد شبیه سازی‌های عددی می‌باشد.

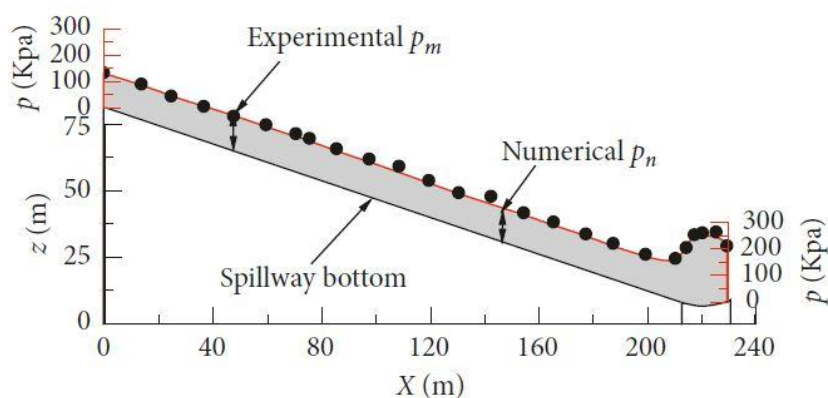


شکل ۲-۱۸ چگونگی توزیع پروفیل سطحی جریان آب در محور مرکزی سرریز شوت، (برگرفته از [۲۹])

پیش از این بیان شد که سرعت و فشار به عنوان دو عامل بسیار موثر در تحلیل کاویتاسیون شناخته شده اند. بطور معمول، پدیده کاویتاسیون در نواحی خلأ با سرعت جریان پائین و فشار بالا صورت می پذیرد. شکل‌های ۲-۲۰ و ۲-۲۱ به ترتیب توزیع سرعت میانگین و فشار در خط مرکزی سرریز و کف آن را نشان می‌دهند. همانطور که از شکل‌های ۲-۲۰ و ۲-۲۱ نیز مشخص است نتایج حاصل از تحلیل عددی و مدل آزمایشگاهی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. با این حال، تحلیل عددی نتایج بیشتری در اختیار می‌گذارد و مدل آزمایشگاهی تنها در موقعیت‌هایی که ابزار سنجش و اندازه‌گیری سرعت و فشار نصب شده باشند، خروجی دارند.

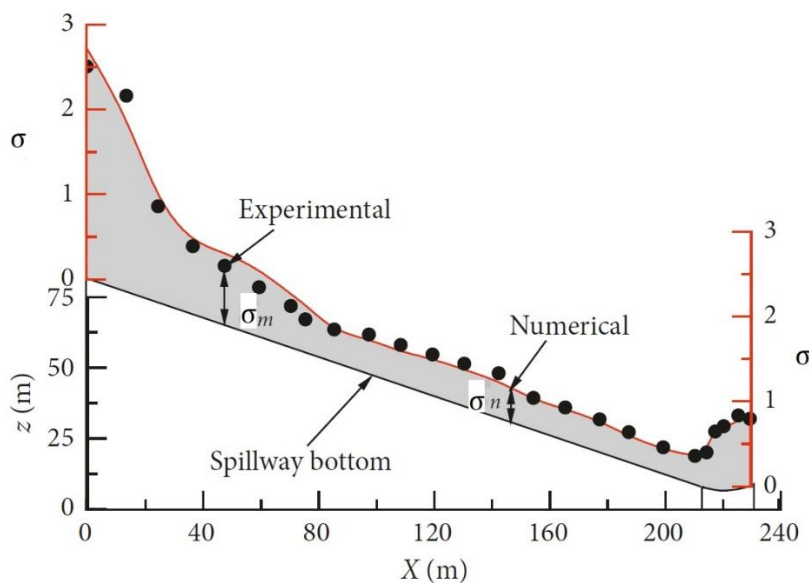


شکل ۱۹-۲ توزیع سرعت میانگین در طول خط مرکزی سرریز و در کف آن، (برگرفته از [۲۹])



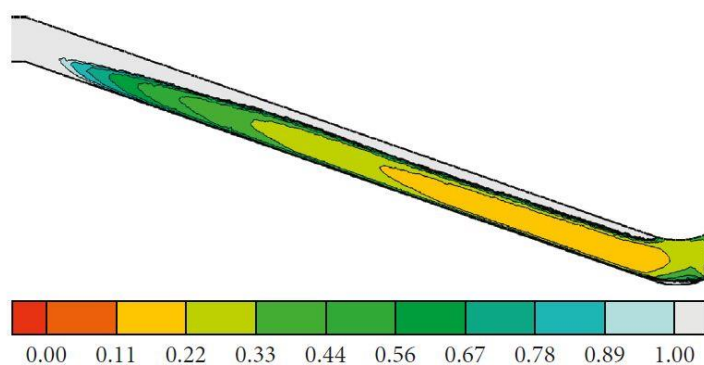
شکل ۲۰-۲ توزیع فشار در طول خط مرکزی سرریز و در کف آن، (برگرفته از [۲۹])

با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به فشار بخار محلی، چگالی آب، سرعت و فشار گره‌ای، مقدار عدد یا شاخص کاویتاسیون قابل محاسبه می‌باشد. در شکل ۲۲-۲ توزیع شاخص میانگین کاویتاسیون در خط مرکزی سرریز نشان داده شده است. همانگونه که نتایج بدست آمده از شبیه سازی های نرم افزاری که با خط مشخص شده اند تطابق بسیار خوبی با یافته‌های حاصل از مدل فیزیکی که با نقطه مشکی نشان داده شده‌اند، دارد.



شکل ۲-۲۱ پروفیل توزیع شاخص کاویتاسیون، (برگرفته از [۲۹])

بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، پروفیل مربوط به شاخص کاویتاسیون در مسیر مرکزی سرریز شوت در شکل ۲-۲۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که شاخص کاویتاسیون با دور شدن از شیر کنترل و حرکت به سمت پرتاب کننده جامی، بطور منظم کاهش می‌یابد. لازم به گفتن است که مقادیر کوچکتر شاخص کاویتاسیون حاکی از بالا بودن احتمال وقوع کاویتاسیون در سرریز می‌باشد.



شکل ۲-۲۲ کانتور مربوط به توزیع شاخص کاویتاسیون در خط مرکزی سرریز، (برگرفته از [۲۹])

## فصل سوم: اصول مدلسازی عددی

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به مطالب مختصری مربوط به دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) پرداخته می شود. در ادامه نرم افزار مورد استفاده در مدل سازی این پژوهش (Fluent) معرفی خواهد شد. همچنین در ادامه به بیان معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی سیال (که می توان آن را در قالب دو دیدگاه اویلری و لاگرانژی بیان نمود) و همچنین سازه پرداخته خواهد شد. به منظور تایید اعتبار نتایج بدست آمده و ادامه روند مدل سازی (صحت سنجی)، در انتهای فصل گزارشی از اعتبار سنجی نرم افزار Fluent با نمونه آزمایشی بیان می شود.

### ۳-۲- دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

دینامیک سیالات محاسباتی یکی از بزرگ ترین زمینه هایی است که مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندی های نوین محاسباتی آن وصل می کند. سرگذشت پیدایش و گسترش دینامیک سیالات محاسباتی را نمی توان جدای از تاریخ اختراع، رواج، و تکامل کامپیوترها نقل کرد. تا حدود انتهای جنگ جهانی دوم، بیشتر شیوه های مربوط به حل مسائل دینامیک سیالات از طبیعتی تحلیلی یا تجربی برخوردار بود. همچون تمامی نوآوری های برجسته علمی، در این مورد هم اشاره به زمان دقیق آغاز دینامیک سیالات محاسباتی آسان نیست. در اغلب موارد، نخستین کار با اهمیت در این رشته را به ریچاردسون نسبت می دهند، که در سال ۱۹۱۰ میلادی محاسبات مربوط به نحوه پخش تنش در یک سد ساخته شده از مصالح بنایی را به انجام رسانید.

در روش CFD با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره ای حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم می شود. با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل به المان های کوچکتر و اعمال شرایط مرزی برای گره های مرزی با اعمال تقریب هایی، یک دستگاه معادلات خطی بدست می آید که با حل این دستگاه معادلات جبری، میدان سرعت، فشار و دما، در ناحیه مورد نظر

بدست می آید.

با استفاده از نتایج بدست آمده از حل معادلات می توان برآیند نیروهای وارد بر سطوح، ضرایب برا و پسا و ضریب انتقال حرارت را محاسبه نمود.

به سه روش می توان یک میدان جریان را مدلسازی نمود [۳۰]:

الف) روش های تجربی (آزمایشگاهی)

ب) روش های تئوری و تحلیلی

ج) روش های حل عددی و CFD

روش های تجربی و آزمایشگاهی بر پایه اندازه گیری های عملی و اغلب بر اساس قضیه پی باکینگهام بنا شده اند و با بی بعد کردن معادلات می توان یک نمونه با اندازه بسیار کوچکتر از شرایط واقعی را آزمایش کرد و سپس با استفاده از قضیه پی باکینگهام، نتایج حاصله به مدل واقعی نسبت داده می شوند.

روش های تئوری و تحلیلی بر پایه حل معادلات حاکم در مکانیک سیالات بنا شده اند، اما در اغلب موارد فرمول بندی قوانین پایه مکانیک سیالات بصورت معادلات دیفرانسیل پاره ای مرتبه دومی در می آیند که فقط در بعضی از حالت های خاص دارای حل تحلیلی و دقیق هستند به دلیل پیچیدگی معادلات حاکم در مکانیک سیالات اغلب حل تحلیلی معادلات مکانیک سیالات بسیار محدود است و با اعمال شرایط مرزی این محدودیت ها تنگ تر می شوند [۳۱].

## ۳-۳- نرم افزار Fluent

نرم افزار Fluent یکی از کامل ترین، قوی ترین و کاربردی ترین نرم افزارهای CFD در دنیا است. Fluent اوج هنر برنامه نویسی برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده می باشد. این نرم افزار امکان تغییر شبکه، به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه های غیر ساختار یافته برای هر هندسه ای بخصوص هندسه های پیچیده را فراهم می سازد. نوع مش های

قابل تولید و دریافت توسط این گروه نرم افزاری شامل شبکه‌هایی با المان‌های مثلثی، چهار ضلعی، چهار وجهی، شش وجهی و هرمی می‌باشند. همچنین Fluent به کاربر اجازه بهبود شبکه را می‌دهد.

این بهینه‌سازی برای حل و شبکه، قابلیت در اختیار کاربر قرار می‌دهد که نتایج را در نواحی دارای گرادیان بزرگ، دقیق‌تر سازد. این قابلیت‌ها مدت زمانی را که برای تولید یک شبکه خوب مورد نیاز است در مقایسه با حل در شبکه‌های ساختار یافته، به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

این برنامه با زبان C نوشته شده است و از تمام توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می‌برد. نتیجتاً این نرم افزار استفاده از حافظه دینامیک، ساختار مناسب داده‌ها و اطلاعات و کنترل انعطاف پذیری محاسبات را ممکن می‌سازد. به علاوه استفاده از ساختار Client / Server موجب اجرای کارآمد برنامه، کنترل سیستم و انعطاف پذیری کامل سیستم عامل می‌گردد.

تمامی توابعی که برای انجام محاسبات و نمایش نتایج لازم هستند از طریق منوهای برنامه بسادگی قابل دسترسی می‌باشند. صفحات کاربری برنامه، همگی با استفاده از زبان Scheme که یکی از شاخه‌های LISP است، برنامه نویسی شده‌اند. البته نرم افزار این قابلیت را در اختیار کاربران حرفه‌ای قرار می‌دهد که بتوانند صفحات کاربری را با تعریف تابع و ماکروهای جدید به دلخواه تنظیم نمایند.

### ۳-۴- مدل‌های فیزیکی موجود در Fluent

Fluent مدل‌های جامعی برای بازه بسیار وسیعی از مسائل، شامل جریان‌های قابل تراکم و غیر قابل تراکم، آرام و متلاطم ارائه می‌دهد. در Fluent، دامنه وسیعی از مدل‌های ریاضی برای پدیده‌های انتقال با قابلیت مدل کردن هندسه پیچیده، ترکیب شده است. دامنه‌ای از مسائل که مورد توجه قرار می‌گیرد بسیار وسیع است.

مثال‌هایی از کاربردهای Fluent شامل، مدل کردن جریان غیر نیوتنی آرام در مسائل پروسس، انتقال حرارت آشفته در توربو ماشین‌ها و اجزای موتور ماشین و آیرودینامیک جریان‌های قابل تراکم می‌باشد. همچنین قابلیت مدل کردن جریان سیال و وابسته بودن پدیده‌های انتقال در مسائل صنعتی و پروسس، توسط نرم افزار بصورت مفید ارائه شده است.

همچنین مجموعه مفیدی از مدل‌ها، نظیر مدل‌های فازی در Fluent وجود دارد. این مدل‌ها می‌تواند برای آنالیز کردن جریان‌های اسپری‌ها particle - laden در وسایلی مثل ورودی‌های موتور هواپیما و گردبادها به کار رود. همچنین می‌توان جهت پیشگویی خراب شدن جت، حرکت مایع پس از شکست سد، کاویتاسیون، رسوب گذاری و جدایش جریان از این نرم‌افزار بهره برد.

یکی از قابلیت های بسیار نیرومند Fluent، بکار گیری دقیق‌ترین تئوری‌های جریان آشفته می‌باشد. حالت‌های مختلفی از انتقال حرارت، شامل جابجایی آزاد، اجباری و ترکیبی و ... را می‌توان مدل کرد. استفاده از مدل‌های بسیار قوی برای شبیه‌سازی احتراق و محیط متخلخل، Fluent را به یکی از قوی‌ترین نرم افزارهای CFD تبدیل کرده است.

### ۳-۵- روابط حاکم بر میدان جریان

قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهات محورهای سه گانه مختصات که به معادلات ناویه - استوکس معروف هستند بیان می‌شوند [۳۲]. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و مومنتم به بیان ریاضی می‌باشند. بر اساس دیدگاه اولری، چنانچه جزء کوچکی از سیال به عنوان حجم کنترل ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود، در این صورت نیروهای وارده بر آن و اصل بقای جرم در این سلول به صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می‌شوند [۳۳]. در جریان تراکم ناپذیر قوانین فوق به صورت زیر بیان می‌شود [۳۴]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1-3)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} \quad (2-3)$$

در معادلات فوق،  $u_i$  و  $x_i$  به ترتیب سرعت و مختصات،  $t$  زمان،  $P$  فشار،  $\rho$  دانسیته و  $t_{ij}$  تنسور تنش‌های ناشی از ویسکوزیته است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$t_{ij} = 2 \mu S_{ij} \quad (3-3)$$

که در آن،  $\mu$  بیانگر ویسکوزیته دینامیکی و  $S_{ij}$  تنسور نرخ تغییر کرنش می‌باشند.

|                                                                                                             |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ | (4-3) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|

برای ساده کردن روند میانگین‌گیری زمانی، ترم انتقالی در معادله (3-5) به فرم بقایی زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) - u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) \quad (5-3)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2 \mu S_{ij}) \quad (6-3)$$

در بدست آوردن رابطه (3-6) از معادله بقای جرم در حذف ترم استفاده شده است. با ترکیب معادلات (1-3) با (3-2) معادله ناویه استوکس به فرم بقایی بدست می‌آید. با استفاده از میانگین‌گیری زمانی در مورد معادلات (1-3) و (3-6)، معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز به فرم بقای زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7-3)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j U_i + \overline{u'_j u'_i}) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2 \mu S_{ij}) \quad (8-3)$$

معادله بقای جرم در حالت اخیر همان معادله اولیه (معادله ۱-۳) است که سرعت متوسط جایگزین سرعت لحظه‌ای شده است. گذشته از جایگزینی سرعت متوسط بجای سرعت لحظه‌ای در معادلات اخیر، تنها تفاوت بین معادله اندازه حرکت در حالت میانگین گیری شده زمانی با معادله اندازه حرکت در حالت لحظه‌ای (معادله ۲-۳) ظاهر شدن ترم  $\overline{u'_j u'_i}$  است. این ترم بیان کننده نرخ متوسط زمان انتقال اندازه حرکت به دلیل اغتشاش است. بدین ترتیب ترم تولید کننده اغتشاش وارد معادلات حاکم بر جریان می‌شود. معادله (۸-۳) با استفاده از معادله (۳-۳) به شکل معکوس به فرم معمول آن که در بسیاری از مراجع به این فرم در نظر گرفته می‌شود. بازنویسی می‌شود:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2 \mu S_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \quad (9-3)$$

معادله (۹-۳) به نام معادله ناویر استوکس میانگین گیری شده رینولدز شناخته می‌شود. معادله (۸-۳) بقائی است در حالیکه معادله (۹-۳) غیر بقائی است. کمیت  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  همان تنسور تنش-های رینولدز است که با  $\rho \tau_{ij}$  نشان داده می‌شود.  $\tau_{ij}$  تنسور تنش‌های رینولدز است.

$$\tau_{ij} = - \overline{u'_i u'_j} \quad (10-3)$$

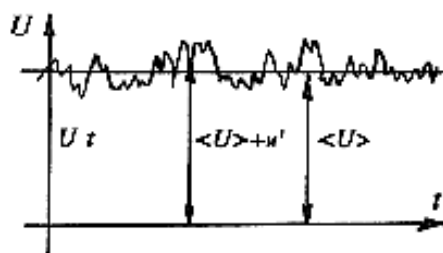
ترم فوق به تنش رینولدز معروف بوده که در سیستم معادلات سه بعدی، باعث افزودن ۶ مجهول دیگر به معادلات می‌شود. جهت بستن دستگاه معادلات حاکم و به عبارت بهتر برقراری ارتباط بین تنش‌های رینولدز و مولفه‌های سرعت متوسط جریان، از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌-

شود.

### ۳-۶-مدل‌های آشفتگی

در واقعیت اغلب جریان‌های با اهمیت مهندسی بصورت جریان آشفته هستند و نیازمند معادلات با انطباق بیشتری هستند.

مدلهای آشفتگی در معادله‌ای، قابلیت خوبی در شبیه‌سازی دقیق جریان‌های آشفته دارند و از کاربردی‌ترین مدل‌ها، می‌توان مدل  $k-\epsilon$  را نام برد که در این کار پژوهشی نیز از این مدل استفاده شده است. جریان آشفته را می‌توان جمع آثار یک جریان نوسانی نامنظم با یک جریان منظم در نظر گرفت. شکل ۱-۳ تغییرات سرعت در جریانات آشفته را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ منحنی سرعت در جریان آشفته [۳۸]

انتخاب مدل آشفته (توربولانت) به ملاحظات فیزیکی جریان، تجربیات حاصله از شبیه‌سازی برای مسائل خاص، میزان دقت مورد نیاز، قدرت محاسباتی (قدرت کامپیوتر) و زمان موجود برای انجام محاسبات وابسته می‌باشد. مدل مغشوشی که بتواند برای تمام حالات و مسائل مختلف بکار رود متأسفانه وجود ندارد [۳۳].

با توجه به تجربیات، تحقیقات گذشته، قدرتمندی، اقتصادی بودن محاسبات و داشتن دقت قابل قبول مدل اغتشاش مورد استفاده در این تحقیق مدل  $k-\epsilon$  استاندارد است. مدل  $k-\epsilon$  استاندارد یکی از مدل‌های دو معادله‌ای نسبتاً کامل است، چون حل دو معادله انتقال به صورت جداگانه

باعث می‌شود که سرعت اغتشاش و طول مشخصه به صورت مجزا تعیین شود. مدل  $k-\epsilon$  استاندارد یکی از قدرتمندترین مدل‌های مغشوش برای مسائل مهندسی محسوب می‌شود. این مدل یک مدل نیمه تجربی است و معادلات آن بر اساس مشاهدات تجربی و ملاحظات پدیده شناسی بوجود آمده‌اند.

### ۳-۷- معادلات پروفیل سطح آزاد

در این پژوهش جریان سطح آزاد جریان چندفازی است که در آن فازها با یک سطح مشخص از یک دیگر مجزا شده‌اند.

در CFD سه دیدگاه اصلی برای مدل سازی جریان‌های چند فازی به شرح زیر موجود است [۳۳]:

- حجم سیال (Volume of Fluid) VOF، استفاده از دیدگاه اولرین (Eularian) برای هر دو فاز و با در نظر گرفتن فصل مشترک فازها (معمولاً این دیدگاه زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که در جریان دو فاز در نظر داشته باشیم).

- اولرین-لانگراژین (Eulerian - Lagrangian)، استفاده از دیدگاه اولرین برای فاز پیوسته و استفاده از دیدگاه لانگراژین برای فاز پراکنده

- اولرین-اولرین (Eulerian - Eulerian)، استفاده از دیدگاه اولرین برای همه فازها بدون در نظر گرفتن فصل مشترک فازها (معمولاً این دیدگاه زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که در جریان چندین فاز در نظر گرفته باشیم).

در Fluent برای مدلسازی جریان چند فازی در پانل Multiphase Model، ۵ نمونه برای مدلسازی وجود دارد:

- Off: برای میدان جریان تک فازی باید از این نمونه استفاده کرد.

- VOF (Volume of Fluid): در این حالت حل، در میدان جریان با شبکه ثابت، سطح آزاد

جریان بر اساس دیدگاه اولرین مشخص می‌شود. در روش VOF برای هر جزء سلول یک معادله دیفرانسیلی حل می‌شود که نهایتاً مقدار جزء حجم سیال در هر سلول معین می‌گردد، که در این روش‌ها مشخص می‌شود که این سلول از کدام فاز سلول می‌باشد یا به چه درصدهایی از این دو فاز تشکیل شده است.

در تعیین سطح آزاد به روش VOF از یک تابع متغیر به نام  $F$  استفاده می‌شود که جزء حجم سیال (VOF) نامیده می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (3-11)$$

ترکیب سیال به صورت ترم‌های یک تابع حجم سیال و  $F(x, y, z, t)$  این تابع بیانگر حجم سیال بر واحد حجم می‌باشد و به صورت زیر است [۳۹]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) + \xi \frac{FA_x u}{X} \right] = FDIF + FSOR \quad (3-12)$$

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( FA_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( FA_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( FA_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \xi \frac{FA_x u}{X} \right] \quad (3-13)$$

ضرایب نفوذ به صورت  $V_f = CF \cdot \mu / \rho$  که  $CF$  یک ثابت است که عکس آن گاهی اوقات مربوط به عدد اشمیت آشفته می‌شود، تعریف می‌گردد. این ترم نفوذ تنها یک دید برای اختلاط آشفته دو سیال که توزیع آن با تابع  $F$  بیان می‌شود، ایجاد می‌نماید. ترم  $FSOR$  مربوط به دانسیته  $PSOR$  در معادله پیوستگی جرم است و برابر سرعت زمانی تغییرات تابع حجم یک سیال است که همراه با منبع جرم می‌باشد. بیان  $F$  وابسته به نوع مساله‌ای است که مدل می‌شود.

برای یک سیال،  $F$  بیانگر کسر حجمی اشغال شده با سیال است. بنابراین جاهایی که  $F=1$  است سیال و جاهایی که  $F=0$  است حباب و حفره وجود دارد. نواحی حبابی و خالی ناحیه‌های هستند که در آن‌ها جرم سیال وجود ندارد و یک فشار یکنواخت در آن‌ها حاکم است.

Mixture: در این نوع مدل اختلاط چند فاز، فازهایی که تعریف می‌کنیم با هم ادغام می‌شوند این نوع اختلاط بیشتر برای شبیه‌سازی حضور بخار در ناحیه جدایی در جریان متوسط زمانی برای محاسبه حالت پایدار استفاده می‌شود برای شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای سیکل نامنظم، تشکیل حباب‌ها، رشد و پر شدن دوباره ورودی جت توسط آب‌ها نیازمند محاسبات ناپایدار و همگرایی جواب محاسبات است. از اینرو از این مدل اختلاط در این محاسبات کمتر استفاده می‌گردد.

Eulerian: در این مدل اختلاط یک حجم کنترل اختیاری با مختصات ثابت در سیال فرض می‌شود که با موازنه نیرو و جرم در آن، معادلات اساسی جریان به دست می‌آیند. لازم به گفتن است که در این پایان‌نامه مدل جریان چندفازی مورد استفاده VOF می‌باشد.

### ۳-۸- صحت‌سنجی

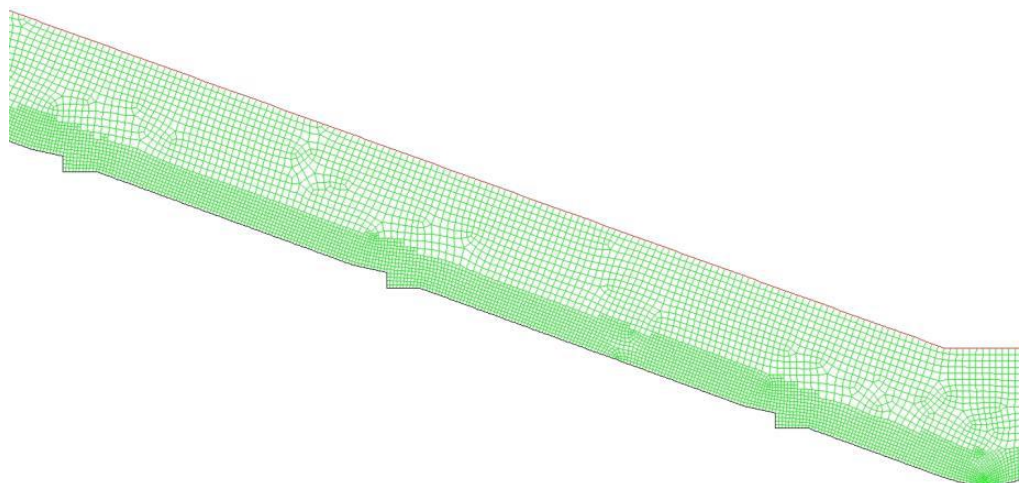
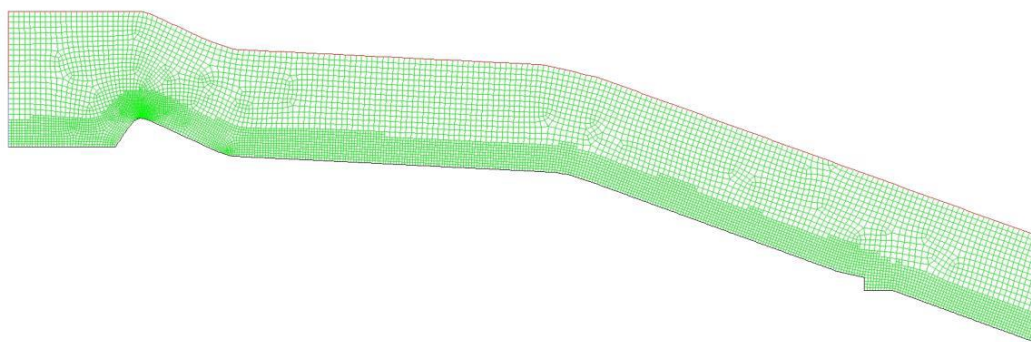
به منظور بررسی صحت عملکرد نرم افزار مورد استفاده و نتایج آن، مدل آزمایشگاهی سرریز سد مخزنی آزاد که در موسسه تحقیقات آب اجرا شده است، استفاده شد [۳۵].

#### ❖ شرح مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد بررسی مدل هیدرولیکی سرریز سد مخزنی آزاد در شهرستان مریوان می‌باشد که در موسسه تحقیقات آب اجرا شده است. این مدل با مقیاس ۱:۳۳,۳ ساخته شده است. کانال ورودی این سرریز به طول ۹۰ متر در راستای سرریز می‌باشد که ۲۰ متر انتهایی آن در مدل سازی عددی لحاظ شده است. طول اصلی در نظر گرفته شده برای این مدلسازی ۳۰۸,۹۹ متر (که این عدد ۲۰ متر انتهایی کانال تقرب را نیز شامل می‌شود) می‌باشد. این تندآب دارای شیب ابتدای ۵٪ و شیب اصلی ۳۶,۴٪ می‌باشد.

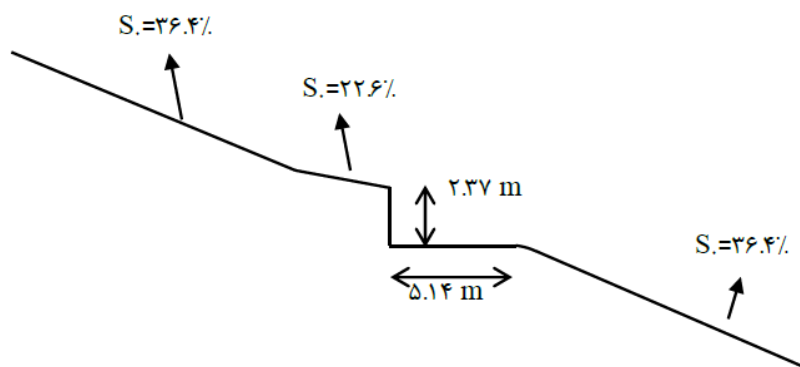


شکل ۲-۳ نمایی از ابتدای سرریز

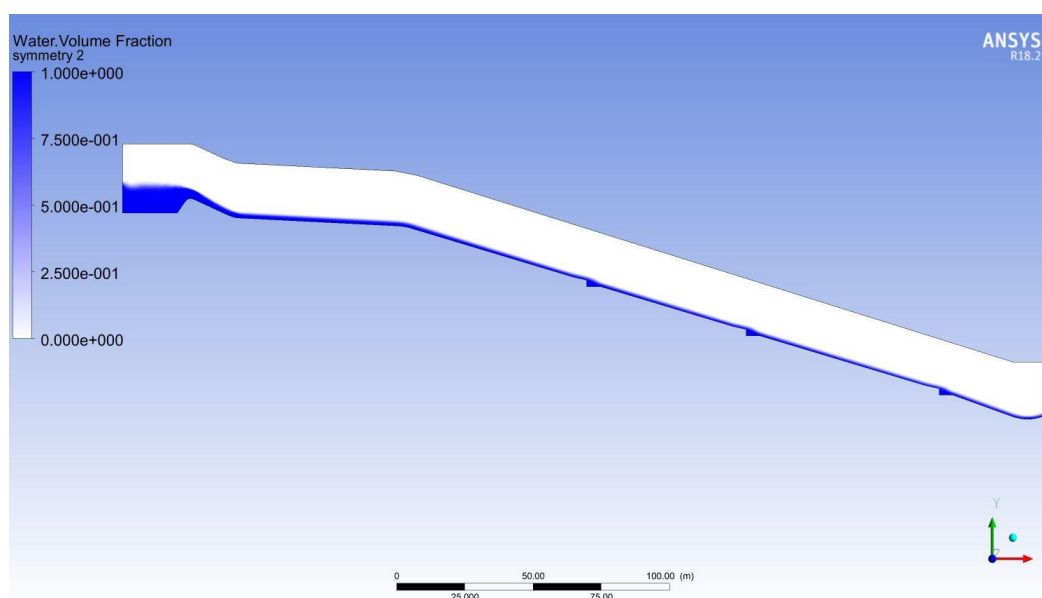


شکل ۳-۳ نمایی از شوت سرریز مدل سازی شده با شیب بستر ۳۶,۴٪

در این تنداب سه هواده در فواصل ۱۶۰، ۲۱۰ و ۲۷۰ متری از ابتدای سرریز به مشخصات زیر (شکل ۴-۳) قرار دارد.



شکل ۳-۴ مشخصات هندسی هواده‌ها

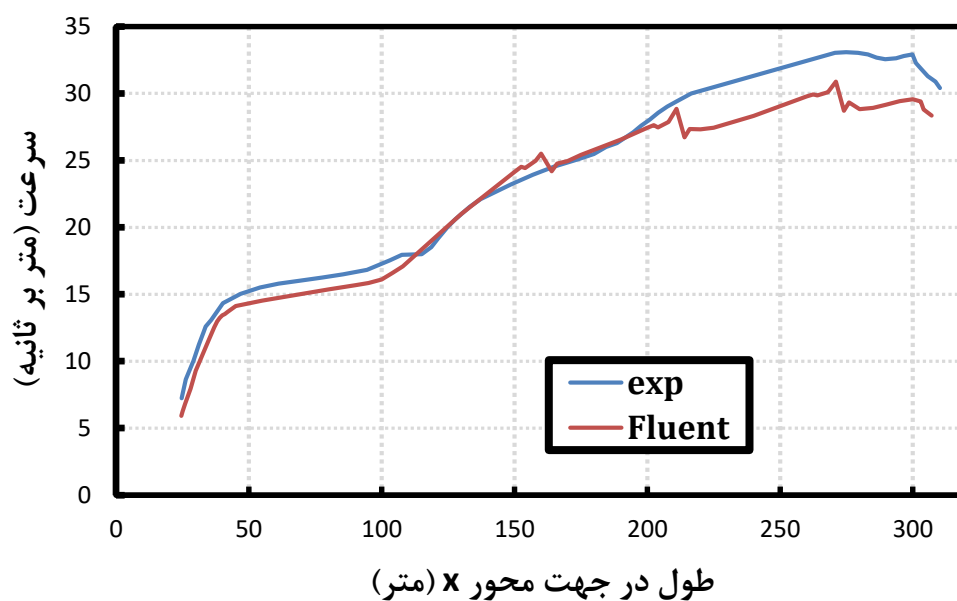


شکل ۳-۵ نمایی از حجم آب روی سرریز

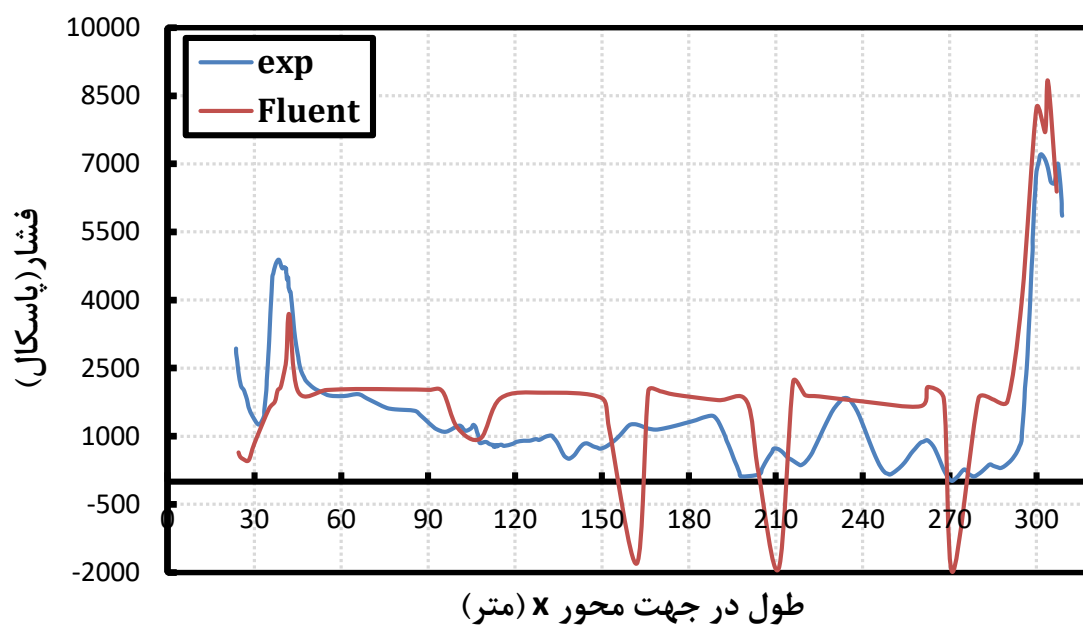
### ❖ نتایج حاصل از مدل سازی با نرم افزار Fluent 18.2

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، نتایج به دست آمده در نرم افزار Fluent 18.2 را با نتایج آزمایشگاهی آورده شده در پژوهش ایشان مقایسه می‌نماییم.

مقادیر سرعت، فشار (فشار اندازه گیری شده مربوط به کف کانال می باشد) و سطح آب به منظور مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های ۳-۶ الی ۳-۱۰ آورده شده است.

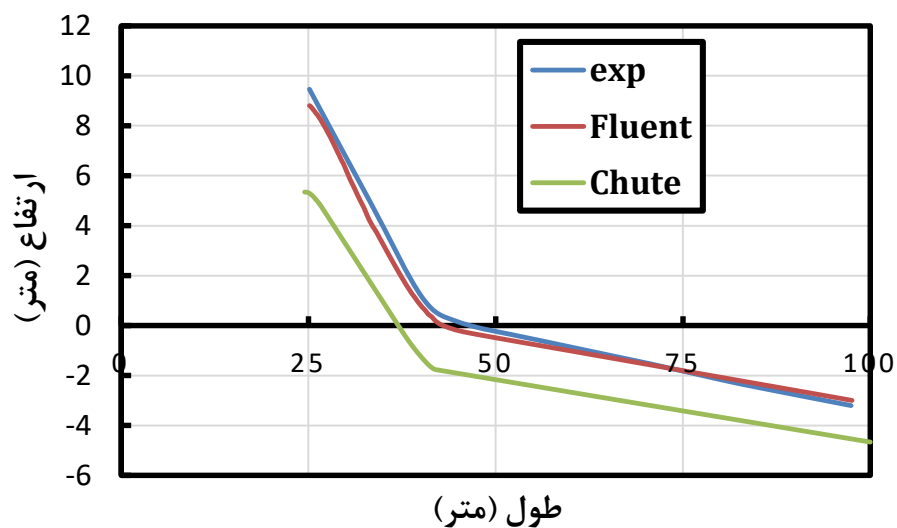


شکل ۶-۳ مقایسه مقادیر سرعت بدست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی

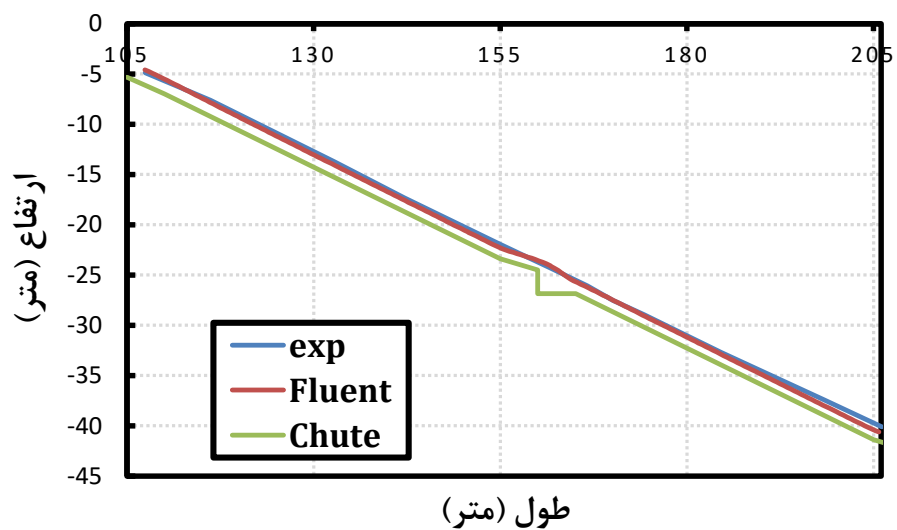


شکل ۷-۳ مقایسه مقادیر فشار بدست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی

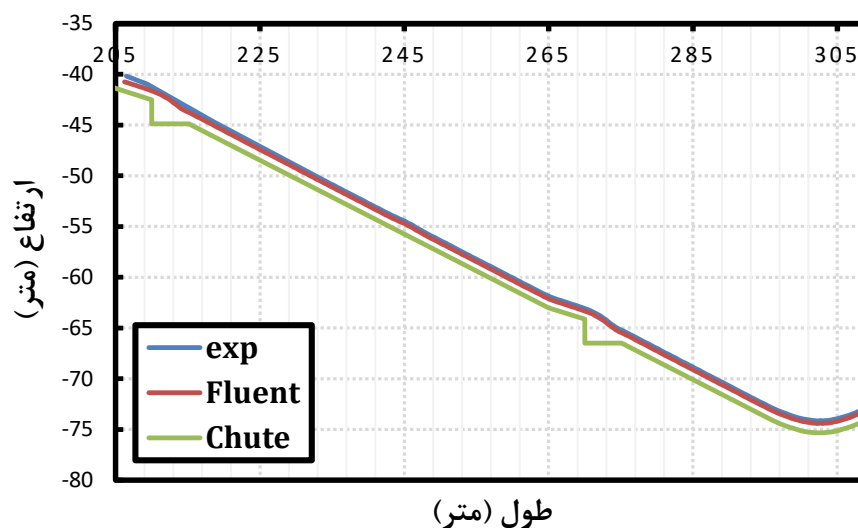
به منظور نمایش واضح تر اختلاف مدل آزمایشگاهی با مدل عددی طول سرریز و تنداب به سه قسمت ابتدا، میانه و انتها تقسیم شده است.



شکل ۳-۸ مقایسه مقادیر سطح آب بدست آمده از مدلسازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی (۱۰۰ متر ابتدای سرریز)



شکل ۳-۹ مقایسه مقادیر سطح آب بدست آمده از مدلسازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی (۱۰۰ متر میانی سرریز)



شکل ۳-۱۰ مقایسه مقادیر سطح آب بدست آمده از مدلسازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی (۱۰۰ متر انتهایی سرریز)

با بررسی شکل های بالا می توان این طور نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل سازی عددی مطابقت مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی دارند.

در این فصل به معرفی معادلات حاکم و معادلات جریان آشفته و روش های حل آنها پرداخته شد. در انتها پاسخ های بدست آمده از مدلسازی با روش عددی پیشنهادی را با روش های دیگر مقایسه نمودیم. هدف ارزیابی اثرات شیب بستر تنداب و ارتفاع زبری برای بررسی رخداد کاویتاسیون در مسیر سرریز است. به همین منظور در فصل بعد علاوه بر شیب اصلی سرریز، گزارش مدلسازی با شیب های ۲۶٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ و به ازای ارتفاع زبری های مختلف  $1.5 \times 10^{-4}$  متر (بتن صاف)،  $4 \times 10^{-4}$  متر (بتن معمولی) و  $1.5 \times 10^{-3}$  متر (بتن زبر) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## فصل چهارم: مدلسازی جریان و نتایج

### شبیه‌سازی‌های عددی

## ۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا مسئله مورد بررسی شرح داده خواهد شد سپس به توصیف مدلسازی عددی سرریز موردنظر در نرم افزار قدرتمند Fluent 18.2 پرداخته خواهد شد. پس از آن نتایج حاصل از شبیه سازی عددی آورده شده است.

## ۴-۲- مراحل تحلیل مسئله در نرم افزار Fluent

برای حل یک مسئله در Fluent به ترتیب مراحل زیر انجام می گردد:

### ۱- تبیین هدف شبیه سازی و بهره برداری از نتایج

در این پژوهش هدف ما تحلیل و بررسی کاویتاسیون در میدان جریان است. در این گام با در اختیار داشتن اطلاعات کافی، باید کمیت ها و پارامترهای مدل فیزیکی و مرزهای جسم کنترل مشخص شوند.

### ۲- ساختن هندسه و شبکه مورد نیاز مسئله

در این مرحله باید میدان جریان مورد مطالعه را در یکی از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی ایجاد نمود. برای رسم هندسه مسئله در برخی کدهای CFD بهتر است هندسه و شبکه اولیه خارج از نرم افزار و با استفاده از نرم افزارهای مکمل تولید شود. به عنوان مثال این تحقیق که با کد نرم افزار Fluent شبیه سازی شده برای ایجاد هندسه مسئله از نرم افزار Gambit استفاده شده است. روش حل Fluent روش حجم محدود است لذا از مشهای بی ساختار استفاده شد. کیفیت شبکه، نقش عمده ای در دقت و پایداری محاسبات عددی ایفا می کند. در صورتی که مینیمم حجم شبکه منفی باشد، باید اصلاح شود. حجم منفی به این معناست که یک یا چند سلول

به صورت نامناسب به یکدیگر متصل شده اند. چگونگی توزیع نقاط گره‌ها، همواری و مورب بودن شبکه مواردی هستند که در کیفیت شبکه نقش دارند. در Fluent با کمک قابلیت تطبیق (Adapt) می‌توان همواری شبکه را با ریزتر کردن شبکه بر پایه تغییرات حجمی یا گرادیان سلول-ها بهبود داد.

فاکتورهای مهم برای ایجاد شبکه یک میدان جریان که در نظر گرفته شده است، عبارتند از:

- پیچیدگی هندسه مسئله

- منطبق یا غیر منطبق بودن شبکه بر هندسه مسئله

۳- انتخاب حل کننده و مدل فیزیکی مناسب

همانطور که در فصل سوم بیان شده نرم افزار Fluent با استفاده از معادلات پیوستگی و ناویر استوکس بر پایه روش حجم محدود قادر به مدل کردن جریان سیالات می‌باشد. اما برای تحلیل جریان سیالات با این نرم افزار، لازم است که روش‌ها و معادلات مناسب جهت حل مسئله معرفی گردند. ازین رو برای قسمت‌های مختلف، نوع معادلات و استراتژی حل به صورت زیر انتخاب گردید:

- با توجه به ماهیت جریان عبوری از روی یک سرریز، نوع جریان غیر دائمی انتخاب شد.

- به علت اهمیت بالای جریان هوای روی سطح آزاد آب و بخار آب داخل آب، همچنین با

عنایت به این موضوع که روش حجم سیال (VOF) در مدلسازی عددی مناسب خواهد بود که

تعیین سطح مشترک بین دو سیال (در اینجا سطح مشترک آب - هوا) مد نظر باشد، در پانل

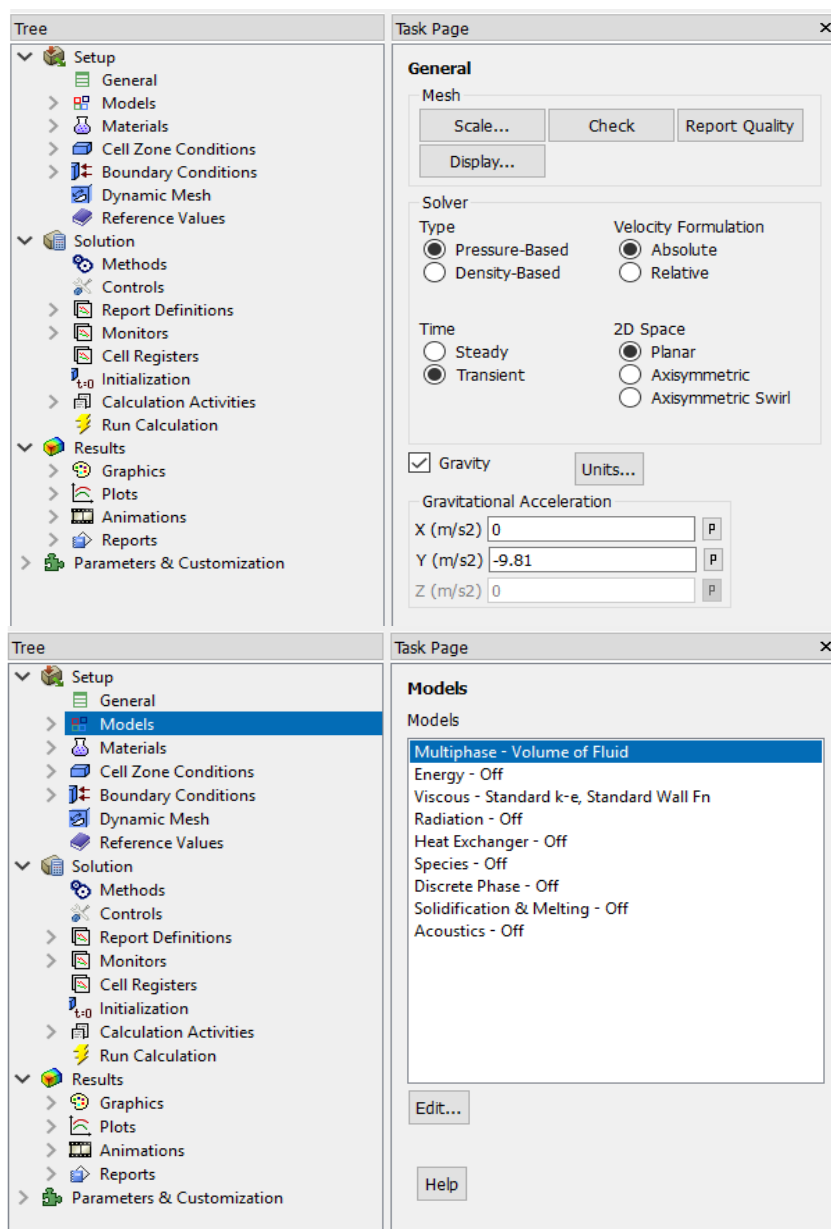
Multiphase Model، روش حجم سیال (Volume of Fluid) انتخاب گردید.

- در این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های آشفته، به صورت پیش فرض چند مدل

آشفتگی وجود دارد. تجربه نشان داده که مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  استاندارد برای مدل کردن این

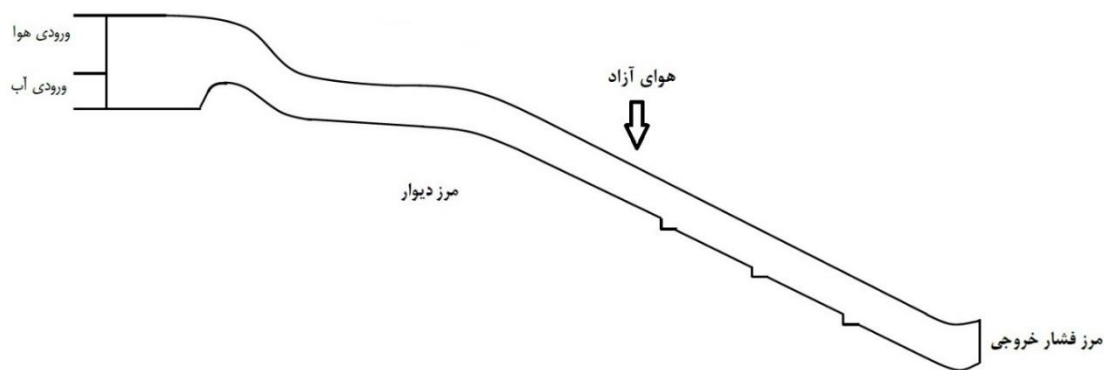
سرریز مناسب است [۳۳]. به همین دلیل در پانل Viscous Model، مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  استاندارد

انتخاب شد.



شکل ۴-۱ نمایی از تنظیمات انجام شده در نرم افزار Fluent

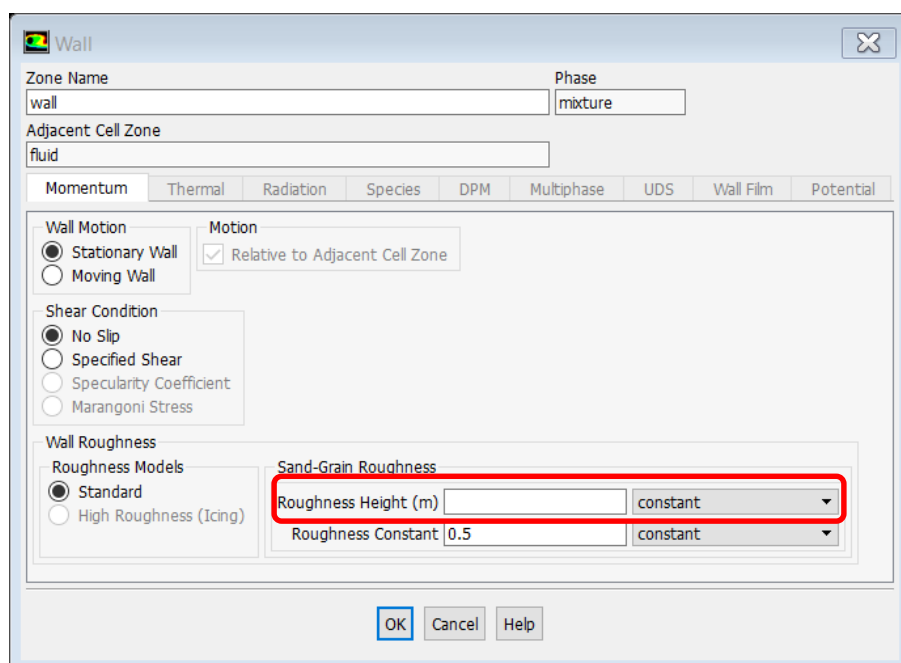
- تعیین شرایط مرزی: تعیین و تنظیم شرایط مرزی یکی از اساسی ترین مراحل در کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. شرایط مرزی با توجه به فیزیک مسئله انتخاب می شوند. تعریف شرایط مرزی در این مدل، با توجه به ماهیت مسئله در شکل ۴-۲ آورده شده است.



شکل ۲-۴ شرایط مرزی حل

- تعیین شرایط اولیه: با توجه به دبی‌های ورودی در نظر گرفته شده، دبی ۸۰۰ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است؛ که در این شرایط سرعت متوسط در کانال ورودی ۲,۲ متر بر ثانیه و ارتفاع آب ۱۱ متر است. این اطلاعات به عنوان شرایط اولیه به نرم افزار معرفی شد.

برای تعیین ارتفاع زبری بستر سرریز همانطور که در شکل زیر مشخص شده است، در نرم افزار Fluent عدد ارتفاع زبری مورد نظر را وارد می نماییم.



شکل ۳-۴ تنظیمات مربوط به شرایط مرزی دیوار

۴- انجام محاسبات و تحلیل میدان جریان و دست یابی به نتایج حل

گام مهم برای حل مسائل Fluent تحلیل معادلات بقاء (پیوستگی، مومنتم و انرژی) است که در هر تکرار برای رسیدن ها همگرایی و حصول حل مسئله لازم است این معادلات چندین بار بصورت پی در پی با روش های عددی حل شود [۳۳].

در Fluent زمانی به هم گرایی می رسیم که تغییرات مقادیر متغیرهای هیدرولیکی به دست آمده از حل، از یک تکرار تا تکرار بعدی قابل صرف نظر کردن باشد. دقت همگرایی را نیز با تعیین و نمایش، باقی مانده های حل عددی می توان مشخص نمود.

## ۴-۳-ارائه نتایج

مدل‌های مورد بررسی عبارتند از:

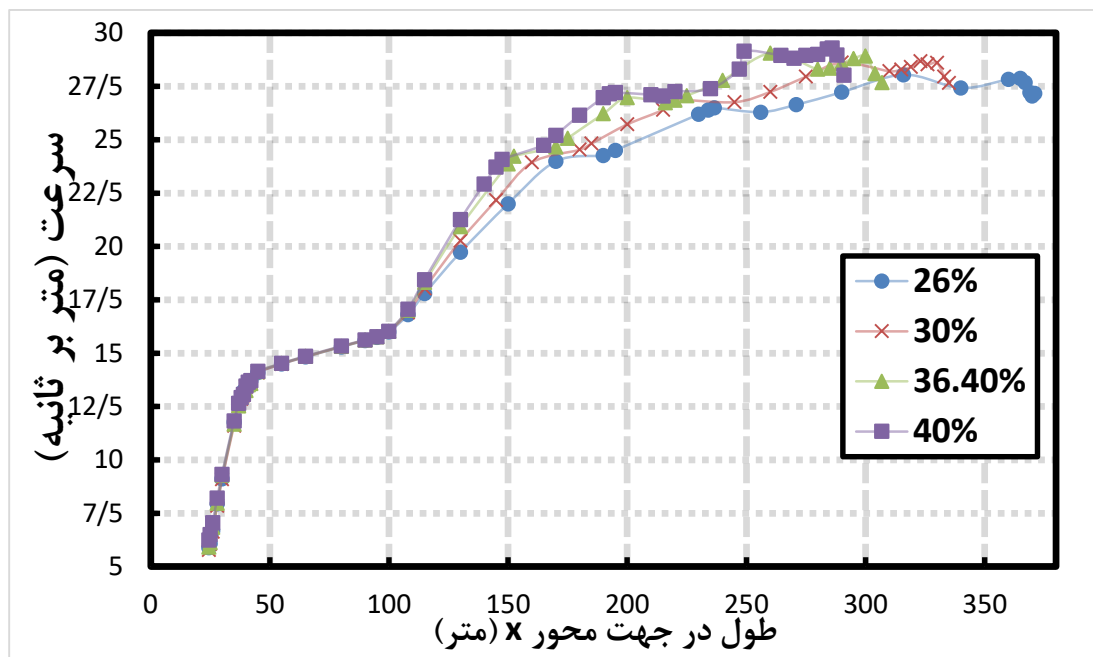
مدل اصلی که برای صحت سنجی نیز مورد بررسی قرار گرفت مدل با شیب بستر ۳۶,۴٪ است. برای بررسی اثر شیب بستر بر رخداد کاویتاسیون مدل‌های سرریز با شیب بستر ۲۶٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ نیز مدل سازی شد و مورد بررسی قرار خواهیم داد. طول سرریز با احتساب ۲۰ متر کانال تقرب و محل قرارگیری هواده‌ها برای هر مدل در جداول زیر آورده شده است.

جدول ۴-۱ مشخصات هندسی مدل‌ها

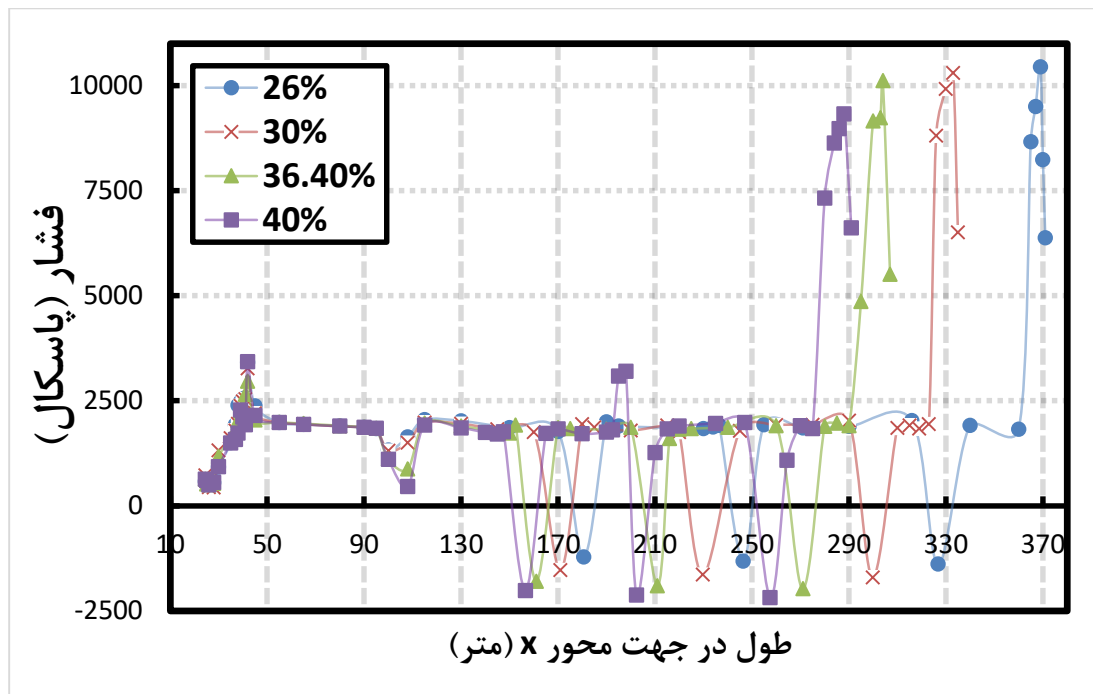
| مدل با شیب بستر              | ۲۶٪   | ۳۰٪    | ۳۶,۴٪ | ۴۰٪   |
|------------------------------|-------|--------|-------|-------|
| طول سرریز(متر)               | ۳۷۲,۲ | ۳۲۶,۱۵ | ۳۰۸,۹ | ۲۹۴,۵ |
| محل قرار گیری هواده اول(متر) | ۱۷۹,۴ | ۱۷۰    | ۱۶۰   | ۱۵۵,۸ |
| محل قرار گیری هواده دوم(متر) | ۲۴۵,۸ | ۲۲۸,۵  | ۲۱۰   | ۲۰۱,۷ |
| محل قرار گیری هواده سوم(متر) | ۳۲۶,۲ | ۲۹۹,۱۵ | ۲۷۰   | ۲۵۶,۸ |

## ۴-۳-۱- تاثیر شیب بستر بر سرعت و فشار در مسیر سرریز

در شکل‌های (۴-۴) و (۴-۵) به ترتیب نمودار مقادیر سرعت و فشار برای مدل‌های ۲۶٪، ۳۰٪، ۳۶,۴٪ و ۴۰٪ نشان داده شده است. قابل ذکر است که مقادیر فشار اندازه گیری شده مربوط به کف کانال و از لحاظ عرضی در وسط کانال می باشد. در نمودارها محور افقی نمایانگر فاصله از ابتدای سرریز می باشد (با احتساب ۲۰ متر کانال تقرب).



شکل ۴-۴ مقادیر سرعت برای مدل‌های مورد بررسی با اثر ارتفاع زبری ثابت

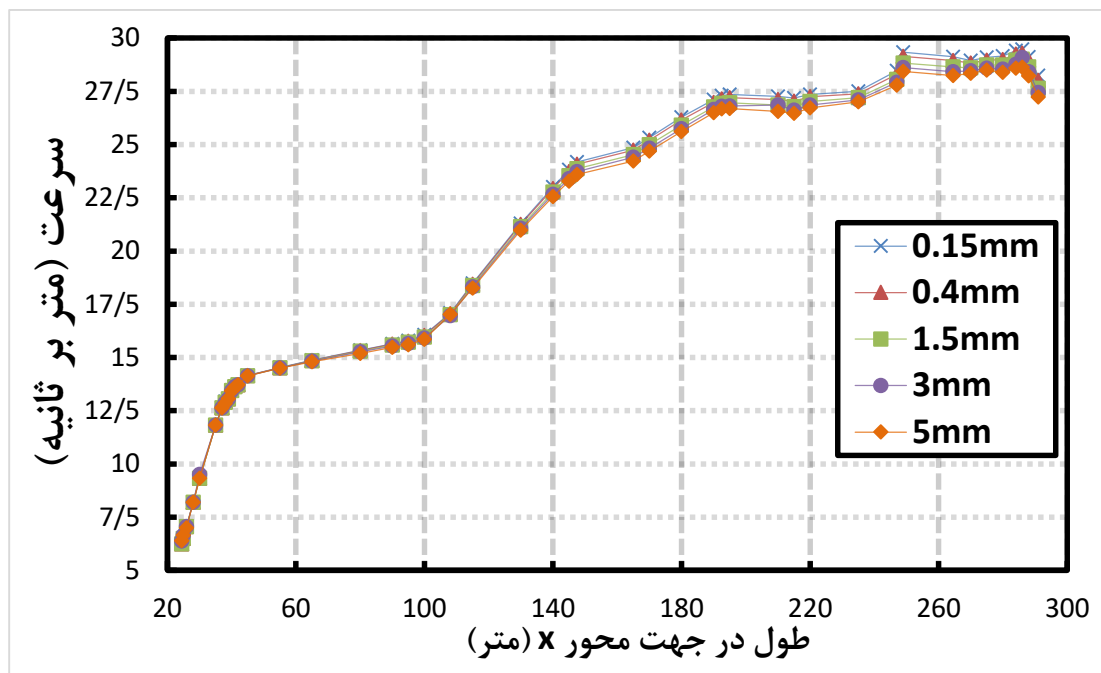


شکل ۴-۵ مقادیر فشار برای مدل‌های مورد بررسی با اثر ارتفاع زبری ثابت

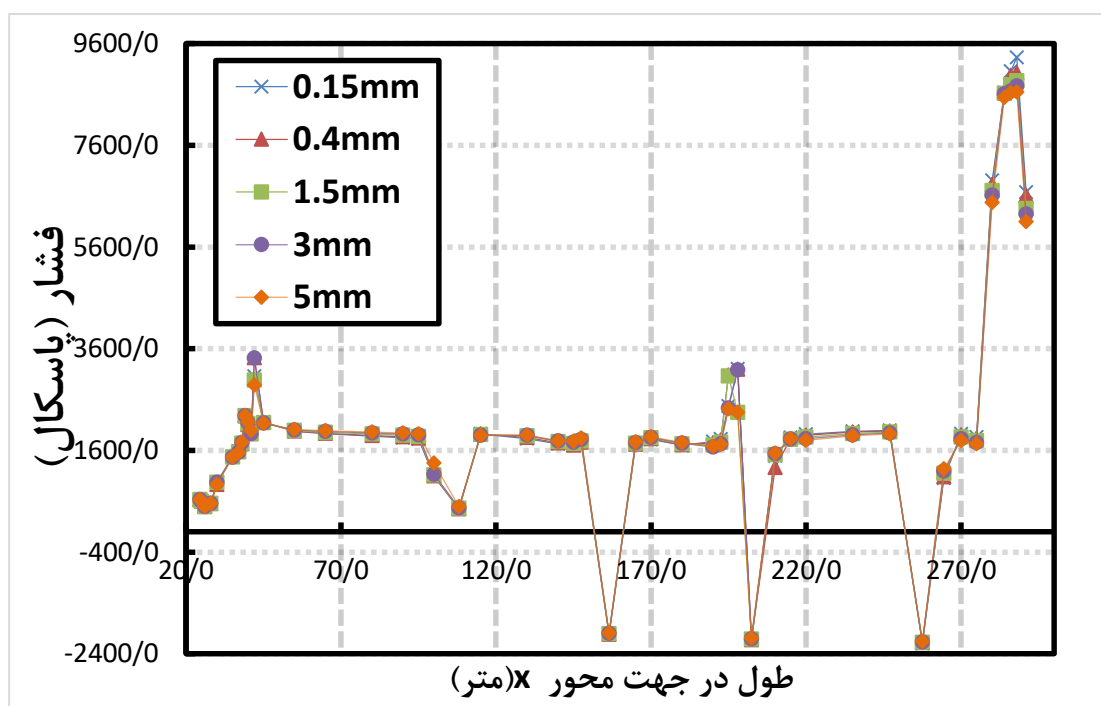
با مشاهده نمودارهای فوق می‌توان دریافت که سرعت حداکثر در مدل با شیب بیشتر افزایش یافته است که این خود امری مهم و تاثیرگذار در وقوع کاویتاسیون است. همچنین مشخص است هرچه شیب بستر بیشتر شود، میزان فشار حداکثر کاهش می‌یابد. از طرفی هر دو نمودار سرعت و فشار (به ترتیب شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵) نمایانگر این موضوع هستند که با افزایش شیب بستر نوسانات سرعت و اختلاف فشار نیز افزایش می‌یابند؛ که این موضوع، امری مهم در رخداد کاویتاسیون می‌باشد.

#### ۴-۳-۲- تاثیر ارتفاع زبری کف سرریز بر سرعت و فشار در مسیر سرریز

در این قسمت به دلیل بیشتر مشهود بودن اثر زبری بر مدل با شیب ۴۰٪ نسبت به مابقی مدل‌ها این مدل برای بررسی اثر زبری انتخاب گردید. در شکل (۴-۵) نمودار مقادیر سرعت برای مدل با شیب بستر ۴۰٪ با ارتفاع زبری های مختلف ۰,۱۵ ، ۰,۴ ، ۱,۵ ، ۳ و ۵ میلی متر متر آورده شده است. همچنین در شکل (۴-۶) نمودار مقادیر فشار برای مدل با شیب بستر ۴۰٪ با ارتفاع زبری‌های مختلف رسم شده است.



شکل ۴-۶ مقادیر سرعت در مدل با شیب بستر ۴۰٪ با اثر ارتفاع زبری‌های مختلف



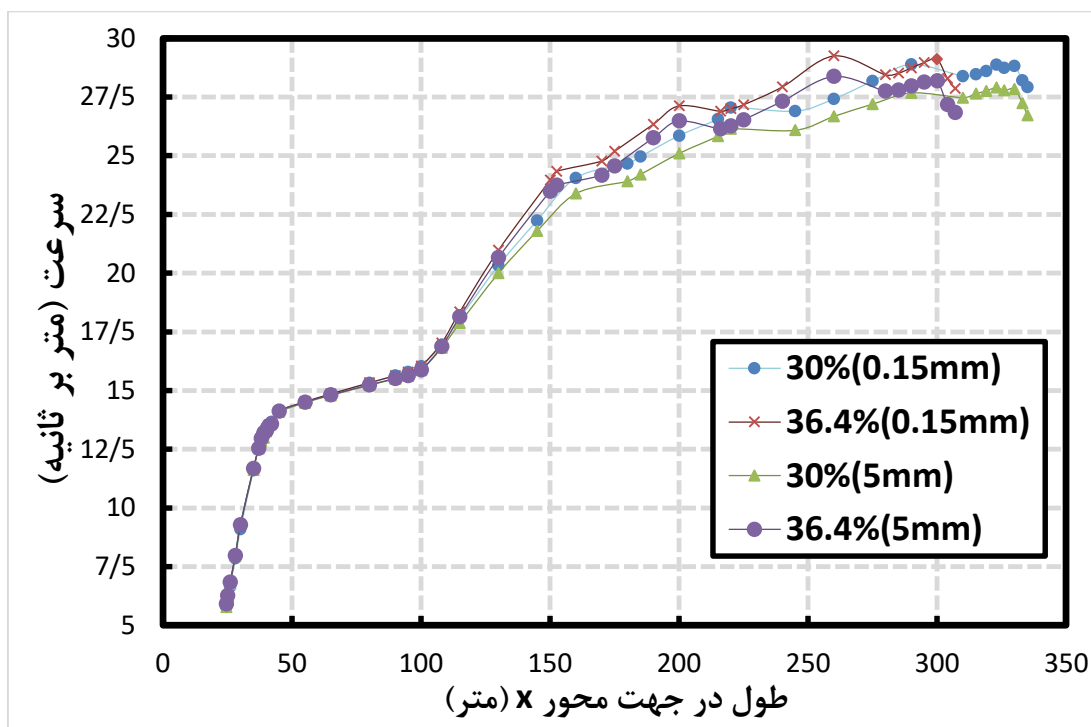
شکل ۴-۷ مقادیر فشار در مدل با شیب بستر ۴۰٪ با اثر ارتفاع زبری‌های مختلف

با توجه به شکل های فوق می توان این طور برداشت کرد که با افزایش ارتفاع زبری میزان سرعت حداکثر و فشار حداکثر کاهش می یابد.

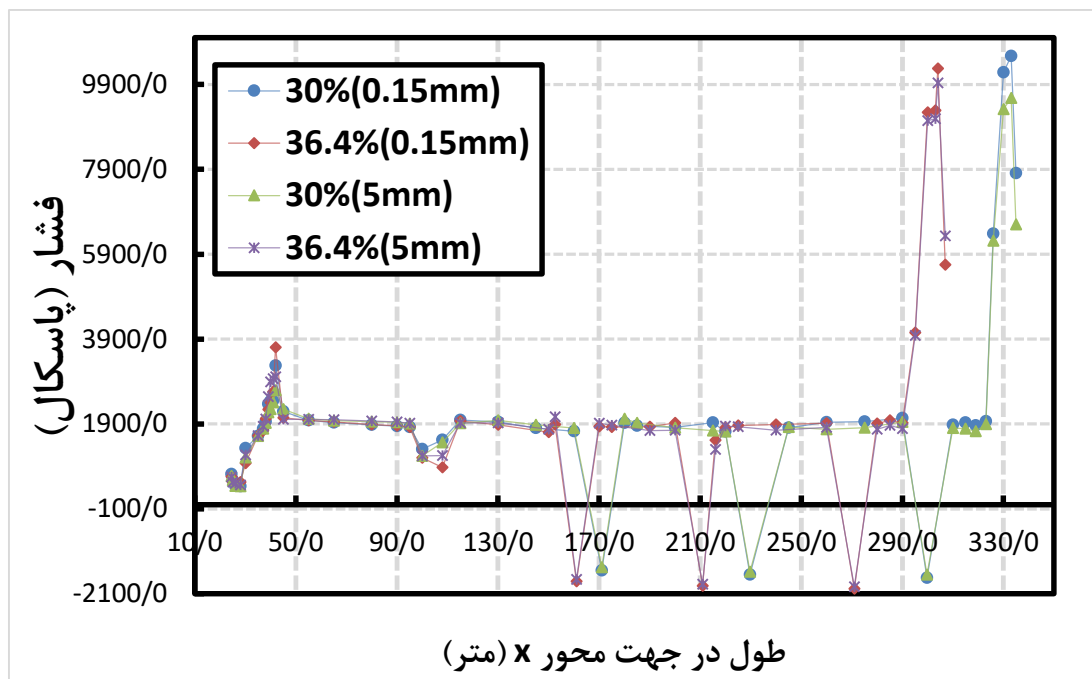
اگر دوباره به قسمت قبل که تاثیر شیب بستر بررسی شد، دقت کنیم متوجه می شویم که تاثیر شیب بستر قابل ملاحظه تر از تاثیر ارتفاع زبری بر سرعت و فشار است.

#### ۳-۳-۴- بررسی همزمان اثر ارتفاع زبری و شیب بستر بر سرعت و فشار در مسیر سرریز

در این قسمت در شکل (۸-۴) نمودار مقادیر سرعت و در شکل (۹-۴) نمودار مقادیر فشار برای مدل های سرریز مورد مطالعه با شیب بستر ۳۰٪ و ۳۶٫۴٪ و به ازای ارتفاع زبری های مختلف (بتن زیر با ارتفاع زبری ۵ میلی متر و بتن صاف با ارتفاع زبری ۰٫۱۵ میلی متر) ارائه شده است.



شکل ۸-۴ مقادیر سرعت برای مدل های با شیب بستر ۳۰٪ و ۳۶٫۴٪ با ارتفاع زبری های مختلف



شکل ۴-۹ مقادیر فشار برای مدل‌های با شیب بستر ۳۰٪ و ۳۶٫۴٪ با ارتفاع زبری‌های مختلف

برداشت‌های دو قسمت قبل در نمودارهای فوق نیز مشهود است.

طبق شکل (۴-۸) مدل با شیب بستر ۳۶٫۴٪ و بتن صاف با ارتفاع زبری ۱٫۵ میلی متر سرعت نسبی بیشتر و مدل با شیب بستر ۳۰٪ و بتن زبر با ارتفاع زبری ۵ میلی متر سرعت نسبی کمتری را تجربه می‌کند.

طبق شکل (۴-۹) می‌توان دریافت که اختلاف فشار در مدل‌های (۴-۱۰e و ۳-۱۰e متر) با شیب بستر ۳۶٫۴٪ بیشتر از اختلاف فشار در مدل‌های (۵ و ۰٫۱۵ میلی متر) با شیب بستر ۳۰٪ می‌باشد. در یک نقطه مشخص (قسمت انته‌ای شوت) مدل با شیب بستر ۳۶٫۴٪ و بتن زبر با ارتفاع زبری ۵ میلی متر فشار کمتر و با شیب بستر ۳۰٪ و بتن صاف با ارتفاع زبری ۰٫۱۵ میلی متر فشار بیشتری را دارا می‌باشد.

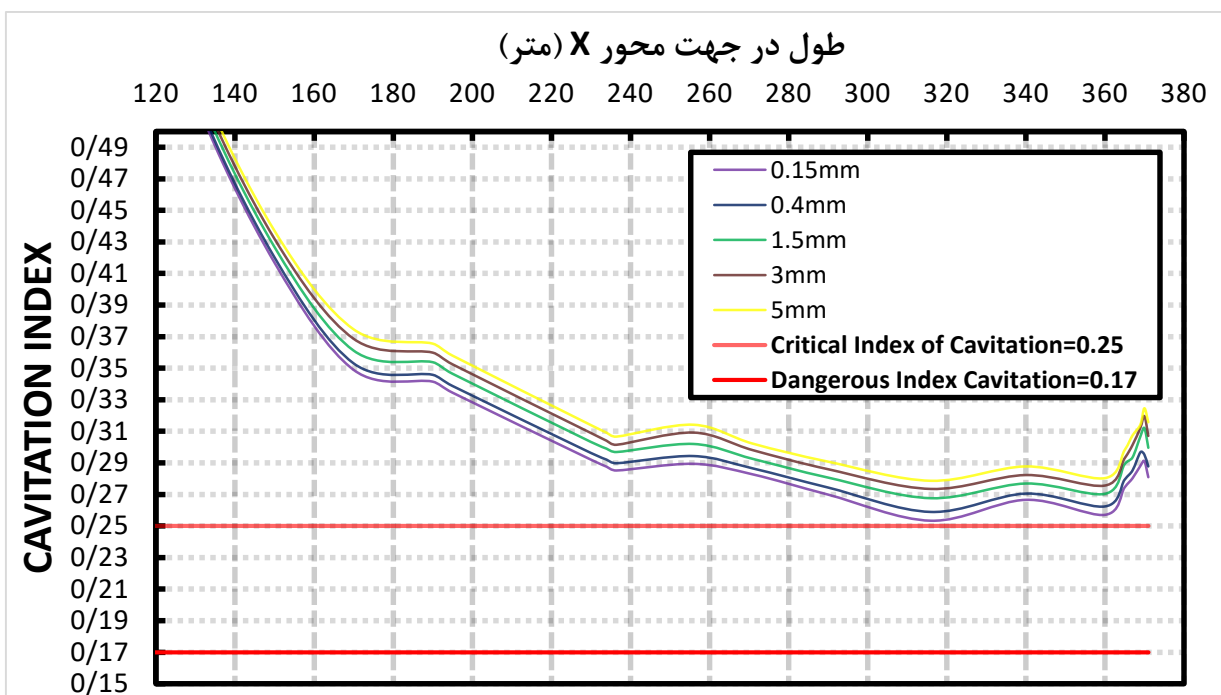
#### ۴-۳-۴- بررسی شاخص کاویتاسیون با در نظر گرفتن ارتفاع زبری کف و شیب بستر سرریز تنداب

در این قسمت و در شکل‌های ۴-۱۰ الی ۴-۱۳ نمودار تغییر شاخص کاویتاسیون برای مدل‌های با شیب بستر ۰/۲۶، ۰/۳۶، ۰/۳۰ و ۰/۴۰ و به ازای ارتفاع زبری‌های مختلف در هر حالت ارائه شده است.

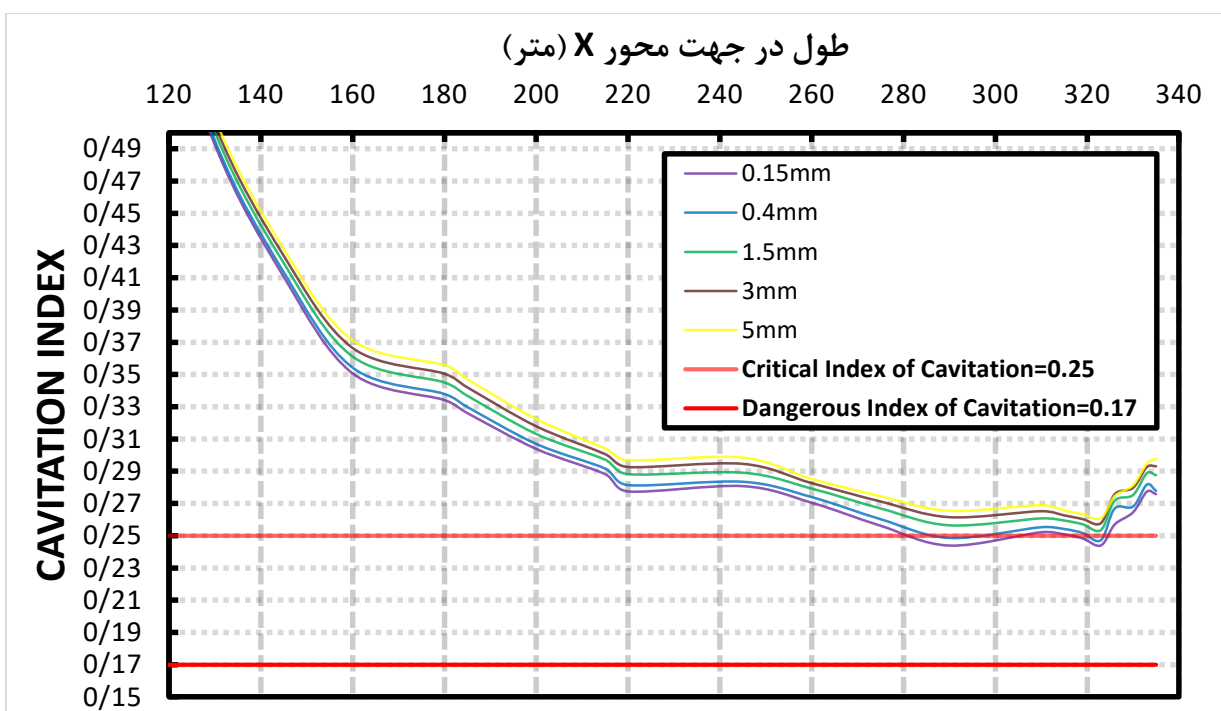
جدول ۴-۲ رده بندی پیشنهادی برای کنترل شاخص کاویتاسیون

| اندیس کاویتاسیون | نیاز های طراحی                                                              |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| بزرگتر از ۱/۸    | هیچ نیازی به محافظت از سطح نیست                                             |
| ۱/۸-۰/۲۵         | بستر جریان با اصلاحاتی شامل ساییدن تمام زبری ها قابل اصلاح می باشد          |
| ۰/۲۵-۰/۱۷        | بستر جریان با ترکیب تغییرات طراحی و پروفیل تندآب یا توسط هوادهی محافظت گردد |
| ۰/۱۲-۰/۱۷        | بستر جریان با هوادهی محافظت گردد                                            |
| کوچکتر از ۰/۱۲   | بستر جریان احتمالاً قابل محافظت نبوده و باید طراحی جدید صورت گیرد           |

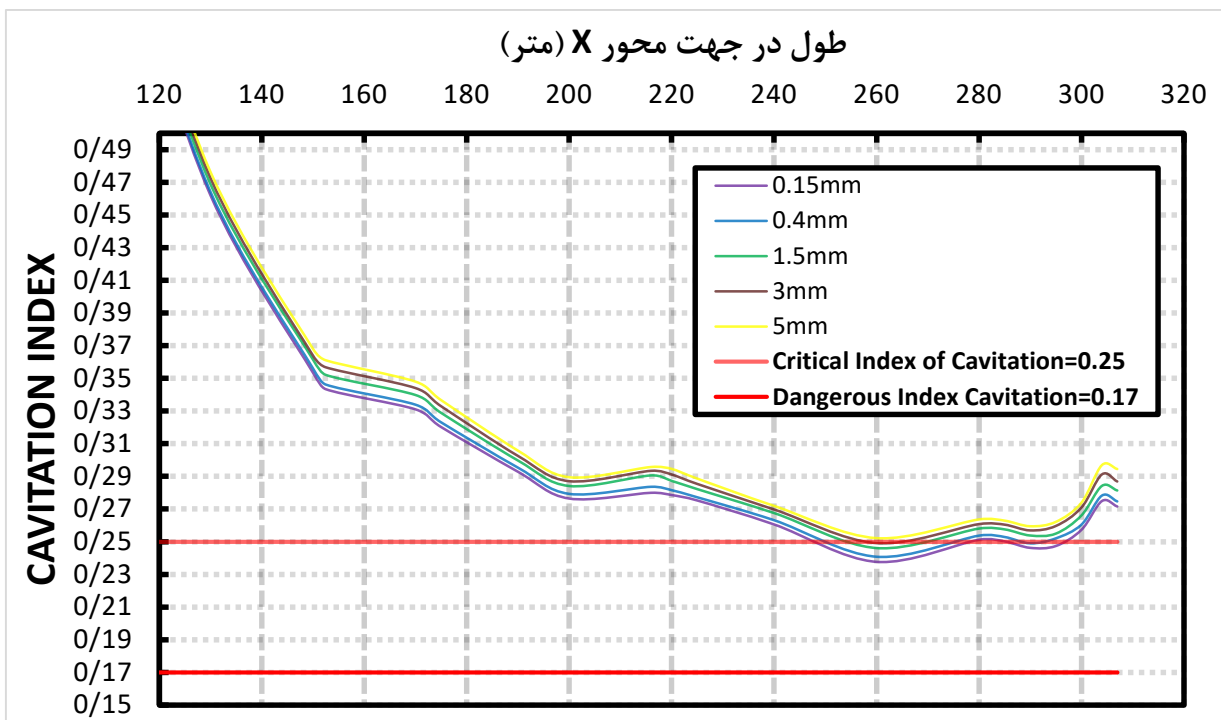
طبق مطالعات انجام شده (جدول ۴-۲) برای قسمتی از سرریز که شاخص کاویتاسیون به ۰/۲۵ برسد، شاخص بحرانی در نظر می‌گیریم که احتمال وقوع کاویتاسیون وجود دارد و عدد ۰/۱۷ را شاخص کاویتاسیون برای حالت خطرناک که احتمال وقوع خسارت شدید از رخداد کاویتاسیون وجود دارد مد نظر قرار می‌دهیم.



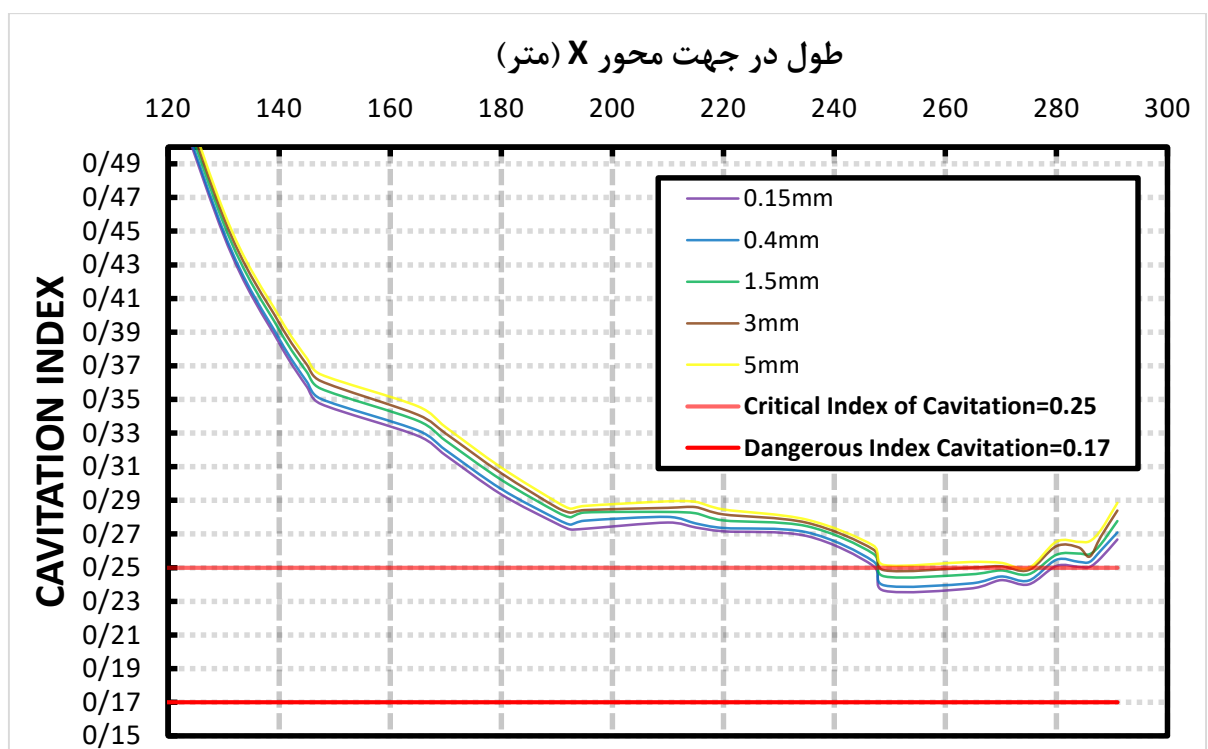
شکل ۴-۱۰ منحنی شاخص کاویتاسیون مدل با شیب بستر ۰.۲۶٪ برای زبری‌های مختلف



شکل ۴-۱۱ منحنی شاخص کاویتاسیون مدل با شیب بستر ۰.۳۰٪ برای زبری‌های مختلف



شکل ۴-۱۲ منحنی شاخص کاویتاسیون مدل با شیب بستر ۳۶,۴٪ برای زبری‌های مختلف



شکل ۴-۱۳ منحنی شاخص کاویتاسیون مدل با شیب بستر ۴۰٪ برای زبری‌های مختلف

با توجه به شکل‌های ۴-۱۰ الی ۴-۱۳ می‌توان دریافت که با افزایش شیب بستر، شاخص کاویتاسیون به مقدار شاخص بحرانی نزدیک‌تر می‌شود. همچنین می‌توان متوجه شد که با افزایش ارتفاع زبری شاخص کاویتاسیون افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که کمترین مقدار شاخص کاویتاسیون در محدوده‌های ۹۰ الی ۷۰ متر انتهایی سرریزهای مدل شده می‌باشد. حداقل بودن شاخص کاویتاسیون در این مدل‌ها تا ۱۰ متر انتهایی سرریز ادامه دارد.

در جدول زیر (جدول ۴-۳) کمترین شاخص کاویتاسیون برای هر کدام از مدل‌های مورد بررسی ارائه شده است.

جدول ۴-۳ شاخص بحرانی برای هر مدل مختلف از سرریز

| شیب<br>بستر    | ٪۲۶        |           |            | ٪۳۰        |            |            | ٪۳۶,۴      |           |            | ٪۴۰        |           |            |
|----------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| ارتفاع<br>زبری | ۱,۵e<br>-۴ | ۴e-۴      | ۱,۵e<br>-۳ | ۱,۵e-۴     | ۴e-۴       | ۱,۵e<br>-۳ | ۱,۵e<br>-۴ | ۴e<br>-۴  | ۱,۵e<br>-۳ | ۱,۵e<br>-۴ | ۴e-۴      | ۱,۵e<br>-۳ |
| $\sigma_{min}$ | ۰,۲۵۳      | ۰,۲۵<br>۸ | ۰,۲۶۷      | ۰,۲۵۳<br>۴ | ۰,۲۵۹<br>۴ | ۰,۲۶۷<br>۸ | ۰,۲۳۷      | ۰,۲۴<br>۱ | ۰,۲۴۶<br>۲ | ۰,۲۳۶      | ۰,۲۳<br>۹ | ۰,۲۴۴      |

## فصل پنجم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

## ۵-۱- مقدمه

پایان نامه حاضر با هدف بررسی رخداد کاویتاسیون بر روی سرریز تنداب مطالعه موردی آغاز گردید و مدلسازی عددی به کمک نرم افزار فلوئنت انجام گرفت.

## ۵-۲- مروری بر پژوهش

در گام اول، مدلسازی با هدف به دست آوردن نتایج آزمایشگاهی و عددی مشابه و نیز کسب اطمینان از شبیه‌سازی‌ها و صحت عملکرد نرم افزار صورت گرفت. انتهای فصل ۳ در این مرحله پس از ساخت مدل و نمایش نمودارهای فشار و سرعت و مقادیر سطح آب حاصل از مدلسازی مشاهده گردید، که مدل ساخته شده با نرم افزار Fluent با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی انطباق مناسبی دارد.

برای بررسی اثر شیب بستر و رخداد کاویتاسیون مدل‌هایی با شیب‌های مختلف (۲۶٪، ۳۰٪، ۳۶،۴٪ و ۴۰٪) در نظر گرفتیم و همچنین برای بررسی اثر ارتفاع زبری برای مدل‌های با شیب‌های مختلف به ازای ارتفاع زبری‌های مختلف ۰،۱۵ میلی متر (بتن صاف)، ۰،۴ میلی متر، ۱،۵ میلی متر، ۳ میلی متر و ۵ میلی متر (بتن زبر) در نظر گرفته شد.

در ادامه نمودارهای سرعت و فشار نیز که پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر روی وقوع کاویتاسیون هستند، در حالت‌های مختلف (بررسی جداگانه شیب بستر، بررسی جداگانه ارتفاع زبری کف سرریز و بررسی همزمان شیب و ارتفاع زبری) مورد بررسی قرار گرفتند. پس از بررسی نمودارهای فشار و سرعت در حالت‌های مختلف به بررسی شاخص کاویتاسیون پرداخته شده است.

## ۵-۳- نتایج پژوهش

پس از انجام این تحقیق نتایج زیر به دست آمدند:

\* در مدل با شیب بستر ۲۶٪ و ۳۰٪ احتمال وقوع کاویتاسیون برای انواع ارتفاع زبری‌های در نظر گرفته شده کم است. بنابراین بستر این مدل‌ها با اصلاحاتی قابل بهره‌برداری می‌باشند.

\* در مدل با شیب ۳۶,۴٪ در قسمت‌هایی از سرریز با بتن صاف احتمال وقوع کاویتاسیون بیشتر از مدل‌های با بتن معمولی و بتن زیر می‌باشد. پس بستر جریان برای این مدل باید محافظت گردد.

\* در مدل با شیب ۴۰٪ برای ارتفاع زبری‌های در نظر گرفته شده در ۶۰ متر انتهایی سرریز احتمال وقوع کاویتاسیون زیاد است. برای بتن صاف در این مدل سرعت در بالاترین حد رخ می‌دهد احتمال وقوع کاویتاسیون بیشتر از دو نوع بتن دیگر است. می‌توان اینطور برداشت کرد که شیب ۴۰٪ برای شوت این سرریز مناسب نیست.

## ۵-۴- پیشنهادات

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق موارد زیر برای ادامه تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود:

- \* استفاده از نرم افزارهای دیگر مانند Flow3D
- \* بررسی هوادهی بر پتانسیل وقوع کاویتاسیون
- \* مقایسه احتمال رخداد کاویتاسیون در سرریز تنداب با انواع سرریزها

## مراجع

## مراجع

- [1] Falvey, 1990. Cavitation in chutes and Spillways. Engineering monograph NO. 42, United States Department of the Interior –Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- [2] Chanson, H. , 1988, Study Of Air Entrainment And Aeration Devices On Spillway Model , Ph. D thesis , University of Canterbury.
- [3] Knapp, Daily, Hammitt. Cavitation, McGraw-Hill, Inc., New York, 1970.
- [۴] زندی گوهر ریزی ف، "تخمین کاویتاسیون در سرریز صاف با استفاده از منطق فازی"، پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، ۱۳۸۹.
- [۵] شایان سرشت س، مناف پور م، "بررسی مشخصه های هیدرولیکی جریان در سرریز سدهای بلند با توجه ویژه به کاویتاسیون"، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۲.
- [6] Beyrami , M ,1376 , Water Conveyence Structures , Publisher: Isfahan University of Technology
- [7] Chizelle, D., Kuhn, Y., Ceccio, S., Brennen, C., 1995. Observations and scaling of travelling bubble cavitation. Journal of Fluid Mechanics, 293(1): 99-126.
- [8] Dargahi, B. 2006, Experimental Stady & 3D Numerical Simulation For A Free Overflowe Spillway, J. Hyd. Eng., ASCE.
- [۹] حسینی س.م.، ابریشمی ج.، هیدرولیک کانالهای باز، ویرایش دوم، دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، ایران، صفحه ۳۵۰-۳۵۵ و ۴۲۰-۴۳۰، ۱۳۷۹.
- [۱۰] بیرامی م.ک.، سازه های انتقال آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، صفحه ۳۰-۶۵، ۱۳۷۶.
- [11] A water Resources Technical punlical. Design of small dams, united states department of the interior, united state, pp347-364. 1960.
- [12] Young, F. R., Cavitation, Imperial College Press, London, 1989.
- [13] Kenn M. J., Garrod A. D., Cavitation damage and the Tarbela Tunnel collapse of 1974, Prac. Instn Civ. Engrs. Part I, 70, PP. 65-89, Feb. 1981.
- [14] Chanson, H., 1988, Study Of Air Entrainment And Aeration Devices On Spillway Model, Doctor Of Philosophy in Civil engineering.

[۱۵] ویچردی. ال. هگر و. اچ، هیدرولیک سد، مترجم: قدسیان م، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ۱۳۸۲.

[۱۶] مهری م، فتحی مقدم م، ابن جلال ر، ۱۳۸۷، بررسی خلاءزایی (کاویتاسیون) بر روی سرریز سد بالا رود با استفاده از مدل فیزیکی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

[17] Cassidy, J. J. (1965). Irrotational flow over spillways of finite height. University of Missouri.

[18] Ikegawa, M., & Washizu, K. (1973). Finite element method applied to analysis of flow over a spillway crest. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 6(2), 179-189.

[19] Li, W., Xie, Q., & Chen, C. J. (1989). Finite analytic solution of flow over spillways. Journal of engineering mechanics, 115(12), 2635-2648.

[20] Olsen, N. R., & Kjellesvig, H. M. (1998). Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of spillway capacity. Journal of Hydraulic Research, 36(5), 775-784.

[21] Bürgisser, M. F., & Rutschmann, P. (1999). Numerical solution of viscous 2DV free surface flows: flow over spillway crests. Proc., 28th IAHR Congr., Technical University Graz, Graz, Austria.

[22] Unami, K., Kawachi, T., Babar, M. M., & Itagaki, H. (1999). Two-dimensional numerical model of spillway flow. Journal of hydraulic engineering, 125(4), 369-375.

[۲۳] خورشیدی، ح.، و همکاران، ۱۳۸۷، بررسی پدیده کاویتاسیون در تخلیه کننده های تحتانی سد سفیدرود به کمک Fluent، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

[۲۴] کاویانپور، م.، و همکاران، ۱۳۸۷، حل عددی جریان هوادهی در پایین دست هواده ها در تخلیه کننده های تحتانی سد سفیدرود، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.

[۲۵] شمسایی، ا.، محمدی، ع.، ۱۳۸۷، مطالعه تاثیر هندسه پله بر افت انرژی در سرریزهای پلکانی با شبیه سازی عددی، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.

[26] Kermani EF, Barani GA, Ghaeini-Hessaroeeyeh M. Investigation of cavitation damage levels on spillways. World Applied Sciences Journal. 2013; 21(1):73-8.

[۲۷] عباسی س، صمدی بروجنی ح، فتاحی نافچی ر، "بررسی پدیده کاویتاسیون در سرریز سد سورک با استفاده از مدل هیدرولیکی و نرم افزار فلوئنت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، مهندسی آب، دانشگاه شهر کرد، ۱۳۹۵.

[28] Parsaie A, Dehdar-Behbahani S, Haghiabi AH. Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2016 Dec 1; 10(4):438-44.

[29] Wan W, Liu B, Raza A. Numerical Prediction and Risk Analysis of Hydraulic Cavitation Damage in a High-Speed-Flow Spillway. *Shock and Vibration*. 2018; 2018.

[۳۰] کوچک زاده ص. پرورش ریزی ع.، مقدمه‌ای بر هیدرولیک جریان های ناپایدار، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۴.

[31] Savage B.M., Johnson M.C., Flowover oger spillway: physical and numerical model case study, *ASCE journal of Hydraulic engineering*, vol.127, NO.8 PP 640-649, 2001.

[32] Versteeg H.K., Malasekera W., Anintroduction to computational fluid dynamics, Longman scientific and Technical, New York, 1996.

[۳۳] ورستیگه ک، مالالاسکراو، مقدمه ای بر دینامیک سیالات محاسباتی CFD، مترجم: شجاعی فر دمبح، نور پور هشترودی ع. دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۷۹.

[34] Chinnarasic e., and won gwisess, s. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes, *Journal of Itrigation and Drainage Engineering*. ASCI, Vol. 132, NO.1, 70-76, (2006)

[۳۵] وزارت نیرو، مرکز تحقیقات منابع آب ایران، تهران، ۱۳۹۷.

## **Abstract:**

Therefore, over many years in our country, water storage structures such as dams have been widely constructed. The most important problem that threatens such structures is the possibility of cavitation in areas where water flow is very fast. So far, severe cavitation damage has been discovered in major spillways around the world.

In recent years, advanced and precise numerical methods have been used increasingly to design appropriately the complex hydraulic structures.

In this research, Fluent software was used to investigate the cavitation phenomenon around the chute spillway. The modeling procedure was implemented through two different phases. In the first step, the modeling was performed with the aim of obtaining similar numerical and laboratory results to ensure the accuracy of software performance. The results of this step showed that the model made with Fluent software is in excellent agreement with the results of the laboratory model tests. In the second step, sensitivity analysis was conducted in addition to the main model (chute spillway with 36.4 % bed slope), 26 %, 30 and 40% bed slope combined with different bed roughnesses including 0.15, 0.4, 1.5, 3 and 5 mm.

The results of parametric examination also showed that in the model with a bed slope of 26 % and 30 %, the probability of cavitation due to the roughness of elevation is low. In models with 36.4 % slope in some parts of chute spillway with higher roughness, probability of cavitation is lower than models with lower roughness. In the model with a 40 % bed slope for all considered roughness heights, the slope of the downstream side weir is located in the critical range of cavitation and the probability of cavitation is high at the 60 m end of the spillway.

**Keywords:** Chute spillway, cavitation, numerical simulation, Fluent, bed slope, roughness height.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Civil Engineering**

**M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures**

**The numerical simulation of flow over chute  
spillway and evaluating the effects of chute bed  
roughness height and slope on potential occurrence  
of cavitation**

**By:**

**s.Hossein Mousavi**

**Supervisor:**

**Dr. Ramin Amini**

**July 2020**